



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA**

**HÉLIO NOGUEIRA BEZERRA**

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESPACIAL EM UMA  
REGIÃO SEMIÁRIDA UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO**

**Natal**  
**2013**

**HÉLIO NOGUEIRA BEZERRA**

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESPACIAL EM UMA  
REGIÃO SEMIÁRIDA UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Mattos

Natal  
2013

**HÉLIO NOGUEIRA BEZERRA**

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESPACIAL EM UMA  
REGIÃO SEMIÁRIDA UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Dr. ARTHUR MATTOS – Orientador  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

---

Dr. GILMAR BRISTOT – Examinador Externo  
Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte - EMPARN

---

Dr. JOSÉ ESPÍNOLA SOBRINHO – Examinador Externo  
Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA

Natal, 26 de abril de 2013.

A minha querida mãe que sempre me deu muita força, amor, carinho, confiança, estímulo e sabedoria, e a quem tenho como referência de pessoa e exemplo de vida.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida, renovado a cada provação que se apresenta e nos sonhos que se concretizam, como este que agora se torna realidade.

Ao meu querido pai, José Nazareno, que sempre esteve ao meu lado, me educando, amando, aconselhando, sendo amigo e proporcionando toda minha formação acadêmica e pessoal.

A minha querida irmã, Waleska Nogueira, pelo amor incondicional e pelo apoio sempre demonstrado, e a quem tenho enorme consideração e carinho.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, pelo conhecimento compartilhado, em especial a Arthur Mattos, que me ajudou e me orientou nesse trabalho.

Aos amigos e companheiros de curso, Herison Alves, Jurema Maria, Salatiel Venâncio, José Francisco, Moisés Andrade, Alex Feitosa, Layane Priscila, Ceres Virginia, Danilo Luiz, Luciana Medeiros, Lorena Albuquerque, Katia Regina e Anne Kelly, que sempre me acompanharam nos trabalhos, compartilhando seus conhecimentos.

A toda família do LARHISA, Leonor Barbosa, Carina Vasconcelos, Lucymara Alves, Dacifran, Adriana, Wilson e Edilson, por organizar todas as tarefas necessárias ao bom funcionamento do Laboratório.

Aos companheiros do projeto MEVEMUC, em especial a Eduardo Paiva e José Neuciano, pelas atividades realizadas durante esses anos e pela ajuda que me deram na realização desse trabalho.

Ao ilmo. Coleguinha (Seu Assis), motorista dos projetos do LARHISA, pela amizade construída e pela disponibilidade em sempre ajudar e fazer das visitas técnicas viagens mais descontraídas.

Ao parceiro, Joel Medeiros, pela disponibilidade em ensinar todos os conhecimentos necessários a realização desse trabalho, ajudando e orientando nas etapas do desenvolvimento do método utilizado.

A toda minha família, que tem caminhado sempre ao meu lado em todos os momentos da minha vida, em especial a minha Tia Gracinha, Tio Gaudêncio, Tio Maximiano e Tia Cilinha, além de todos os meus primos, pela grande força e suporte que me deram.

Aos irmãos, Artur Leite e Bruno Harlen, a quem tenho grande gratidão por toda a força que me deram, além da confiança, do companheirismo, da amizade e de todo o suporte.

A todos que amo, em especial a Mariana Duarte, pelo companheirismo, carinho, conselhos, compreensão, incentivo e força.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro mediante concessão de bolsa, sem a qual não conseguiria suprir minhas necessidades básicas de estadia.

## RESUMO

BEZERRA, H.N. **Estimativa da evapotranspiração espacial em uma região semiárida utilizando sensoriamento remoto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 86 p, 2013.

Com a necessidade de se implantar sistemas de monitoramento e gestão dos recursos naturais em áreas susceptíveis à degradação ambiental, como é o caso das regiões semiáridas, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos a fim de encontrar modelos eficazes e viáveis técnica e economicamente. Diante disso, este trabalho teve como objetivo estimar a evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) diária através da aplicação do *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), a partir de produtos de sensoriamento remoto, em uma região semiárida, Seridó norte rio-grandense, e fazer a validação dessas estimativas utilizando valores de ET<sub>r</sub> obtidos pelo método de Penman-Monteith (método padrão da *Food and Agriculture Organization* - FAO). O SEBAL baseia-se no método do balanço de energia, que possibilita a obtenção do fluxo vertical de calor latente (LE) com imagens orbitais e, conseqüentemente, da evapotranspiração, através da diferença dos fluxos, também verticais, de calor no solo (G), calor sensível (H) e o saldo de radiação (R<sub>n</sub>). A área de estudo compreende o entorno do reservatório Dourado, situado no município de Currais Novos/RN. Para a implementação do algoritmo foram utilizados cinco imagens TM/Landsat-5. O trabalho foi dividido em três capítulos a fim de possibilitar uma melhor discussão de cada parte do processamento do SEBAL, ficando assim distribuídos: primeiro capítulo abordando a variabilidade espaço-temporal das variáveis biofísicas; segundo capítulo tratando da distribuição espaço-temporal do saldo de radiação instantâneo e diário; e o terceiro capítulo discutindo o cerne do trabalho, a estimativa da evapotranspiração real diária e a validação da mesma para a área estudada.

**Palavras-chave:** Evapotranspiração. Semiárido. Sensoriamento Remoto.

## ABSTRACT

With the need to deploy management and monitoring systems of natural resources in areas susceptible to environmental degradation, as is the case of semiarid regions, several works have been developed in order to find effective models and technically and economically viable. Therefore, this study aimed to estimate the daily actual evapotranspiration (ET<sub>r</sub>) through the application of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), from remote sensing products, in a semiarid region, Seridó of the Rio Grande do Norte, and do the validation of these estimates using ET<sub>r</sub> values obtained by the Penman-Monteith (standard method of the Food and Agriculture Organization-FAO). The SEBAL is based on energy balance method, which allows obtaining the vertical latent heat flux (LE) with orbital images and, consequently, of the evapotranspiration through the difference of flows, also vertical, of heat in the soil (G), sensitive heat (H) and radiation balance (R<sub>n</sub>). The study area includes the surrounding areas of the Dourado reservoir, located in the Currais Novos/RN city. For the implementation of the algorithm were used five images TM/Landsat-5. The work was divided in three chapters in order to facilitate a better discussion of each part of the SEBAL processing, distributed as follows: first chapter addressing the spatio-temporal variability of the biophysical variables; second chapter dealing with spatio-temporal distribution of instant and daily radiation balance; and the third chapter discussing the heart of the work, the daily actual evapotranspiration estimation and the validation than to the study area.

**Keywords:** Evapotranspiration. Remote sensing. Semiarid.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Mapa de localização da área de estudo com os principais tipos de uso e ocupação do entorno do reservatório Dourado.....	29
<b>Figura 2:</b> Distribuição temporal da precipitação diária e da temperatura média diária do ar medida em estação meteorológica convencional no município de Cruzeta/RN.....	31
<b>Figura 3:</b> Distribuição espaço temporal do NDVI para a área de estudo (Currais Novos/RN).....	36
<b>Figura 4:</b> Variabilidade espacial e temporal da temperatura de superfície para o entorno do reservatório Dourado (Currais Novos/RN).....	39
<b>Figura 5:</b> Mapa de Currais Novos-RN com indicação da área de estudo.....	47
<b>Figura 6:</b> Variação da insolação e da radiação solar global durante o período de estudo e posicionamento das imagens selecionadas para aplicação no SEBAL.....	49
<b>Figura 7:</b> Fluxograma do processamento do saldo de radiação instantâneo à superfície ( $R_n$ ) pelo SEBAL.....	51
<b>Figura 8:</b> Mapa temático da distribuição espacial e temporal do saldo de radiação instantâneo para o entorno do reservatório Dourado (Currais Novos/RN).....	53
<b>Figura 9:</b> Mapa temático da variação espacial e temporal do saldo de radiação diário para o entorno do reservatório Dourado (Currais Novos/RN).....	57
<b>Figura 10:</b> Gráfico de <i>Boxplot</i> para os dados das cinco imagens de $R_{n24h}$ .....	59
<b>Figura 11:</b> Mapa de localização da área de estudos com a hidrografia local.....	66
<b>Figura 12:</b> Esquema do processo iterativo para obtenção do fluxo de calor sensível (H) a partir do algoritmo SEBAL.....	70
<b>Figura 13:</b> Mapa temático da variação espacial e temporal da evapotranspiração real diária para o entorno do reservatório Dourado (Currais Novos/RN).....	74

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Dados das imagens do satélite Landsat-5/ sensor <i>Thematic Mapper</i> (TM).....	33
<b>Tabela 2:</b> Descrição das bandas do sensor TM do Landsat-5, com os intervalos correspondentes de comprimento de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima – a e máxima – b) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera.....	34
<b>Tabela 3:</b> Etapas do processamento das variáveis biofísicas.....	34
<b>Tabela 4:</b> Valores estatísticos descritivos aplicados sobre os dados exportados das imagens de NDVI.....	38
<b>Tabela 5:</b> Valores estatísticos descritivos aplicados sobre os dados exportados das imagens de Ts.....	40
<b>Tabela 6:</b> Valores estatísticos descritivos aplicados sobre os dados exportados das imagens de Rn resultantes da aplicação do SEBAL.....	54
<b>Tabela 7:</b> Valores diários das principais variáveis meteorológicas para cada imagem e precipitação anual acumulada.....	55
<b>Tabela 8:</b> Análise comparativa entre a média das estimativas do Rn diária pelo SEBAL e os resultados obtidos pela método de Penman-Monteith/FAO.....	56
<b>Tabela 9:</b> Valores estatísticos descritivos aplicados sobre os dados exportados das imagens de Rn <sub>24h</sub> resultantes da aplicação do SEBAL.....	58
<b>Tabela 10:</b> Valores médios diário das variáveis meteorológicas medidas em estação meteorológica do INMET, Cruzeta/RN.....	67
<b>Tabela 11:</b> 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.....	68
<b>Tabela 12:</b> Valores estatísticos descritivos aplicados sobre os dados exportados das imagens de ETr resultantes da aplicação do SEBAL.....	76
<b>Tabela 13:</b> Resultados da validação das estimativas da ETr diária pelo SEBAL a partir dos valores obtidos pela método de Penman-Monteith/FAO.....	78

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	14
2.1 OBJETIVO GERAL .....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	15
3.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO .....	15
3.1.1 Evapotranspiração potencial (ETP) e de referência (ETo) .....	16
3.1.2 Evapotranspiração real (ETr) e espacial .....	17
3.2 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO .....	17
3.3 USO DE DADOS RADIOMÉTRICOS DE SENSORIAMENTO REMOTO NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO .....	18
3.4 ALGORITMO DO BALANÇO DE ENERGIA À SUPERFÍCIE PARA A TERRA .....	19
3.5 A APLICAÇÃO DO SEBAL NOS ECOSISTEMAS MUNDIAIS .....	20
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	26
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	27
<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	28
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	35
<b>CONCLUSÕES</b> .....	41
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	42
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	44
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	45
<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	47
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	52
<b>CONCLUSÕES</b> .....	59
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	60

<b>CAPÍTULO 3</b> .....	63
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	64
<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	65
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	74
<b>CONCLUSÕES</b> .....	79
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	79
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	81
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	82

## 1 INTRODUÇÃO

As regiões semiáridas do nordeste brasileiro se caracterizam pela deficiência e/ou irregularidade de chuvas, tanto em escala temporal como espacial, onde a evapotranspiração normalmente supera a precipitação, provocando grandes perdas de água disponível na superfície (SILVA, 2007), seja em reservatórios através da evaporação, ou através da vegetação e do solo pela evapotranspiração.

Esses padrões climáticos característicos da região semiárida induzem ao estabelecimento de algumas feições, como a formação vegetal da região composta pela Caatinga hiperxerófila, plantas resistentes à seca, e solos de relevo plano com baixa profundidade e susceptíveis à erosão natural, com pouca ou nenhuma formação de aquíferos (ARAÚJO, 2003).

Na parte semiárida do estado do Rio Grande do Norte, a microrregião do Seridó é uma das áreas do planeta enquadrada pela Convenção de Combate à Desertificação (CCD) como núcleo de desertificação, por apresentar baixos índices de umidade do solo, fato decorrente da alta evapotranspiração associado aos baixos índices pluviométricos. Estas áreas apresentam susceptibilidade aos processos de desertificação relacionados com a ação da variação climática e com as atividades antrópicas (VALADÃO *et al.* 2010).

Nessas condições, onde as precipitações se apresentam em baixas médias e com irregularidade em sua distribuição, a grande preocupação deve ser com as demandas, que necessitam ser monitoradas para uma possibilidade mais adequada de gestão das águas. Diante disso, a evapotranspiração (ET), que retira da superfície terrestre aproximadamente 59% do volume precipitado (OKI; KANAE, 2006), figura 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 eficaz, eficiente e precisa.

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.

Nas duas últimas décadas, diversos modelos foram desenvolvidos em pesquisas com o objetivo de estimar os fluxos de calor na superfície terrestre a partir de técnicas de sensoriamento remoto, que segundo Bezerra *et al.* (2011), tem

assumido grande importância no monitoramento de diversos fenômenos meteorológicos e ambientais, se tornando uma ferramenta poderosa para a obtenção de informações necessárias ao manejo, gerenciamento e gestão de recursos naturais.

As principais vantagens, segundo Gomes (2009), da estimativa da evapotranspiração pelos modelos semi-empíricos são: extrapolação dos valores de evapotranspiração para áreas maiores, diferentemente do que ocorre com dados pontuais; estimativa direta da água gasta no processo de evapotranspiração sem a necessidade de quantificar outras variáveis hidrológicas de difícil determinação; aplicabilidade em áreas heterogêneas, ao contrário dos modelos convencionais, que estimam valores de evapotranspiração para áreas homogêneas; e implementação de forma econômica e eficaz.

Dentre esses modelos semi-empíricos, o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), desenvolvido por Bastiaanssen (1995) e complementado por Allen *et al.* (2002), vem se destacando por utilizar imagens de satélite e poucas informações de superfície, tais como temperatura do ar e velocidade do vento, que são facilmente obtidas em estações meteorológicas, além de empregar poucas relações e suposições empíricas.

A evapotranspiração 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 a dados radiométricos de qualquer sensor orbital que efetue medidas da radiação no visível, infravermelho próximo e infravermelho termal. Adicionalmente, a resolução especial está associada ao tamanho do pixel da imagem do sensor orbital que se está trabalhando, portanto, deve-se adequar a escala e a resolução espacial da imagem à área de estudo, quanto à sua homogeneidade.

Segundo Bastiaanssen *et al.* (1998), autor do algoritmo, o SEBAL descreve diversas variáveis meteorológicas através de funções semi-empíricas, que podem ser aplicadas em diversos agrossistemas, e a sua principal vantagem é a baixa demanda por informações de uso, como cobertura do solo, dados climatológicos e meteorológicos. Além dessas vantagens, o SEBAL ainda apresenta uma vasta aplicabilidade, como ferramenta para suporte em sistemas agro meteorológicos, climatológicos e hidrológicos.

A utilidade do SEBAL na gestão de recursos hídricos, segundo informações do site oficial do próprio algoritmo, é que o mesmo é capaz de quantificar as perdas reais de água de uma bacia com alta distribuição espacial e temporal, o que é extremamente necessário em modelagem hidrológica e possibilita uma gestão mais racional de uma bacia hidrográfica. São exemplos de aplicações do SEBAL em estudos de bacias hidrográficas: Bastiaanssen (2000), na Turquia, Kramer (2002), em Idaho, nos Estados Unidos, Mohamed *et al.* (2004), no Egito, Bastiaanssen e Ali (2003) no Paquistão, e Silva *et al.* (2012), no Brasil.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Estimar a evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) diária através da aplicação do algoritmo SEBAL em uma região semiárida, Seridó norte rio-grandense, e fazer a validação dessas estimativas utilizando valores de ET<sub>r</sub> obtidos pelo método de Penman-Monteith, método padrão da *Food and Agriculture Organization* (FAO).

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Computar os valores das variáveis biofísicas a partir de dados de sensoriamento remoto, e relacioná-los com a variabilidade temporal e espacial das variáveis climatológicas;
- Estimar os componentes do balanço de radiação utilizando sensoriamento remoto, elaborar mapas do saldo de radiação instantâneo e diário para a área de estudo e relacionar estes valores com a sazonalidade das variáveis climatológicas e biofísicas;
- Quantificar os fluxos dos componentes do balanço de energia à superfície pelo SEBAL e elaborar mapas de evapotranspiração diária;
- Validar as estimativas de evapotranspiração utilizando valores padrões obtidos pelo método de Penman-Monteith/FAO.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração é um dos mais importantes elementos de clima e de tempo, tanto em escala global quanto local, consistindo da ligação entre energia, clima e hidrologia. Estima-se que aproximadamente 59% do volume precipitado sobre os continentes retorne à atmosfera por meio da evapotranspiração global (OKI; KANAE, 2006).

Dois processos são representados pela evapotranspiração, evaporação e transpiração, que ocorrem de maneira natural e simultânea, em uma superfície vegetada. A evaporação, segundo definição de Allen *et al.* (1998), é o processo por meio do qual a água é convertida da fase líquida para a fase de vapor, removendo-a de superfícies evaporativas. Já a transpiração é a água transferida ou perdida da vegetação para a atmosfera, a partir dos estômatos situados na superfície das folhas.

Esse processo sofre influência direta de alguns elementos do clima, como: radiação solar, temperatura da superfície, temperatura e umidade relativa do ar e o vento (PEREIRA *et al.*, 2002). Dentre esses elementos, a radiação solar atua como a fonte de energia utilizada no processo de evapotranspiração.

A energia provinda da radiação solar é responsável pelo aquecimento do ar e da superfície, condicionando a difusão do vapor d'água (umidade do ar) produzido na interface superfície-atmosfera. Ou seja, o saldo de radiação ( $R_n$ ) é repartido em calor sensível ( $H$ ) para o ar, calor sensível para o solo e em calor latente ( $LE$ ), que é utilizado na mudança de fase da água, líquida na superfície para vapor na atmosfera.

Assim, se a camada de ar sobre a superfície estiver saturada com vapor d'água, pode-se dizer que a pressão de vapor ( $e_a$ ) no momento é igual a pressão de saturação de vapor ( $e_s$ ) ( $e_s - e_a = 0$ ), portanto não ocorre evapotranspiração. Apenas quando a camada atmosférica adjacente não está saturada é que a pressão de vapor é inferior a pressão de saturação ( $e_s - e_a > 0$ ), ocasionando a evapotranspiração.

Dentro desse processo, o vento se apresenta como fator positivo, pois remove o vapor d'água produzido, evitando que a atmosfera adjacente se sature.

Outro aspecto a considerar é a turbulência, que aumenta com a velocidade do vento, acelerando a difusão vertical do vapor d'água gerado na interface superfície-atmosfera (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Fatores ligados à vegetação também têm uma grande parcela de influência no processo de evapotranspiração. O albedo da vegetação, por exemplo, influencia diretamente na disponibilidade do saldo de radiação para o processo, pois quanto mais escura for a vegetação, menor será a reflexão dos raios solares incidentes, conseqüentemente maior a absorção e maior será o saldo de radiação (PEREIRA *et al.*, 2002).

### 3.1.1 Evapotranspiração potencial (ETP) e de referência (ETo)

O primeiro conceito de evapotranspiração (ET) foi introduzido por Thornthwaite (1948), que considerou o fenômeno chamado de evapotranspiração potencial (ETP), como a perda máxima de água em uma superfície de solo bem umedecido, completamente coberta com vegetação, em fase de desenvolvimento ativo e com dimensões suficientemente grandes, de modo a minimizar os efeitos de energia advectiva local. Se algumas dessas condições não forem atendidas tem-se a evapotranspiração real.

Quase que simultaneamente, Penman (1948), na Inglaterra, também definiu a ETP, ressaltando-a como o processo de transferência d'água para a atmosfera, na unidade de tempo, de uma superfície totalmente coberta por vegetação verde, de porte baixo, em pleno desenvolvimento e sem restrição de água no solo.

Essa definição foi muito utilizada até que surgiu a necessidade de um conceito mais geral para o termo evapotranspiração, dada às diferenças entre as culturas utilizadas, mesmo se tratando de variedades de grama, no conceito da referida variável.

Então surgiu a definição de evapotranspiração de referência (ETo) por Doorenbos e Pruitt (1977) no Boletim 24 da FAO como sendo a taxa de evapotranspiração para uma extensa superfície, com cobertura gramada de altura uniforme, entre 8 e 15 cm, em crescimento ativo, com o solo completamente sombreado e sem déficit de água.

Esse conceito foi introduzido para possibilitar o estudo da demanda evaporativa da atmosfera independentemente do tipo, da fase de desenvolvimento

ou do manejo da cultura. Dessa forma, os elementos atmosféricos são os únicos fatores que afetam a evapotranspiração de referência. Fato que explica o motivo da ETo ser uma variável atmosférica que, a depender da escala temporal de interesse, pode ser computada a partir de dados climáticos.

### 3.1.2 Evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) e espacial

Diante dos conceitos de evapotranspiração potencial e de referência, define-se evapotranspiração real como aquela determinada nas condições reais de fatores atmosféricos e umidade do solo. A evapotranspiração real é sempre menor ou igual a potencial, tendo em vista que a segunda representa a capacidade máxima de evaporação de água do solo e transpiração pelas plantas.

Todos os métodos de estimativa, seja ele direto ou indireto, determinam a evapotranspiração real considerando as condições existentes. Nas estimativas indiretas que utilizam dados de sensoriamento remoto a representação dos valores da evapotranspiração real é feita em forma de mapas. Assim, os valores são apresentados em variação espacial, e por isso a denominação de evapotranspiração espacial.

## 3.2 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Os métodos destinados à estimativa da evapotranspiração se apresentam em diretos e indiretos. Os métodos diretos consistem de medidas realizadas através de lisímetros (de pesagem ou drenagem), do balanço hídrico e do controle da umidade no solo. Os métodos indiretos se baseiam em estimativas por meio de fórmulas empíricas, utilizando dados meteorológicos. O método do balanço de energia, da razão de Bowen e das correlações turbulentas são exemplos de métodos indiretos.

Mesmo precisos, os métodos citados acima apresentam limitações quanto a estimativa da evapotranspiração em áreas com grande dimensão e heterogeneidade, pois consideram dados pontuais, para um local específico, e são integradas para a área que envolve o local da medição, considerando-se que a evapotranspiração seja uniforme na referida área.

Diante dessas limitações, métodos indiretos que usam recursos radiométricos de imagens de satélites estão sendo desenvolvidos e têm mostrado resultados satisfatórios na estimativa da evapotranspiração, já que são capazes de cobrir grandes áreas e obter valores da evapotranspiração em escala regional mostrando variações da mesma dentro de uma grande área (BOEGH *et al.*, 2002; HAFEEZ *et al.*, 2002).

### 3.3 USO DE DADOS RADIOMÉTRICOS DE SENSORIAMENTO REMOTO NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Sensoriamento remoto é o termo usado para definir a tecnologia que permite o estudo de algumas características de um objeto, sem que, necessariamente, se estabeleça contato com o mesmo. A tecnologia usada nos satélites é um exemplo do sensoriamento remoto – os sensores colocados a bordo dessas plataformas orbitais são capazes de registrar o nível de radiação eletromagnética refletida e/ou emitida de um determinado local na superfície terrestre.

Os dados radiométricos de sensoriamento remoto, obtidos a partir de sensores por satélites orbitais, têm o potencial de fornecer informações detalhadas sobre as propriedades da superfície da terra e estimar a evapotranspiração tanto em escala local como regional.

A estimativa da evapotranspiração a partir do balanço de radiação com sensoriamento remoto é classicamente descrita em função do balanço de radiação de ondas curtas e longas (BASTIAANSSEN, 1995). Para Mohamed *et al.* (2004), a técnica de obtenção da evapotranspiração por sensoriamento remoto é realizada através do balanço de energia sem a necessidade de considerar outros processos hidrológicos complexos.

O método do balanço de energia possibilita a obtenção do fluxo vertical de calor latente (LE) com imagens orbitais e, conseqüentemente, da evapotranspiração, através da diferença dos fluxos, também verticais, de calor no solo (G), calor sensível (H) e o saldo de radiação (Rn). Esse método é utilizado pelos principais algoritmos que utilizam dados gerados a partir de imagens de satélites: SEBAL (BASTIAANSSEN, 1995), SSEBI (ROERINK *et al.*, 2000), SEBS (JIA *et al.*, 2003), TSEB (NORMAM *et al.*, 1995), METRIC (ALLEN *et al.*, 2005), dentre outros.

O monitoramento espaço-temporal da ETr por imagens de sensoriamento remoto pode ser aplicado para dados radiométricos de qualquer sensor orbital que efetue medidas da radiância no visível, infravermelho próximo e infravermelho termal. Esse método tem sido aplicado a imagens do Mapeador Temático – TM do Landsat 5 (BASTIAANSEN *et al.*, 1998; BASTIAANSEN, 2000; SILVA *et al.*, 2005; SILVA; BEZERRA, 2006; BEZERRA *et al.*, 2008), NOAA-AVHRR (TIMMERMANS; MEIJERINK, 1999; BASTIAANSEN; ALI, 2003; HEMAKUMARA *et al.*, 2003; SAMARASINGHE, 2003), Terra/MODIS (HAFEEZ *et al.*, 2002) e Terra/ASTER (HAFEEZ *et al.*, 2002).

### 3.4 ALGORITMO DO BALANÇO DE ENERGIA À SUPERFÍCIE PARA A TERRA

O SEBAL, que foi desenvolvido por Bastiaanssen (1995) e complementado por Allen *et al.* (2002), é um método de estimativa da evapotranspiração baseado na conversão do valor instantâneo do fluxo de calor latente – LE ( $W\ m^{-2}$ ), em evapotranspiração real diária – ETr (mm). O LE é obtido como resíduo da equação clássica do balanço de energia à superfície, sendo:

$$R_n = LE + H + G \quad (1)$$

Onde  $R_n$  é o saldo 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  $W\ m^{-2}$ .

A implementação do SEBAL utiliza métodos computacionais um tanto quanto complicados, porém a sua aplicação é bastante viável, tendo em vista a capacidade de estimativa da ETr em áreas de grande heterogeneidade e dimensão, permitindo uma avaliação espacial, diferentemente de outros métodos diretos e indiretos que determinam valores pontuais.

O baixo custo de aplicação apesar da grande cobertura de área superficial, associado à alta resolução espacial, constituem vantagens da utilização do SEBAL. Além dessas, a baixa exigência de dados de superfície é outro atrativo para a

escolha desse modelo para a estimativa da ETr. Para o processamento do SEBAL é necessário obtenção dos seguintes dados meteorológicos observados na superfície:

- Velocidade do vento (preferencialmente de hora em hora);
- Precipitação (valores diários);
- Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ).

Além desses, outros dados meteorológicos são recomendados para calcular a evapotranspiração de referência horária e diária:

- Umidade relativa do ar (dados horários, tais como pressão de vapor do ar ou temperatura do ponto de orvalho);
- Radiação solar (por hora);
- Temperatura do ar (por hora).

A velocidade do vento ( $u$ ) no momento da passagem do satélite é necessária para o cálculo do fluxo de calor sensível e para o cálculo da  $ET_0$ . Os dados de precipitação são utilizados para avaliar a "umidade" geral das áreas que receberam a chuva dentro de quatro ou cinco dias antes da data da imagem (ALLEN *et al.*, 2002).

Os dados de umidade relativa do ar são necessários para o cálculo da  $ET_0$ . Os valores de radiação solar são úteis para a estimativa da nebulosidade da imagem e para ajustar a transmissividade atmosférica ( $\tau_{sw}$ ).

A evapotranspiração de referência é a estimada para uma cultura de referência bem regada. No Brasil, a grama batatais é recomendada. Ela é usada para calcular o H no pixel âncora "frio" e para calcular a fração de  $ET_0$  ( $FET_0$ ) que é utilizada para estimar a ET sazonal e de 24-horas.

### 3.5 A APLICAÇÃO DO SEBAL NOS ECOSISTEMAS MUNDIAIS

O SEBAL vem sendo bastante utilizado por diversos autores (ZWART; BASTIAANSEN, 2007; HEMAKUMARA *et al.*, 2003; ALLEN *et al.*, 2002; LAGOUARDE *et al.*, 2002; BASTIAANSEN, 2000; KITE; DROOGERS, 2000; WANG *et al.*, 1995), obtendo-se valores de ET considerados consistentes quando

comparados a dados obtidos em campo, com variações de até 10% no resultado final.

No entanto, alguns pesquisadores encontraram resultados com incertezas maiores. French *et al.* (2005) obtiveram erros de até 25% em regiões agrícolas dos Estados Unidos, enquanto Jacob *et al.* (2002) computaram, para essa mesma região, erros superiores a 30%, mostrando estimativas superestimadas comparadas aos valores de referência.

Diante da vasta aplicabilidade do SEBAL, Droogers e Bastiaanssen (2002) desenvolveram uma pesquisa na Turquia para estimar a evapotranspiração real de diversas culturas, e constataram que o algoritmo pode ser aplicado em uma grande variedade de condições de irrigação, sem a necessidade de extensivas pesquisas de campo. Ainda concluíram que o modelo pode ser uma ferramenta potencial na identificação de indicadores de desempenho e procedimentos contábeis de água na agricultura irrigada, além de auxiliar na obtenção de suas escalas prováveis.

Dentro dessa expectativa, Zwart e Bastiaanssen (2007) utilizaram o SEBAL para quantificar a variação espacial da produtividade da cultura, a evapotranspiração e produtividade decorrente da água aplicada na irrigação utilizando imagens de satélite de alta e baixa resolução. Os autores validaram as estimativas de ET pelo SEBAL para uma área de trigo irrigado, no Vale Yaqui, México, comprovando a precisão do modelo (erro relativo de 8,8% para 110 dias).

Ao se tratar de validação, Bastiaanssen (2000) conclui que, apesar do algoritmo SEBAL ter sido fundamentado em formulações empíricas, os resultados da validação do mesmo em experimentos de campo têm mostrado que o erro relativo na fração evaporativa foi de 20%, 10% e 1% nas escalas de 1km, 5 km e 100 km, respectivamente. O autor espera que o SEBAL apresente melhores resultados em escala regional, como também em áreas com superfície heterogênea.

Hemakumara *et al.* (2003), em estudo realizado numa área de vegetação mista em Horana, sudeste de Colombo, Sri Lanka, estimaram e validaram a ET pelo SEBAL com valores estimados a partir de um cintilômetro de abertura larga. As estimativas de ET pelo algoritmo do balanço de energia para a superfície da terra foram derivadas usando imagens do satélite NOAA. O desvio médio entre as estimativas de ET pelo SEBAL e pelo cintilômetro foi de 17%. No entanto, este desvio caiu para 1%, quando foram consideradas estimativas mensais. A pesquisa apresenta resultados entre 1 e 6 mm/dia de evapotranspiração real, com alta

variabilidade devido a acentuada heterogeneidade da cobertura vegetativa da região estudada.

Kimura *et al.* (2007) também aplicaram e validaram o SEBAL na estimativa da ET diária de vegetação nativa na região nordeste da bacia do Planalto Loess, na China. Os resultados obtidos mostraram evapotranspiração real diária, entre 4 e 5,5 mm, para as regiões de corpo hídrico e adjacências, valores próximos a zero para solos expostos, e resultados intermediário, entre 1,5 e 2,5 mm/dia, para as pastagens naturais. Esses autores comentaram ainda que apesar da grande aplicação do SEBAL em áreas irrigadas de diversos ecossistemas do mundo, poucas referências são encontradas quando se investiga a estimativa da evapotranspiração da vegetação nativa de regiões semiáridas pelo emprego deste algoritmo.

Porém, no Brasil, o SEBAL vem sendo aplicado em áreas irrigadas da região semiárida do Nordeste, e tem mostrado resultados satisfatórios. Moreira (2009) analisou métodos para validação da estimativa da evapotranspiração real diária pelo algoritmo SEBAL em área irrigada de melancia no perímetro irrigado Baixo Acaraú, Ceará. Os resultados mostraram que é viável a calibração do SEBAL para as condições semiáridas do Brasil, e que é possível validar o modelo pelo método do balanço hídrico do solo e das correlações turbulentas.

Visando essa comprovação, Silva e Bezerra (2006) realizaram uma pesquisa com o objetivo de determinar os componentes do balanço de energia à superfície, processo da estimativa da evapotranspiração real diária pelo SEBAL, utilizando imagens TM/Landsat-5 no perímetro irrigado Senador Nilo Coelho, localizado às margens do rio São Francisco em Petrolina-PE, região semiárida do nordeste brasileiro. O estudo concluiu que o algoritmo apresenta um grande potencial de aplicação prática para a região, necessitando apenas de mais informações acerca da área estudada, como um mapa de uso e ocupação do solo, bem como campanhas experimentais com a finalidade de aferir os resultados e parametrizar as diferentes variáveis envolvidas no cálculo dos componentes do balanço de energia à superfície pelo modelo.

Bezerra *et al.* (2008), em estudo realizado no Cariri cearense, obtiveram resultados precisos da evapotranspiração diária média, que foram validados em área de campos irrigados (mamona e algodão), vegetação nativa e parte da floresta da Chapada do Araripe, apresentando erros relativos inferiores a 10%. Os valores

obtidos de evapotranspiração real diária variaram de inferiores a 1 mm e superiores a 6 mm, devido a alta variabilidade da cobertura vegetal da área considerada para a cena de estudo. Os valores maiores compreendem regiões de alta disponibilidade hídrica no solo, ou seja, áreas irrigadas, que devido a elevada incidência de radiação, transforma essa água disponível em vapor.

Silva *et al.* (2012), objetivando mapear e validar a evapotranspiração real e determinar o volume de água utilizado no projeto de irrigação de São Gonçalo, PB, no Semiárido brasileiro, com auxílio do sensoriamento remoto, também aplicaram o SEBAL e validaram com o método de estimativa de Penman-Monteith (método padrão da FAO). Nas áreas irrigadas, a  $ET_{Sebal}$  variou de 4,4 a 5,6 mm/dia. Na área de sequeiro, a  $ET_{Sebal}$  apresentou valor diário mínimo de 0,6 mm e máximo de 1,7 mm. As diferenças obtidas, com uso das duas técnicas, resultaram em raiz do erro quadrado médio, erro relativo médio e erro absoluto médio iguais a 0,53 mm, 9,46% e 0,43 mm, respectivamente. Nas áreas irrigadas, a  $ET_r$  representou 85% do saldo de radiação e, nas de sequeiro, apenas 12,5%, devido a baixa quantidade de água disponível para evapotranspirar.

Dentro do processo da estimativa da evapotranspiração pelo algoritmo SEBAL é possível avaliar a variabilidade espacial de todas as 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) e do saldo de radiação (instantâneo e diário) envolvidas no modelo.

Utilizando essa concepção de aplicabilidade do SEBAL, Moreira (2007) usou o referido algoritmo para avaliar o balanço de radiação, os componentes do balanço de energia e a evapotranspiração horária em três regiões no estado do Ceará (Região do Baixo Acaraú, Região da Chapada do Apodi e Região da Chapada do Araripe). Concluiu que na estimativa do saldo de radiação, assim como dos componentes do balanço de energia e da ET, o SEBAL se mostrou bastante eficiente apresentando resultados significativos demonstrando a existência de uma variabilidade local e regional na evapotranspiração.

Dentro desse contexto, Silva *et al.* (2005) realizaram um trabalho que teve por objetivo determinar o balanço de radiação à superfície, com base nos procedimentos do SEBAL, envolvendo áreas irrigadas do Projeto Senador Nilo Coelho, parte do Lago de Sobradinho, áreas de vegetação nativa (Caatinga) e parte da área urbana

dos municípios de Petrolina, PE e Juazeiro, BA. O saldo de radiação obtido com o algoritmo atingiu valor médio no horário da passagem do satélite igual a  $615,0 \text{ W.m}^{-2}$ , para a imagem do ano 2000, e  $583,9 \text{ W.m}^{-2}$ , para imagem de 2001. Os autores concluíram que a técnica do balanço de radiação com imagens de satélite produziu valores dos componentes do balanço de radiação sobre: áreas irrigadas, solo descoberto e superfície livre de água, na região do submédio do Rio São Francisco, consistentes com observações realizadas do balanço radiativo à superfície.

Bezerra (2004) obteve valores médios do saldo de radiação instantâneo de  $566,3 \text{ W.m}^{-2}$  para áreas irrigadas com pivô central,  $532,6 \text{ W.m}^{-2}$  para solo exposto,  $555,6 \text{ W.m}^{-2}$  para vegetação de Caatinga e  $705,1 \text{ W.m}^{-2}$  para o lago de Sobradinho para o ano de 2000 e  $579,9 \text{ W.m}^{-2}$  (pivô central),  $509,9 \text{ W.m}^{-2}$  (solo exposto),  $550,4 \text{ W.m}^{-2}$  (Caatinga) e  $711,7 \text{ W.m}^{-2}$  (lago de 32 Sobradinho), para o ano de 2001, todos os valores instantâneos referentes ao instante de passagem do satélite naquelas áreas.

Bezerra (2006) aplicou o SEBAL em área de vegetação nativa na Chapada do Araripe – Ce e obteve um valor do saldo de radiação instantâneo igual a  $550 \text{ Wm}^{-2}$  para áreas de solo exposto ou com vegetação bastante rala. Para a área de vegetação densa, no topo da chapada e corpos hídricos o  $R_n$  foi superior a  $700 \text{ Wm}^{-2}$ , já para áreas consideradas de boa cobertura vegetal o  $R_n$  ficou em torno de 650 a  $700 \text{ Wm}^{-2}$ .

Durand *et al.*, (2007) fizeram estimativas instantâneas com o SEBAL e imagens do Landsat 7, usando imagens de 1999 e obtiveram valores do saldo de radiação instantâneo para áreas de pivô central de 605 a  $870 \text{ Wm}^{-2}$ , para áreas de solo exposto 150 a  $420 \text{ Wm}^{-2}$  e para as áreas de vegetação nativa valores variando de 510 a  $550 \text{ Wm}^{-2}$  no Distrito Irrigado Jaguaribe Apodi no município de Limoeiro do Norte Ceará.

Além do saldo de radiação ( $R_n$ ), Borges *et al.* (2010) quantificaram também algumas variáveis biofísicas (albedo, NDVI e temperatura de superfície -  $T_s$ ) em área de cultivo de algodão irrigado, município Bom Jesus da Lapa, Bahia. Após o processamento digital das imagens a partir o algoritmo SEBAL, os autores verificaram nítida relação das variáveis  $T_s$  e NDVI com o desenvolvimento da cultura. Constataram que os menores valores de albedo (10 a 20%) e  $T_s$  ( $24^\circ\text{C}$ ) e os maiores de NDVI (0,75) ocorreram na fase de máxima cobertura do solo. E obtiveram valores de  $R_n$  variando de  $430 \text{ W m}^{-2}$  a  $700 \text{ W m}^{-2}$  nos pivôs cultivados.

Assim concluíram que a técnica de sensoriamento remoto empregada capturou de forma nítida e confiável a variabilidade temporal e espacial de  $R_n$  e dos parâmetros biofísicos estudados.

Oliveira *et al.* (2012) em pesquisa realizada na área de abrangência da Bacia Hidrográfica do Rio Tapacurá, estado de Pernambuco, avaliaram quantitativamente somente as variáveis biofísicas (albedo, temperatura de superfície e índice de vegetação melhorado – EVI) obtidos por sensoriamento remoto, através do algoritmo SEBAL. Os resultados permitiram concluir que o aumento do albedo e da temperatura da superfície, bem como a redução do índice de vegetação melhorado, observados por meio de sensoriamento remoto orbital, permitiram identificar alterações do uso e ocupação do solo, e que o albedo e o índice de vegetação melhorado identificam mais claramente a variabilidade do uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Tapacurá, PE.

Essa revisão servirá para nortear o presente trabalho, no qual possui suas pesquisas realizadas em áreas ainda não exploradas para a aplicação do algoritmo SEBAL, compreendendo a região do semiárido do Seridó norte-rio-grandense. Portanto os resultados podem ou não apresentar semelhanças com os valores obtidos para as variáveis avaliadas temporal e espacialmente. Contudo, os mesmos serão validados com a aplicação do método padrão da Food Agriculture Organization (FAO), Penman-Monteith.

## CAPÍTULO 1

### Avaliação da variabilidade espaço-temporal das variáveis biofísicas no semiárido do Rio Grande do Norte, Brasil

**RESUMO** – A determinação de parâmetros biofísicos, tais como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e a temperatura de superfície (Ts), são de extrema importância para estudos de mudanças climáticas nos ambientes em geral. Com isso, o objetivo do presente estudo foi analisar a variabilidade espaço-temporal das variáveis biofísicas de NDVI e Ts, utilizando produtos de sensoriamento remoto e procedimentos de algoritmos, em área heterogênea, com predominância de cobertura vegetal de Caatinga, associando as respostas das variações a eventos sazonais de precipitação (P) e temperatura média diária do ar ( $T_{ar}$ ) medidos em estação meteorológica convencional. As variáveis foram estimadas mediante procedimentos algorítmicos utilizando dados orbitais, sendo posteriormente associados à sazonalidade das variáveis medidas em estação meteorológica convencional. Os resultados obtidos mostraram claramente o comportamento da vegetação de Caatinga mediante a distribuição temporal da precipitação pluvial, apresentando resultados de NDVI maiores para os períodos com maior disponibilidade hídrica e de Ts menores para esses mesmos períodos, devido a influência do desenvolvimento de biomassa verde sobre essas duas variáveis. O algoritmo estimou e espacializou com excelência a variabilidade temporal das variáveis biofísicas, necessitando de sensores orbitais com maior resolução espacial para fidelizar melhor a variação espacial das pequenas áreas heterogêneas em estudo.

**Palavras-chave:** Algoritmo. Caatinga. Variáveis biofísicas.

**ABSTRACT** – The determination of biophysical parameters, such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the surface temperature (Ts), are of extreme importance for studies of climate changes in the environment in general. With this, the aim of the present study was to analyze the spatio-temporal variability of the biophysical variables of Ts and NDVI, using remote sensing products and algorithms procedures, in heterogeneous area, with predominance of Caatinga vegetal cover, associating the responses of the seasonal events of precipitation (P) and average daily air temperature ( $T_{ar}$ ) measured in conventional weather station. The variables were estimated by algorithmic procedures using orbital data, being later associated with the seasonality of the variables measured in conventional weather station. The results obtained showed clearly the behavior of Caatinga vegetation upon the temporal distribution of rain precipitation, presenting results of NDVI higher for the periods with higher water availability and of Ts smaller for these same periods, due to influence of green biomass development on these two variables. The algorithm estimated and espacialized with excellence the temporal variability of the biophysical variables, necessitating orbital sensors with higher spatial resolution to retain the spatial variation of the small heterogeneous areas in study.

**Keywords:** Algorithm. Caatinga. Biophysics variables.

## INTRODUÇÃO

O índice de vegetação por diferença normalizada (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). Este índice tem sido amplamente utilizado em várias aplicações operacionais, incluindo mapeamentos de classificação do uso da terra (FECHINE; GALVÍNCIO, 2008), detecção de mudanças e monitoramento ambiental (ARAÚJO *et al.*, 2011), e estudos de evapotranspiração (ARRAES *et al.*, 2012), que incluem o conhecimento do balanço de energia e da temperatura da superfície (Ts), elementos que influenciam diretamente os fenômenos ligados à vegetação e suas condições.

O NDVI e a Ts constituem-se em parâmetros notadamente influenciados por variações no clima em escala local, além das ações antrópicas, e cujas estimativas são de grande utilidade em trabalhos de gestão dos recursos hídricos e monitoramento ambiental.

Segundo Cunha *et al.* (2012), com o monitoramento dos parâmetros biofísicos é possível diagnosticar alterações antrópicas e naturais na paisagem, e orientar o estabelecimento de políticas de reversão de um quadro de degradação ambiental, o que torna esses parâmetros úteis no estabelecimento de uso e ocupação do solo de forma sustentável.

Frente a aplicação na conservação ambiental e nos ecossistemas vulneráveis à degradação, enquadrando dentro desses ambientes a vegetação de Caatinga, que apesar de ser a única grande região natural brasileira cujos limites estão inteiramente restritos ao território nacional, pouca atenção tem sido dada à conservação da variada e marcante paisagem da Caatinga, e a contribuição da sua biota à biodiversidade extremamente alta do Brasil tem sido subestimada (Silva *et al.*, 2004)

Diante disso, constata-se que este estudo é indispensável em área de cobertura vegetal de Caatinga, englobada por um clima semiárido, tendo em vista condições edafoclimáticas desfavoráveis, que combinam alta evapotranspiração, solo desfavorável ao plantio e irregularidade de distribuição espaço-temporal de chuvas, alterando o comportamento dessa vegetação, que necessita usar mecanismos de defesa contra a estiagem, modificando a paisagem drasticamente.

Para Oliveira *et al.* (2012) a quantificação de parâmetros biofísicos de temperatura da superfície e alguns índices de vegetação, por meio de instrumentos convencionais, em escala regional, representaria um grande dispêndio de recursos materiais e humanos. Portanto, recomendam o uso do sensoriamento remoto orbital, que se mostra como uma opção economicamente mais viável em grandes áreas.

Corroborando com tal pressuposto, Silva *et al.* (2010) identificaram alterações climáticas decorrentes de mudanças no uso da terra mediante aplicação dos produtos de sensoriamento remoto para estimativa dos parâmetros biofísicos, nas Bacias do Rio Mogi-Guaçu, SP, e do Baixo Jaguaribe, CE, e verificaram boa concordância entre as imagens obtidas e as medições micro meteorológicas existentes em campo nas áreas do estudo.

Diante do exposto, o objetivo do presente estudo foi analisar a variabilidade espaço-temporal das variáveis biofísicas de NDVI e Ts, em área heterogênea, com predominância de cobertura vegetal de Caatinga, associando as respostas das variações a eventos sazonais de precipitação (P) e temperatura média diária do ar ( $T_{ar}$ ) medidos em estação meteorológica convencional, utilizando produtos de sensoriamento remoto e procedimentos de algoritmos.

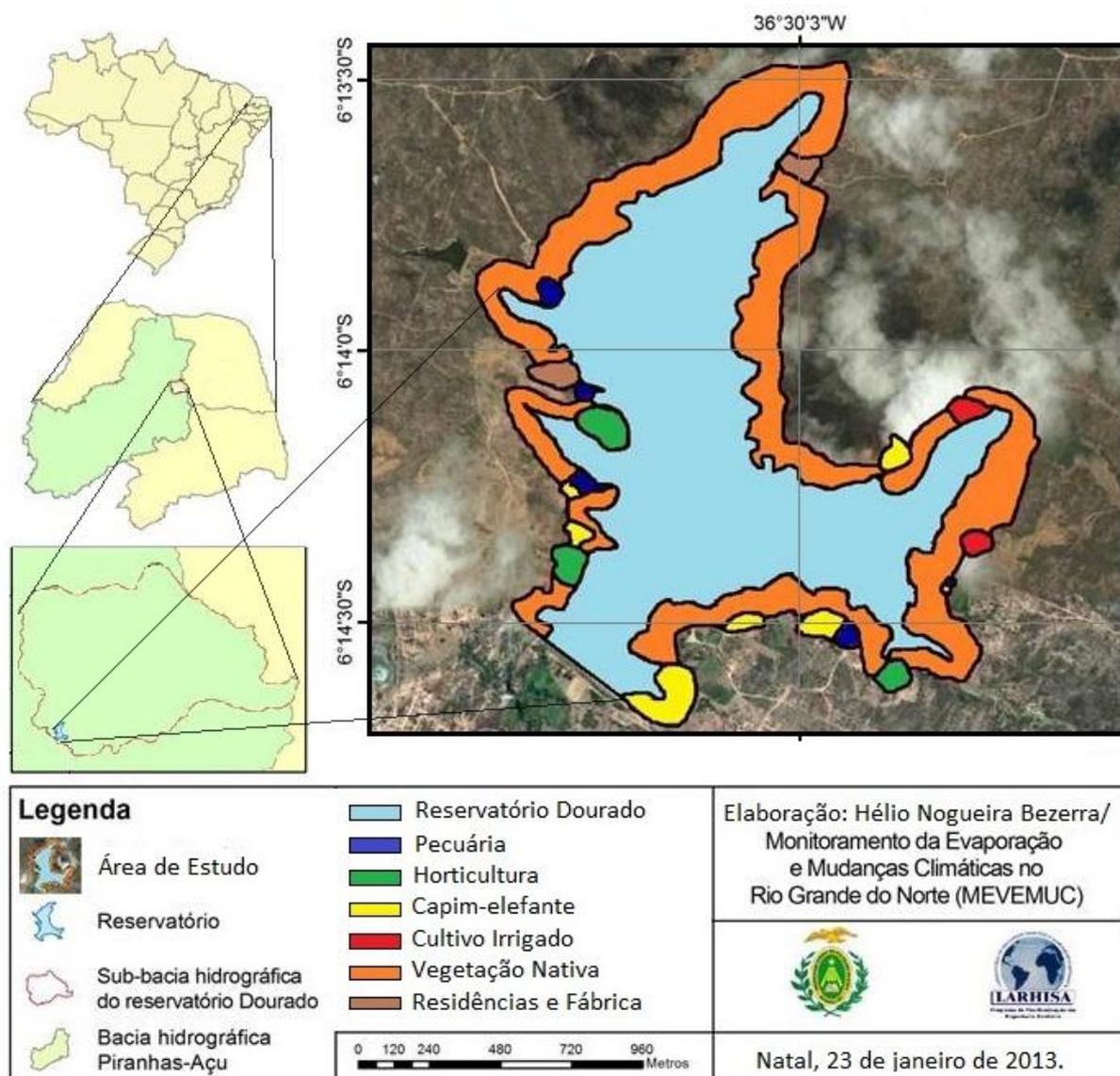
## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Área de estudo**

A área de interesse do estudo compreende o entorno do reservatório Dourado (coordenada geográfica do centroide: 06° 14' 25" S; 36° 30' 15" O), que está situado no município de Currais Novos, região semiárida do estado do Rio Grande do Norte. Essa área é caracterizada pela heterogeneidade no uso e ocupação do solo, que vai desde vegetação nativa até pequenos lotes de pecuária e agricultura.

O reservatório Dourado é fonte de alimentos, através da pesca, e do abastecimento público de água da cidade, além de ser explorado para agricultura irrigada e dessedentação de animais de pequenas propriedades rurais situadas às margens do reservatório. A recreação também constitui outra utilidade dessas águas. A partir da Figura 1 pode-se observar a distribuição espacial das principais atividades e/ou tipos de uso e ocupação das áreas do entorno do reservatório.

**Figura 1:** Mapa de localização da área de estudo com os principais tipos de uso e ocupação do entorno do reservatório Dourado.



A área de estudo está inserida em região semiárida, com precipitação média anual de 476 mm, e com predominância da vegetação Caatinga subdesértica do Seridó, a mais seca do estado, com arbustos e árvores ralas e de xerofitismo mais acentuado. Esse cenário é formado por árvores espalhadas em uma matriz arbustiva, que geralmente é formada pela jurema preta devido ao seu caráter pioneiro. As principais espécies encontradas na região são: pereiro (*Aspidosperma pyrifolium*), faveleiro (*Cnidoscolus phyllacanthus*), facheiro (*Pilosocereus glaucescens*), macambira (*Bromelia laciniosa*), mandacaru (*Cereus jamacaru*),

xique-xique (*Pilosocereus gounellei*) e jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*) (RIO GRANDE DO NORTE, 2008).

Segundo o Plano Nacional de Combate a Desertificação – PNCD, que define desertificação como a degradação da terra nas zonas áridas, semiáridas e sub-úmidas secas, resultantes de fatores diversos tais como as variações climáticas e as atividades humanas, Currais Novos está inserido em área susceptível à desertificação em categoria “muito grave” (RIO GRANDE DO NORTE, 2008), essa situação torna imprescindível a realização de estudos de monitoramento e gestão dos recursos naturais nesse município, a fim de evitar danos, principalmente ao reservatório Dourado, fonte de abastecimento de água e renda na cidade.

No entanto, o processo de degradação que a vegetação seridoense vem sofrendo, destacado por Bezerra Júnior e Silva (2007), revela que mesmo tendo uma predominância de árvores e arbustos baixos, é possível encontrar indícios de que havia uma quantidade maior de árvores altas. Mesmo assim, como a vegetação é diretamente influenciada pelo solo e clima, que varia sazonal e espacialmente, é possível encontrar pontos de predominância arbustiva e outros exclusivamente arbóreos.

O relevo é formado pelo planalto da Borborema, compreendendo terrenos antigos formados no período Pré-Cambriano, constituído basicamente por rochas antigas representadas predominantemente pelas rochas ígneas e metamórficas, denominadas de terrenos cristalinos.

Nesse contexto, o solo é raso e pouco desenvolvido, marcado por afloramentos rochosos e aparecimento de pedregulhos na superfície, caracterizando o neossolo litólico. Esse tipo de solo apresenta drenagem moderada, denotando que a água absorvida é perdida lentamente, porém mantém o solo úmido por um curto período de tempo.

### **Dados meteorológicos e orbitais**

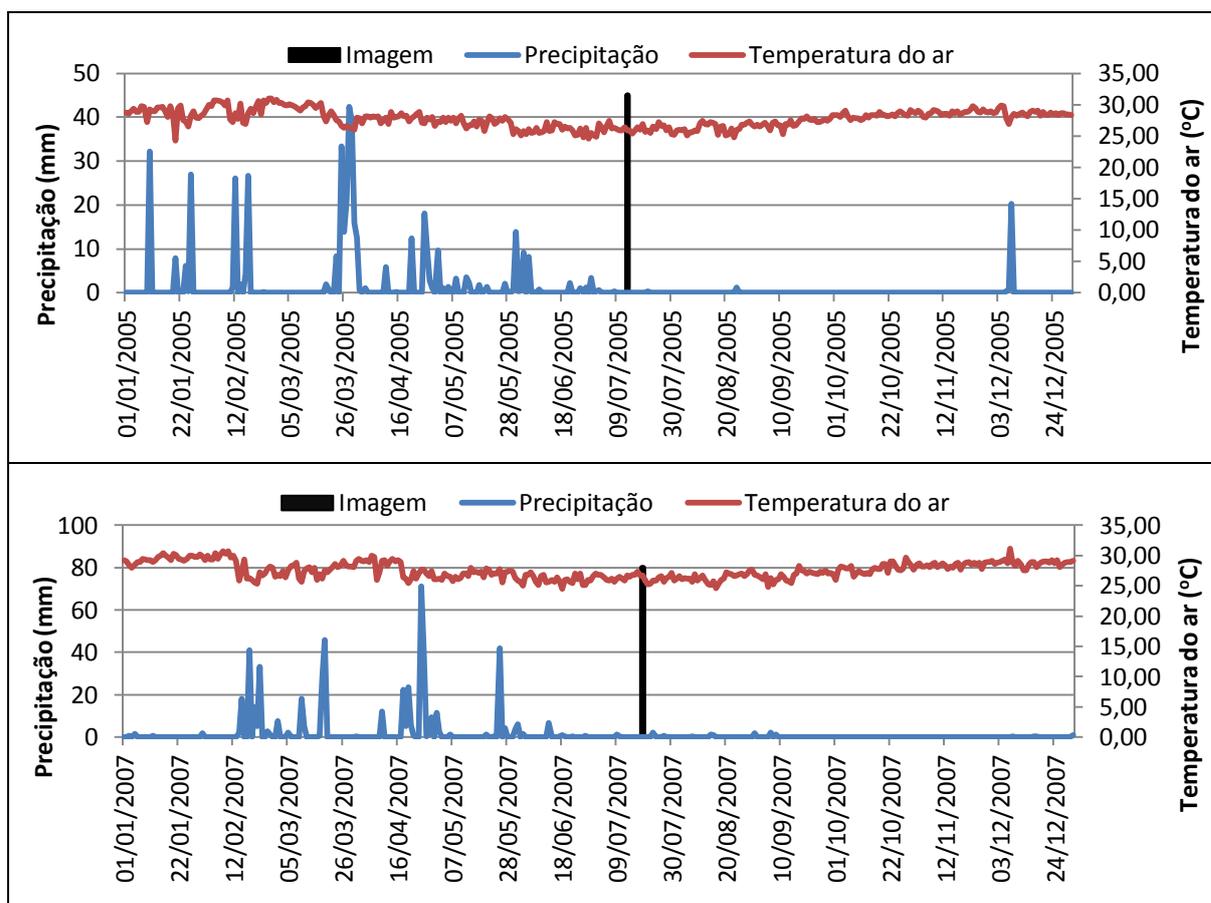
Os valores das variáveis de superfície (temperatura do ar, velocidade do vento, insolação, precipitação e umidade relativa do ar) medidas em campo foram obtidos em estação meteorológica convencional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada na fazenda da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN), situada no município de Cruzeta/RN, que fica a

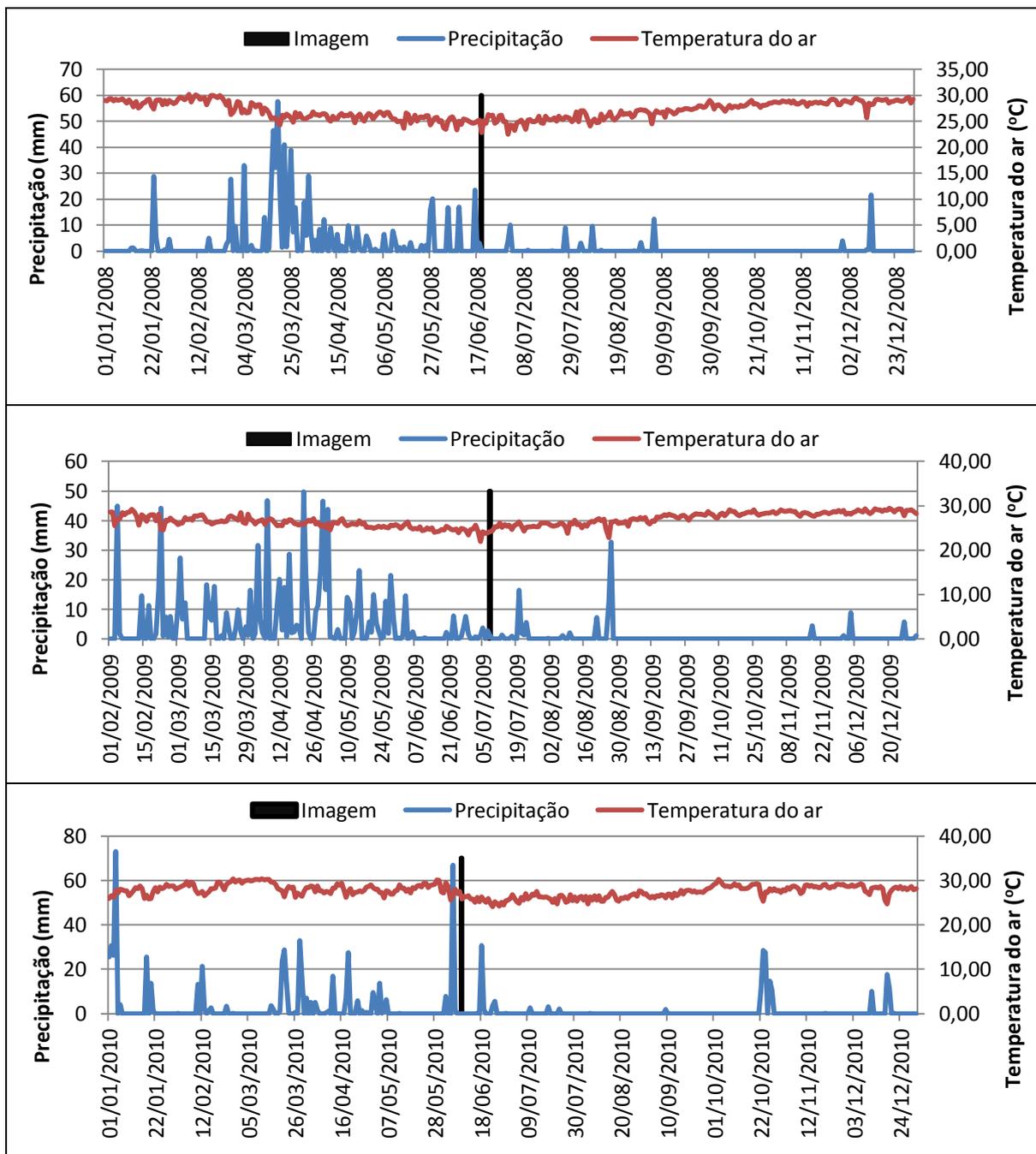
menos de 40 km da área de estudo, por ser a única estação operante nas proximidades da área em estudo.

Utilizou-se das variáveis meteorológicas de precipitação pluvial diária e temperatura média diária do ar, a fim de avaliar a sazonalidade temporal. 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.

Pode-se observar na Figura 2 o gráfico com a variabilidade temporal das variáveis medidas em estação meteorológica convencional para o período considerado, destacando os dias de obtenção das imagens utilizadas na pesquisa. A variabilidade temporal dessas variáveis foi necessária para a avaliação das estimativas das variáveis biofísicas analisadas realizadas pelos processamentos algorítmicos.

**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: Estação Meteorológica do INMET – Cruzeta/RN.

Para o cálculo do NDVI e da Ts foram utilizadas imagens geradas pelo sensor TM (*Thematic Mapper*) do satélite Landsat-5, com cobertura da órbita/ponto 215/64. Na Tabela 1 verifica-se a lista das imagens TM/Landsat-5 selecionadas para o presente estudo, assim como sua respectiva hora de imageamento, dia juliano ou dia sequencial do ano, distância relativa inversa Terra-Sol ( $dr$ ) e ângulo zenital de elevação solar ( $Z$ ).

**Tabela 1:** Dados das imagens do satélite Landsat-5/ sensor *Thematic Mapper* (TM).

Data da imagem	13/07/2005	19/07/2007	19/06/2008	08/07/2009	09/06/2010
Hora (GMT*)	12:22:35	12:28:27	12:22:24	12:23:34	12:25:30
Dia Sequencial	194	200	171	189	160
dr	0,968	0,968	0,968	0,967	0,969
Z (Graus)	48,3959	49,9648	48,1670	48,2933	49,4188

\*GMT: Greenwich Mean Time

### **Cômputo das variáveis biofísicas (NDVI e Ts)**

O processamento das imagens foi executado com o software ERDAS Imagine 9.1, a partir da ferramenta *Model Maker*, que permite a implementação de algoritmos, a partir de modelos alfanuméricos, possibilitando a modelagem dos sistemas matriciais de imagens raster, produzindo mapas com a distribuição espacial das variáveis desejadas.

Antes do processo de tratamento digital de imagens propriamente dito, foi realizado um pré-processamento, que consistiu no empilhamento das sete bandas que compõem as imagens selecionadas. Depois, as imagens empilhadas foram registradas a partir de imagem ortorretificadas disponibilizada no site da NASA (USGS), em seguida recortadas de acordo com os limites da área de interesse do estudo.

Após o pré-processamento das imagens, foi realizada a calibração radiométrica, que gerou a radiância espectral a partir da conversão do número digital (ND) de cada pixel da imagem. Os valores das radiâncias espectrais mínima (a) e máxima (b) utilizadas na calibração radiométrica foram retirados da Tabela 2, proposta por Chander e Markham (2003).

**Tabela 2:** Descrição das bandas do sensor TM do Landsat-5, com os intervalos correspondentes de comprimento de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima – a e máxima – b) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera.

Bandas	Comprimento de Onda ( $\mu\text{m}$ )	Coeficientes de Calibração ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ )		Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera ( $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ )
		a	b	
1 (Azul)	0,45 - 0,52	-1,52	193,0	1957
2 (Verde)	0,52 - 0,60	-2,84	365,0	1826
3 (Vermelho)	0,63 - 0,69	-1,17	264,0	1554
4 (IV - próximo)	0,76 - 0,90	-1,51	221,0	1036
5 (IV - médio)	1,55 - 1,75	-0,37	30,2	215
6 (IV- termal)	10,4 - 12,5	1,2378	15,303	-
7 (IV - médio)	2,08 - 2,35	-0,15	16,5	80,67

De posse das cartas temáticas de radiância espectral de cada banda, informações sobre o cosseno do ângulo zenital do Sol ( $\cos Z$ ) e do fluxo direcional espectral no topo da atmosfera ( $K_{\lambda i}$ ) de cada banda, estimou-se a refletância planetária de cada banda, seguindo com os procedimentos detalhados na Tabela 3 até a estimativa das variáveis biofísicas (NDVI, SAVI, IAF e temperatura de superfície).

**Tabela 3:** Etapas do processamento das variáveis biofísicas.

Etapa 1 - Calibração Radiométrica		
$L_{\lambda i} = a_i + \left( \frac{b_i - a_i}{255} \right) ND$		$a$ e $b$ são as radiâncias espectrais mínimas e máximas ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ); $ND$ é a intensidade do pixel (número digital – número inteiro de 0 a 255); $i$ são as bandas (1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) do sensor TM / Landsat 5.
Etapa 2 - Reflectância Planetária		
$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{k_{\lambda i} \cdot \cos Z \cdot d_r}$		$L_{\lambda i}$ é a radiância espectral de cada banda; $k_{\lambda i}$ é a irradiância solar espectral no topo da atmosfera ( $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ ); $Z$ é o ângulo zenital solar e $d_r$ a razão entre a distância média Terra-Sol dada por $d=1+0,033 \cdot \cos(DSA \cdot 2\pi/365)$ , onde $DSA$ é o Dia Sequencial do ano.
Etapa 3 - Índices de Vegetação		
<b>NDVI</b>	$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V}$	$\rho_{IV}$ , $\rho_V$ correspondem, respectivamente, as bandas 4 e 3 do sensor TM / Landsat 5.
<b>SAVI</b>	$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)}$	$L$ é uma variável de valor 0,25 (usado para vegetação densa), 0,5 (usado para vegetação intermediária) e 1,0 (usado para pouca vegetação). O valor usado no estudo para essa variável foi 1,0.
<b>IAF</b>	$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91}$	

<b>Etapa 4 - Emissividade</b>	
$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033.IAF$ $\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01.IAF$	Para pixels com $IAF \geq 3$ , $\varepsilon_{NB} = \varepsilon_0 = 0,98$ e para corpos de água ( $NDVI < 0$ ) $\varepsilon_{NB} = 0,99$ e $\varepsilon_0 = 0,985$ , conforme recomendações de Allen <i>et al.</i> (2002).
<b>Etapa 5 - Temperatura da Superfície</b>	
$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)}$	$K1 = 607,76 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ e $K2 = 1260,56 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ são as constantes de calibração da banda termal do sensor TM / Landsat 5. A radiância espectral da banda termal $L_{\lambda,6}$ e a emissividade $\varepsilon_{NB}$ .

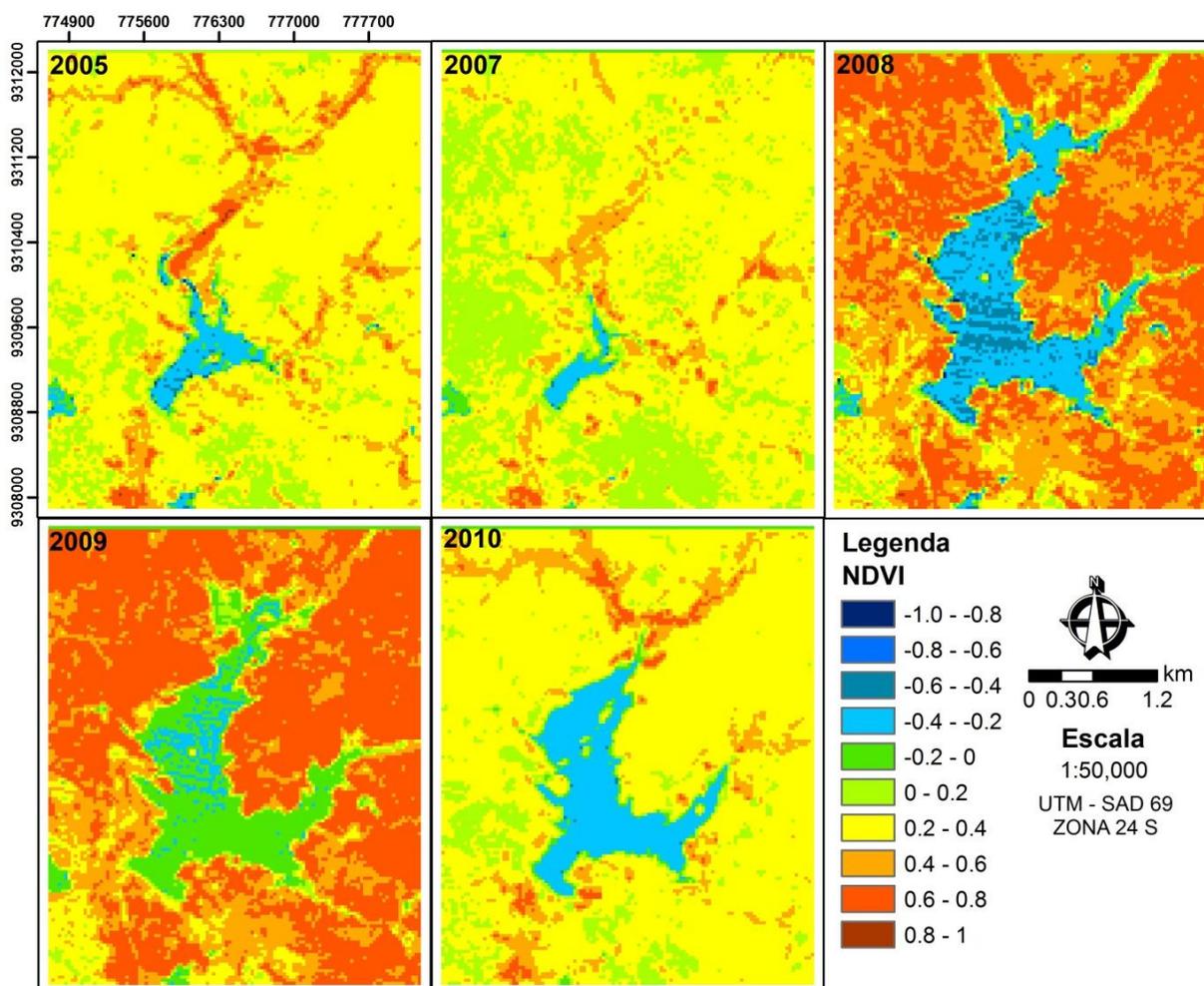
Após a implementação dos procedimentos do algoritmo SEBAL e a elaboração dos mapas das variáveis biofísicas (NDVI e  $T_s$ ), os valores de cada pixel foram exportados para planilhas do EXCEL para realizar a estatística descritiva, a fim de detectar as características tendenciais de posição e de dispersão dos dados obtidos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação do algoritmo para a obtenção das variáveis biofísicas a partir de produtos orbitais de sensoriamento remoto possibilitou boa representação de sua variabilidade espacial, permitindo a demonstração das respostas espectrais dos diversos usos do solo, como pontos de acúmulo de água (reservatório), solo exposto e vegetação densa ou rala, juntamente com o conhecimento do local a partir do mapa de uso e ocupação do solo, imprescindível para essa avaliação.

Como as imagens selecionadas se apresentaram em sequência cronológica, (ver Figura 3), foi possível analisar também a variabilidade temporal, sendo viável a aplicação desse método para a avaliação sazonal das regiões de alta heterogeneidade de uso e ocupação do solo e de clima semiárido, com grande variação na disponibilidade hídrica, que causa a alteração da cobertura do solo.

**Figura 3:** Distribuição espaço temporal do NDVI para a área de estudo (Currais Novos/RN).



Observam-se claramente diferenças de valores entre as imagens 2008 ou 2009 e as demais, pois as primeiras ocorreram em período com maior disponibilidade hídrica devido aos maiores volumes de precipitação, obtendo-se assim, valores maiores de NDVI, resposta da vegetação de Caatinga à presença de água disponível para o desenvolvimento de sua biomassa verde. Já nos demais anos, que se inseriram em período de estiagem, os valores de NDVI reduziram, causa da redução drástica nas folhagens da vegetação devido ao mecanismo fisiológico de defesa da Caatinga e a maior exposição do solo à radiação solar global.

Com relação a variação temporal, os valores obtidos de NDVI foram coerentes com a sazonalidade dos dados de precipitação e temperatura do ar medidos em estação meteorológica convencional, ratificando a aplicabilidade do

método em regiões semiáridas. Nos anos de 2005 e 2007, por passar por um período de estiagem, com índices pluviométricos baixos, os valores de NDVI foram menores (entre 0 e 0,4), nos anos de 2008 e 2009, com maior disponibilidade hídrica e precipitação pluvial anual acima da média, os valores obtidos para NDVI foram maiores (entre 0,4 e 0,8), e no ano de 2010, apesar do reservatório ainda se encontrar bem abastecido, a precipitação anual foi muito aquém da média, e por isso apresentou baixos valores de NDVI (entre 0 e 0,4).

Nas imagens de 2005, 2007 e 2010, compreendendo períodos secos, os valores de NDVI acima de 0,4 foram referentes à mata ciliar, vegetação situada nas margens dos rios, que aproveita as águas disponíveis para suprir suas necessidades fisiológicas, e aos cultivos irrigados (capim elefante, horta e frutíferas), que apesar do baixo volume do reservatório (2005 e 2007), os produtores não cessam a irrigação.

Nas imagens de 2008 e 2009 os valores de NDVI acima de 0,4 representaram o comportamento da vegetação de Caatinga para períodos chuvosos, quando as plantas formam suas folhas (área verde) para realizar a fotossíntese mediante a absorção da radiação proveniente do sol juntamente com a água disponível no solo.

Arraes *et al.* (2012), Gurgel *et al.* (2003) e Barbosa *et al.* (2006) constaram alta variabilidade do NDVI em área de vegetação nativa de Caatinga, confirmando a relação direta que essa variável tem com a disponibilidade hídrica no solo para as plantas, e certificando a variabilidade sazonal encontrada nesse estudo, assim como os valores encontrados para esse tipo de vegetação, variando de 0,25 a 0,8.

Na Tabela 4, verificam-se os valores de tendência central e de dispersão dos dados de NDVI, confirmando os resultados da variabilidade espacial e temporal expostas nos mapas da Figura 3, mostrando que as imagens de 2008 e 2009 apresentaram tendências centrais maiores em relação as demais, assim como os valores de variância e desvio padrão.

No entanto apenas a imagem de 2008 (entre as duas discutidas) apresentou alto coeficiente de variação mostrando que apesar da dispersão em relação a média ter sido alta a maior parte dos dados se concentram dentro do desvio. Isso se deve ao fato da vegetação ter se apresentado mais vigorosa nesse período, aumentando os valores de NDVI da vegetação de Caatinga e ampliando, conseqüentemente, a distribuição da frequência desses valores em outras classes de resultados.

**Tabela 4:** Valores estatísticos descritivos aplicados sobre os dados exportados das imagens de NDVI.

<b>Imagem</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Med.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Var.</b>	<b>DP</b>	<b>CV</b>
2005	16588	0,278	0,269	-0,961	0,813	0,025	0,159	57,040
2007	16588	0,246	0,231	-0,500	0,782	0,013	0,112	45,606
2008	16588	0,406	0,558	-1,000	0,832	0,126	0,355	87,414
2009	16588	0,480	0,609	-0,391	0,788	0,080	0,283	59,037
2010	16588	0,234	0,262	-0,462	0,775	0,040	0,201	86,131

Nota: **N** é o Número de pixels; **Med.** é a Mediana; **Mín.** é o valor Mínimo; **Máx.** é o valor Máximo; **Var.** é a Variância; **DP** é o Desvio Padrão; e **CV** é o Coeficiente de Variação (%).

Os dados estatísticos possibilitaram ainda constatar que a imagem de 2010 apresentou alta concentração de dados dentro do desvio padrão sobre a média, fato que denota baixa variabilidade espacial. Enquanto, as imagens de 2005 e 2007 observou-se baixa variância e desvio padrão sobre a média, além de um coeficiente de variação baixo, o que afirma um comportamento de baixa heterogeneidade espacial com relação aos valores de NDVI.

Assim como o NDVI, a Ts pode ser utilizada como indicador de mudanças da superfície do solo, proporcionando respostas espectrais as quais podem ser utilizadas para diversos fins, tais como: monitoramento ambiental com a identificação da evolução de áreas de solo exposto; uso agrícola, subsidiando o planejamento de áreas irrigadas; hidrologia fornecendo informações no manejo da água, e etc.

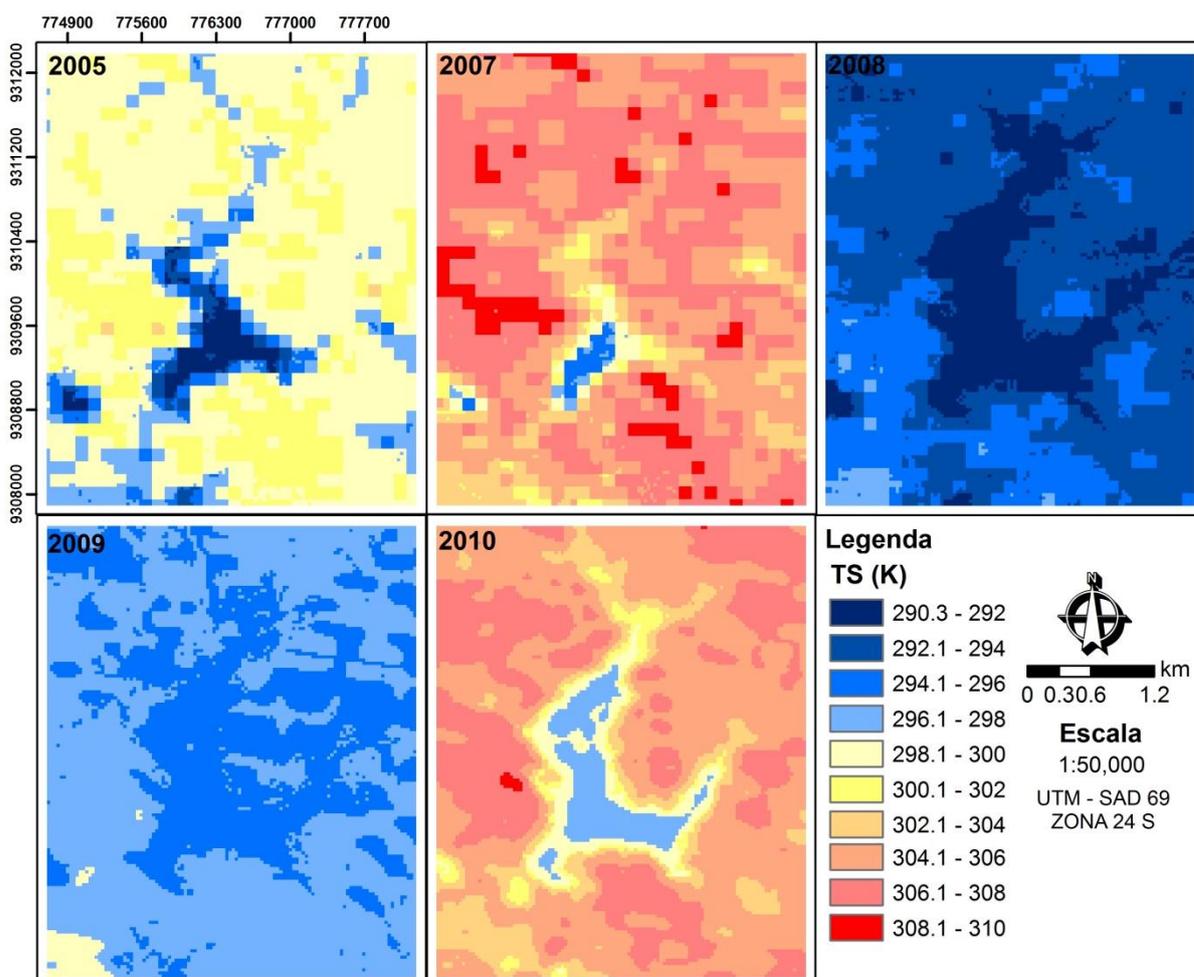
Os valores de Ts encontrados neste trabalho corroboraram com os valores de NDVI, mostrando serem duas variáveis diretamente relacionadas, já que quando houve grande presença de vegetação (NDVI próximo a 1) a temperatura da superfície diminuiu para áreas da superfície terrestre, devido a questão da absorção de calor (advindo da radiação solar) pelas plantas ser menor em relação ao solo exposto ou com afloramento rochoso. Esse comportamento, inversamente proporcional, entre as duas variáveis foi observado quando o NDVI possui valores positivos (de 0 a 1).

Essas duas variáveis biofísicas apresentaram comportamento diretamente proporcional quando o NDVI assumiu valores negativos (de -1 a 0), pois quanto menor o valor de NDVI menor o valor da temperatura de superfície. Esse caso ocorre para os pixels que compreendem o reservatório, que apresentaram valores

menores de temperatura de superfície, devido a lâmina d'água refletir mais do que absorve a radiação proveniente do sol.

Verifica-se na Figura 4 a distribuição espacial da temperatura de superfície. Conforme os mapas temáticos, os menores valores foram observados para os anos de 2008 e 2009 (variando de 290,3 a 298 K), devido ao alto índice pluviométrico e conseqüentemente ao desenvolvimento da vegetação de Caatinga, que ameniza as condições térmicas da superfície terrestre. Nas imagens de 2007 e 2010 os valores de Ts foram maiores (variando de 302,1 a 310 K) devido à baixa cobertura do solo e ao baixo índice pluviométrico, causado pela perda do dossel da vegetação de Caatinga como mecanismo fisiológico de defesa contra o período de seca.

**Figura 4:** Variabilidade espacial e temporal da temperatura de superfície para o entorno do reservatório Dourado (Currais Novos/RN).



Na imagem de 2005 os valores de Ts apresentaram uma tendência média, ou seja, apresentou resultados intermediários, com valores variando de 298,1 a 302 K, já que nesse ano as precipitações foram próximas a média anual da região (480 mm), mostrando uma variabilidade da variável biofísica em torno da média para o referido ano. No entanto, observam-se valores menores de Ts para alguns pixels isolados que não são referentes ao reservatório Dourado, esses resultados estão associados à hidrografia da área de estudo, representando os rios afluentes do reservatório.

Podem-se constatar na Tabela 5 os valores da estatística descritiva aplicada aos valores extraídos dos pixels das imagens processadas de Ts (Figura 5). Os dados confirmam a tendência das imagens de 2007 e 2010 apresentarem maiores valores de Ts, possuindo desvios padrão de 2,16 e 2,57, e variância de 4,65 e 6,62, respectivamente, o que significa que os valores de Ts se dispersam em relação a média, se aproximando do máximo obtido, devido aos altos valores observados nos mapas da Figura 4, e sabendo que os baixos valores são correspondentes à lâmina de água do reservatório Dourado.

**Tabela 5:** Valores estatísticos descritivos aplicados sobre os dados exportados das imagens de Ts.

<b>Imagem</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Med.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Var</b>	<b>DP</b>	<b>CV</b>
2005	16588	298,85	299,35	289,70	302,14	4,37	2,09	0,70
2007	16588	305,59	305,91	294,22	309,59	4,65	2,16	0,71
2008	16588	293,02	293,02	290,16	296,95	1,93	1,39	0,47
2009	16588	296,10	296,13	294,22	299,14	0,65	0,80	0,27
2010	16588	304,49	305,44	296,86	308,77	6,62	2,57	0,85

Nota: **N** é o Número de pixels; **Med.** é a Mediana (K); **Mín.** é o valor Mínimo (K); **Máx.** é o valor Máximo (K); **Var.** é a Variância; **DP** é o Desvio Padrão; e **CV** é o Coeficiente de Variação (%).

Os valores estatísticos para o ano de 2009 mostram temperaturas baixas e uma tendência central maior devido aos valores de dispersão (variância, desvio padrão e coeficiente de variação) serem baixos, o que é explicado pelo fato do ano apresentar precipitação acumulada de 1170 mm e o ano antecedente de 996 mm, muito acima da média, provocando um adensamento da vegetação de Caatinga e acúmulo de água no solo, que apesar de ser raso, foi contemplado com chuva de 1,2 mm no período do imageamento, fato que interfere as condições atmosféricas, promovendo o adensamento da mesma, reduzindo a temperatura de superfície

devido a redução que essas condições causa na incidência da radiação solar global. Outro fator que influenciou na baixa dispersão dos valores dos pixels da imagem de 2009 foi a temperatura da superfície ter baixa variação em relação à temperatura da lâmina d'água, que atingiu uma média de 22,8 °C.

Silva *et al.* (2011) encontraram valores de Ts variando entre 300 e 306 K para áreas de solo exposto e de cobertura vegetal de Caatinga, resultados que concordaram com os valores obtidos neste estudo. Os referidos autores evidenciaram que as áreas irrigadas apresentaram Ts inferiores devido a maior disponibilidade de água no solo nessas áreas. Essa afirmativa pode ser confirmada pelas imagens 2008 e 2009, que nesse caso apresentaram maior disponibilidade de água no solo devido às precipitações nesse período.

## CONCLUSÕES

As variáveis biofísicas, NDVI e Ts, apresentaram variabilidade temporal relacionada aos eventos sazonais de precipitação e temperatura do ar (medidos em estação meteorológica convencional), mesmo em área de entorno do reservatório.

Para a área em estudo, o comportamento espectral dos pixels das áreas heterogêneas (atividades agropecuárias) não favoreceu uma clara percepção da variabilidade espacial e temporal das variáveis biofísicas nesses pontos, por apresentarem áreas espacialmente pequenas em relação ao tamanho do pixel da imagem TM/Landsat-5.

O método utilizado para determinação das variáveis biofísicas em regiões semiáridas com grande heterogeneidade e pequenas áreas é mais eficiente com o uso de dados radiométricos de sensores de alta resolução espacial.

A aplicação do modelo apresentou-se como excelente ferramenta para o monitoramento da disponibilidade hídrica dos reservatórios, para o auxílio no manejo das terras cultivadas e de vegetação nativa, e para o planejamento e a gestão ambiental, principalmente em casos onde haja necessidade de aplicação de técnicas de recuperação de áreas nativas degradadas, possibilitando também a delimitação de áreas de preservação ambiental.

## REFERÊNCIAS

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.

ARAUJO, I.R. de; SILVA, H.P. da; LOPES, A. da S.; ALENCAR, B.P.B. de; SILVA, H.D.B. da. Cálculo de NDVI no suporte ao estudo de desertificação no município de Orocó – PE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3., 2010, Recife. **Anais...** Recife, 2011. p. 01-06.

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

BARBOSA, H. A.; HUETI, A. R.; BAETHGEN, W. E. A 20 year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 67, n. 2, p. 288-307, 2006.

BEZERRA JÚNIOR, J.G.O.; SILVA, N.M. da. Caracterização geoambiental da microrregião do seridó oriental do Rio Grande do Norte. **Holos**, ano 23, v.2, 2007.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and post calibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 41, n. 11, p. 2674-2677. 2003.

CUNHA, J.E. de B.L.; RUFINO, I.A.A.; SILVA, B.B. da; CHAVES, I. de B. Dinâmica da cobertura vegetal para a Bacia de São João do Rio do Peixe, PB, utilizando-se sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.539-548, 2012.

FECHINE, J.A.L.; GALVÍNCIO, D.J. Índice de vegetação por diferença normalizada das cidades de Salgueiro, Mirandiba, Carnaubeira da Penha e Floresta – localizadas no semiárido pernambucano. **Revista Geográfica Acadêmica**, v.2, n.3, p. 60-67, 2008

GURGEL, H. C.; FERREIRA, N. J.; LUIZ, A. J. B. Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil utilizando-se a análise de agrupamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 85-90, 2003.

OLIVEIRA, L.M.M. de.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ANTONINO, A.C.D.; SILVA, B.B. da.; MACHADO, C.C.C.; GALVÍNIO, J.D. Análise quantitativa de parâmetros biofísicos de bacia hidrográfica obtidos por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.9, p.1209-1217, set. 2012.

RIO GRANDE DO NORTE. INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE DO RIO GRANDE DO NORTE. **Perfil de seu município – Currais Novos**. Natal, RN, v. 10, p. 1-23, 2008. Disponível em: < [http://www.idema.rn.gov.br/contentproducao/aplicacao/idema/socio\\_economicos/arquivos/Perfil%202008/Currais%20Novos.pdf](http://www.idema.rn.gov.br/contentproducao/aplicacao/idema/socio_economicos/arquivos/Perfil%202008/Currais%20Novos.pdf) >. Acesso em: 21 jan. 2013.

SILVA, J.M.C.; TABARELLI, M.; FONSECA, M.T.; LINS, L.V. **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília. 2004.

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, B.B. da; SILVA, S.T.A. da; GOMES, H.B. Alterações climáticas decorrentes de mudanças no uso da terra mediante sensoriamento remoto. **Mercator**, v.9, p.91-106, 2010.

SILVA, B.B. da; BRAGA, A.C.; BRAGA, C.C. Balanço de radiação no perímetro irrigado São Gonçalo – PB mediante imagens orbitais. **Revista Caatinga**, Mossoro, v. 24, n. 3, p. 145-152, jul.-set., 2011.

## CAPÍTULO 2

### Avaliação espaço-temporal do saldo de radiação para área heterogênea em região semiárida

**RESUMO** – O conhecimento do saldo de radiação em regiões semiáridas é imprescindível para o manejo e monitoramento dos recursos hídricos, já que a energia disponível à superfície para os processos de aquecimento do ar e do solo, fotossíntese e evaporação da água advém do saldo entre as trocas radiativas de onda curta e onda longa. Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a evolução espaço-temporal do saldo de radiação ( $R_n$ ) instantâneo e diário em área de uso e ocupação heterogênea, com predominância de cobertura vegetal de Caatinga, em região semiárida, a partir de produtos de sensoriamento remoto associados a dados meteorológicos. O saldo de radiação foi determinado pelo processamento de imagens TM/Landsat-5, ponto/órbita 215/64, pelo *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), sendo avaliadas cinco cenas, durante os anos de 2005 à 2010. Foram realizadas análises estatísticas para auxiliar na avaliação do balanço de radiação instantâneo e diário, e análise comparativa dos erros absolutos para validar as estimativas do SEBAL diante das estimativas por Penman-Monteith, aplicadas aos dados medidos em estação meteorológica convencional. Os resultados obtidos em mapas temáticos mostraram que tanto o saldo de radiação instantâneo ( $R_n$ ) como o diário ( $R_{n_{24h}}$ ) sofreram influência da precipitação em sua variação sazonal para a região (semiárida), provocado pela disponibilidade de água no solo e pelo desenvolvimento da vegetação de Caatinga para essas condições. E com relação a variabilidade espacial, o  $R_n$  e do  $R_{n_{24h}}$ , para as cinco imagens, apresentaram padrão similar, causado pela pequena dimensão das diversas atividades, que sofreram influência do seu entorno, área de vegetação nativa (Caatinga). No entanto, as estimativas pelo SEBAL atingiram valores válidos diante da análise comparativa realizada com os dados de estação meteorológica convencional.

**Palavras-chave:** Agrometeorologia. Balanço de radiação. Semiárido.

**ABSTRACT** – The knowledge of the radiation balance in semi-arid regions is essential for the management and monitoring of water resources, since the energy available to the surface for air and soil heating processes, photosynthesis and water evaporation comes from the balance between radiative exchanges of short wave and long wave. In this context, the present study aims to assess the spatio-temporal evolution of the instantaneous and daily radiation balance ( $R_n$ ) in area of use and occupation heterogeneous, with predominance of Caatinga vegetal cover, in semiarid region, from remote sensing products associated with weather data. The radiation balance was determined by processing of the images TMLandsat-5, point/orbit, 215/64, by Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), being assessed five scenes, during the years 2005 to 2010. Statistical analyses were carried out to assist in the evaluation of the instantaneous and daily radiation balance, and comparative analysis of absolute errors to validate the estimates of SEBAL on estimates by Penman-Monteith, applied for the data measured in conventional weather station. The results obtained in thematic maps showed that both the instantaneous radiation

balance ( $R_n$ ) as the daily ( $R_{n_{24h}}$ ) suffered influence of precipitation in its seasonal variation for the region (semiarid), caused by the availability of water in the soil and by the Caatinga vegetation development for these conditions. And with respect to spatial variability, the  $R_n$  and  $R_{n_{24h}}$ , for the five images, showed similar pattern, caused by the small size of the various activities, which suffered influence of his surroundings, the area of native vegetation (Caatinga). However, estimates by SEBAL attained valid values face of the comparative analysis realized with conventional weather station data.

**Keywords:** Agrometeorology. Radiation balance. Semiarid.

## INTRODUÇÃO

A energia proveniente do sol é o fator mais importante no desenvolvimento dos processos físicos que influenciam as condições de tempo e clima na Terra. Essa energia é a diferença entre os fluxos totais da radiação incidente e a “perdida” (emitida e/ou refletida) por uma superfície, medida, normalmente, em plano horizontal.

Ao longo do dia, nas horas de brilho solar, o saldo de radiação em uma superfície qualquer tende a ser positivo, pois os fluxos incidentes (global e atmosférico) são superiores às frações refletidas e emitidas. Por outro lado, durante a noite, é comum que esses valores sejam negativos, pois o fluxo incidente passa a ser apenas atmosférico e a energia emitida pela superfície, superior a este, resultando em um saldo negativo de radiação (PEZZOPANE *et al.*, 1995).

O saldo de radiação ( $R_n$ ), representa a energia disponível aos processos físicos e biológicos que ocorrem na superfície terrestre, sendo definido como o balanço de radiação de todos os fluxos radiativos que chegam e saem de uma superfície (KLEIN, 1977; WELIGEPOLAGE, 2005).

Em regiões áridas e semiáridas o conhecimento deste tipo de informação é necessário de forma confiável para o plano de distribuição de água, já que a energia disponível à superfície para os processos de aquecimento do ar e do solo, fotossíntese e evaporação da água advém do saldo das trocas radiativas de onda curta e de onda longa.

A disponibilidade de radiação solar global, e, por conseguinte, do saldo de radiação, tem aplicações em vários campos de estudo, a exemplo nas atividades

agropecuárias (CARGNELUTTI FILHO *et al.*, 2007), na hidrologia e na produtividade primária de comunidades vegetais. No manejo da água de irrigação, o saldo de radiação à superfície é um dos elementos mais relevantes no cálculo da demanda hídrica das culturas (ALLEN *et al.*, 1998).

Silva *et al.* (2005) relatam que o saldo de radiação é uma informação de suma importância, visto que, é a variável básica na estimativa da evapotranspiração (ET) e no cálculo do balanço hídrico, que são essenciais para a utilização racional dos recursos hídricos e do uso e ocupação do solo de forma sustentável.

Para a estimativa de fluxos radiativos e não radiativos à superfície, uma das alternativas que tem se destacado é o uso do sensoriamento remoto (BASTIAANSSEN, 2000). Sendo que uma de suas maiores vantagens é permitir a determinação de forma direta de parâmetros biofísicos e componentes do balanço de radiação, necessitando de poucos dados de superfície (BASTIAANSSEN *et al.*, 2005).

As técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento propiciam maior frequência de atualização dos dados, agilidade no processamento destes, sendo limitado pela resolução temporal dos satélites ou sistemas de imageamento, além de serem economicamente viáveis (MENEZES *et al.*, 2009).

Dentro dessas técnicas, o Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) vem apresentando bastante eficiência na estimativa do saldo de radiação a partir de seus modelos. Para comprovar essa hipótese no semiárido, Teixeira *et al.* (2011), aplicaram o SEBAL em áreas irrigadas de videira, Petrolina/PE, e concluíram que os modelos baseados em parâmetros obtidos por sensoriamento remoto e dados agro meteorológicos permitem boa determinação dos componentes dos balanços de radiação à superfície.

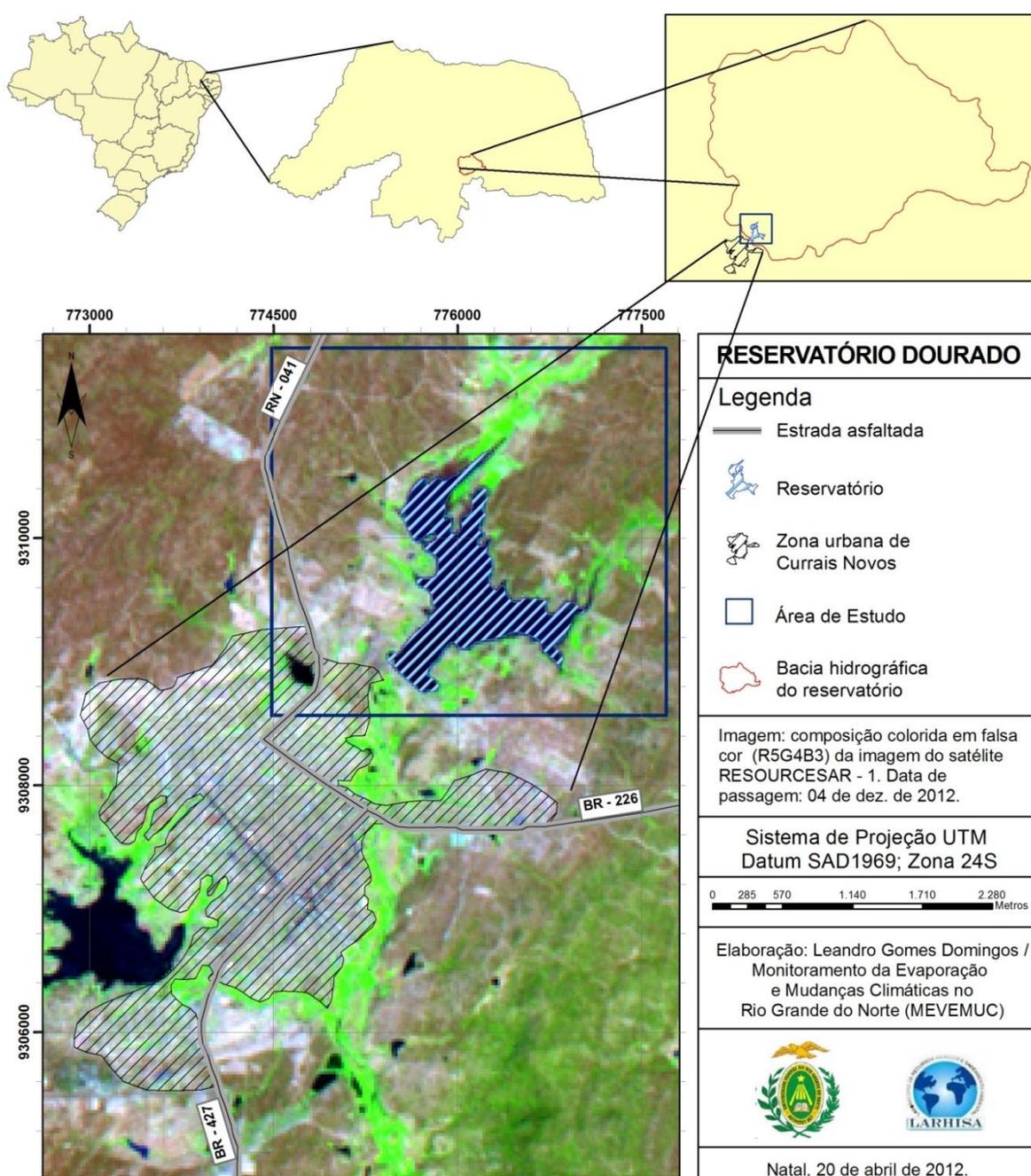
Nesse contexto, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar a evolução espaço-temporal do saldo de radiação ( $R_n$ ) instantâneo e diário em área de uso e ocupação heterogênea, com predominância de cobertura vegetal de Caatinga, em região semiárida, a partir de produtos de sensoriamento remoto associados a dados meteorológicos.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

Compreende a região do entorno do reservatório Dourado, situado no município de Currais Novos, Seridó potiguar, mesorregião central do estado do Rio Grande do Norte (Figura 5).

**Figura 5:** Mapa de Currais Novos-RN com indicação da área de estudo.



A área de interesse do estudo é bastante heterogênea, composta por diversos lotes de terra, utilizados principalmente para agricultura de subsistência, com cultivos de acerola, hortaliças, leguminosas e capim elefante, utilizado na alimentação dos animais. O cultivo de sequeiro e de espécies de ciclo curto na região é o responsável pelas modificações no uso e ocupação do solo, em consequência das alterações climáticas e da disponibilidade hídrica.

A região caracteriza-se por apresentar um regime de escassez e desigual distribuição de chuvas, com média pluviométrica de 476 mm.ano<sup>-1</sup> e período chuvoso compreendido entre os meses de fevereiro e junho. Essas chuvas, segundo Bezerra Júnior e Silva (2007), geram um excedente inferior a 40 mm de água durante o ano inteiro, e abrange 57% do Estado, percorrendo o interior até o litoral setentrional.

A área possui clima muito quente e semiárido, com insolação média anual de 2400 horas, umidade relativa média anual de 64% e temperatura média de 27,5 °C, com mínima de 18°C e máxima de 33°C (RIO GRANDE DO NORTE, 2008).

### **Dados meteorológicos e orbitais**

Os valores das variáveis (temperatura do ar, velocidade do vento, insolação, precipitação e umidade relativa do ar) foram observados para o período de 01 de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2010, assim como uma série histórica de precipitação pluvial para compreender melhor a sazonalidade das chuvas na região. Os dados foram fornecidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN), disponibilizando as medições de campo feitas em estação meteorológica convencional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), situada no município de Cruzeta/RN, que localiza-se a pouco menos de 40 km da área de estudo.

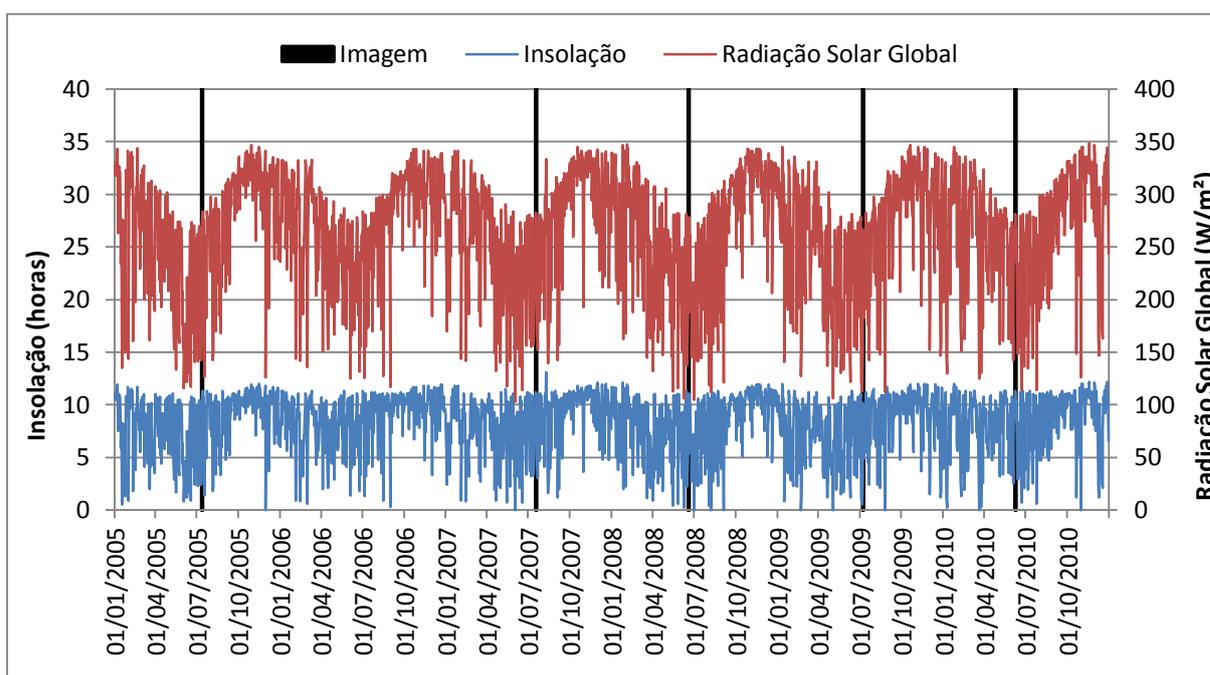
Como a estação meteorológica, de onde foram retirados os dados, não dispõe de radiômetros, apenas de heliógrafo, então foram disponibilizados apenas os valores de insolação, que foram convertidos para radiação solar global, em W.m<sup>-2</sup>, através da fórmula proposta por Angstron (1924):

$$R_G = R_0 \cdot \left[ a + b \cdot \frac{n}{N} \right] \quad (2)$$

em que:  $R_G$  é a radiação solar global ( $Wm^{-2}$ );  $R_0$  é a radiação no topo da atmosfera ( $Wm^{-2}$ ); “a” é o coeficiente linear da reta de regressão (obtido através da fórmula  $a = 0,29 \cdot \cos(Latitude)$ ); “b” é o coeficiente angular da reta de regressão (foi adotado o valor de 0,52); “n” é a insolação real medida em campo (horas); e “N” é a duração máxima do brilho solar.

Os valores da radiação solar no topo da atmosfera e da duração máxima do brilho solar foram retirados de tabelas propostas por Villela e Mattos (1975). A variação dos valores medidos e calculados da insolação e da radiação solar global, respectivamente, está exposta no gráfico da Figura 6.

**Figura 6:** Variação da insolação e da radiação solar global durante o período de estudo e posicionamento das imagens selecionadas para aplicação no SEBAL.



Fonte: Estação Meteorológica da EMPARN – Cruzeta/RN.

O cálculo do  $R_n$  foi feito para cinco imagens do Mapeador Temático Landsat 5, ponto/órbita 215/64, datadas em: 13 de julho de 2005, 19 de julho de 2007, 19 de junho de 2008, 08 de julho de 2009 e 09 de junho de 2010, adquiridas no catálogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e no site do United

States Geological Survey (USGS), em formato geotiff com projeção/datum UTM/SAD-69.

### **Cálculo do Saldo de Radiação**

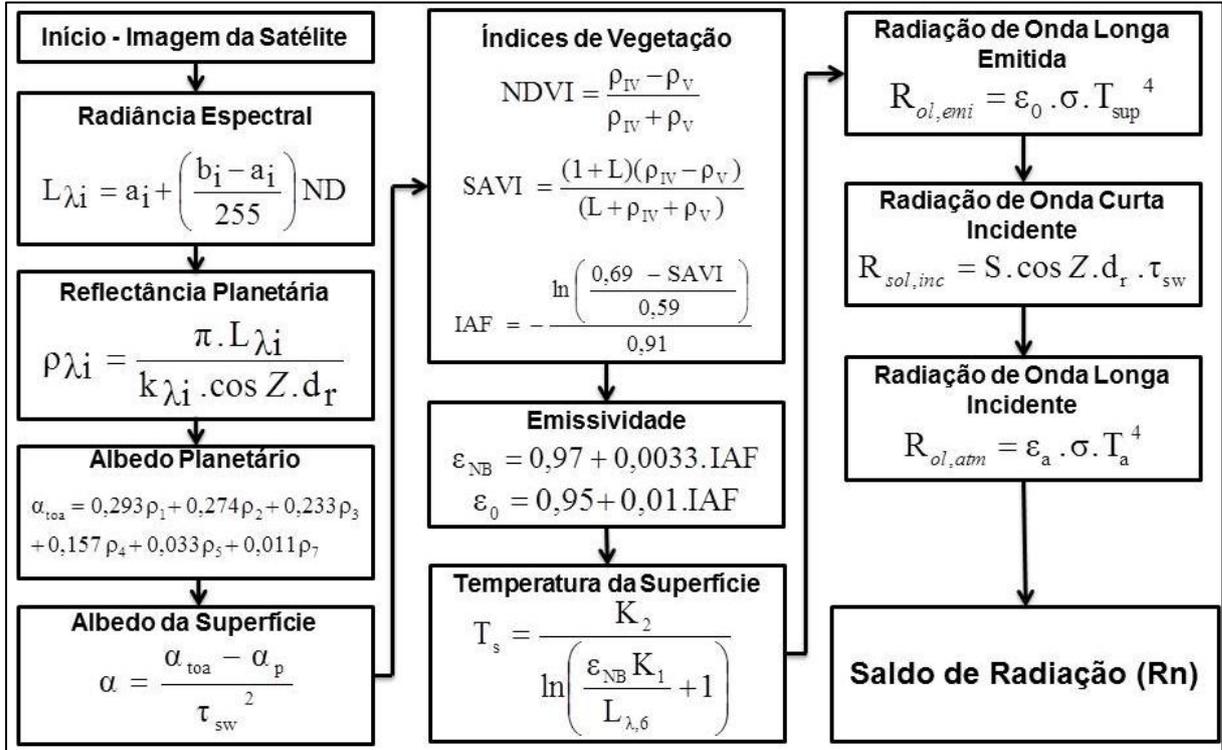
Para o processamento das imagens foi utilizado o software ERDAS, que gerou os dados necessários para a realização da análise espacial dos componentes do saldo de radiação, além de ser utilizado o ArcGis para a produção do layout dos mapas temáticos.

O processamento inicial das imagens consistiu no empilhamento das 7 bandas das imagens TM/Landsat-5, necessitando da reamostragem da banda 6 (termal) para resolução espacial de 30 x 30 m. Sendo em seguida registradas as imagens e posteriormente recortada a área de estudo. Após serem recortadas, foi realizada a calibração radiométrica, conversão do número digital (ND) de cada pixel em radiância espectral monocromática  $L_{\lambda i}$  para as bandas reflectivas do TM/Landsat-5 (canais 1, 2, 3, 4, 5 e 7) segundo relação proposta por Markham e Barker (1987), mostrada na Figura 7. As radiâncias espectrais mínima ( $a_i$ ) e máxima ( $b_i$ ) ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ) foram determinadas por Chander e Markham (2003).

Após o cômputo da radiância espectral calculou-se a reflectância planetária para cada banda, definida pela razão entre o fluxo de radiação solar refletido e fluxo de radiação solar incidente. Com essa etapa vencida, foram processadas as imagens calibradas para a obtenção das variáveis biofísicas (albedo planetário, albedo superficial, índices de vegetação, emissividades e temperatura de superfície) que antecedem o cálculo das componentes do balanço de radiação.

As etapas das calibrações atmosféricas das imagens e do cômputo do saldo de radiação à superfície foram processadas com base no algoritmo SEBAL, conforme fluxograma da Figura 7.

**Figura 7:** Fluxograma do processamento do saldo de radiação instantâneo à superfície ( $R_n$ ) pelo SEBAL.



O processamento do albedo da superfície ( $\alpha$ ), ou albedo corrigido para os efeitos atmosféricos, foi efetuado pela equação exposta na Figura 7, onde  $\alpha_{toa}$  é o albedo planetário,  $\alpha_p$  é a reflectância da própria atmosfera, que para o modelo foi utilizado o valor de 0,03, com base em Bastiaanssen (2000), e  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica que foi obtida por (ALLEN *et al.*, 2002), conforme a seguinte equação:

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z \quad (3)$$

sendo:  $z$  a altitude de cada pixel (m), que para a aplicação nesse trabalho foi atribuído um valor de 350 m, devido a área de interesse não apresentar variações na altitude, obtendo-se  $\tau_{sw} = 0,757$ .

Após calcular as variáveis biofísicas (índices de vegetação, emissividade e temperatura de superfície), foi realizado o cômputo das componentes do balanço de radiação, sendo inseridos nesses procedimentos a constante de Stefan-Boltzman

( $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ) e a emissividade atmosférica, obtida por  $\epsilon_a = 0,85 \cdot (-\ln\tau_{sw})^{0,09}$ , conforme Allen *et al.* (2002).

De posse de todos os componentes do balanço de radiação, o saldo de radiação instantâneo à superfície foi calculado baseado nos valores dos fluxos de radiação processados anteriormente, conforme a seguinte equação:

$$Rn = R_{sol,inc} \cdot (1 - \alpha_{sup}) - R_{ol,emi} + R_{ol,atm} - (1 - \epsilon_0) \cdot R_{ol,atm} \quad (4)$$

onde:  $R_{sol,inc}$  é a radiação de onda curta incidente;  $\alpha_{sup}$  é o albedo corrigido de cada pixel;  $R_{ol,atm}$  é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel;  $R_{ol,emit}$  é a radiação de onda longa emitida por cada pixel e  $\epsilon_0$  é a emissividade de cada pixel.

Já o saldo de radiação diário ( $Rn_{24h} - \text{W m}^{-2}$ ) foi obtido mediante modelo proposto por Bruin (1987):

$$Rn_{24h} = Rs \cdot (1 - \alpha_{sup}) - 110 \cdot \tau_{24h} \quad (5)$$

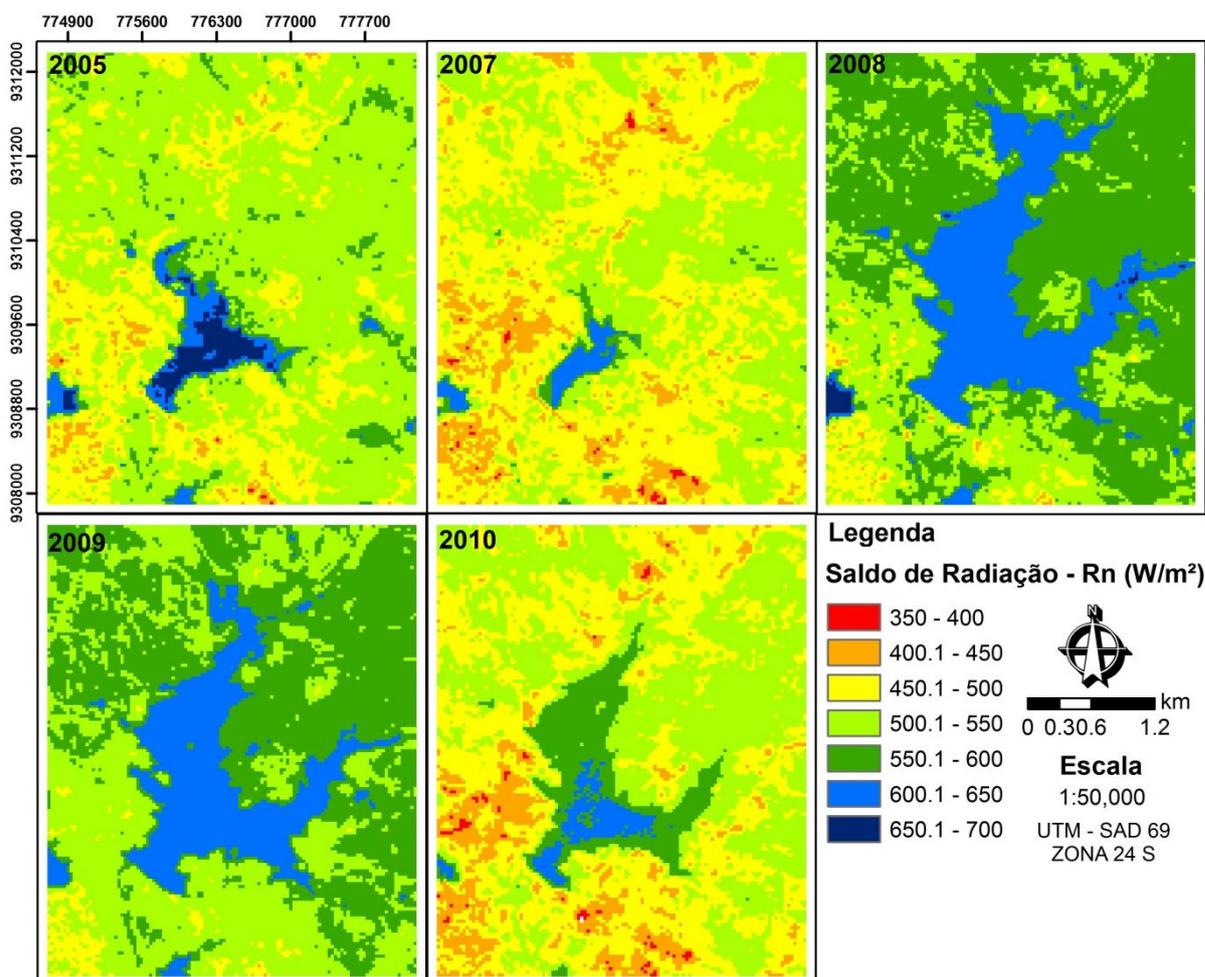
em que  $Rs$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) é a radiação solar global diária medida em estação meteorológica na área de estudo e  $\tau_{24h}$  é a transmitância atmosférica média diária.

Visando avaliar a evolução espaço temporal, os dados do saldo de radiação foram analisados com o auxílio do programa STATISTICA, obtendo os principais parâmetros estatísticos descritivos, tais como: média, variância, desvio-padrão, coeficiente de variação, valor mínimo e valor máximo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 8 apresentam-se as cartas temáticas do saldo de radiação instantâneo ( $Rn$ ) para as cinco imagens selecionadas diante da disponibilidade e aplicabilidade pelo SEBAL, considerando a ausência de nuvens como pré-requisito necessário ao processamento dessa variável pelo modelo, já que o topo das nuvens tem alta capacidade de reflexão da radiação solar, alterando assim a acurácia das estimativas do saldo de radiação instantâneo e diário.

**Figura 8:** Mapa temático da distribuição espacial e temporal do saldo de radiação instantâneo para o entorno do reservatório Dourado (Currais Novos/RN).



No contexto seridoense, região semiárida do nordeste brasileiro, mais precisamente na área selecionada para a pesquisa, a presença de nuvens é constante nas imagens de satélite devido à cadeia montanhosa da região favorecer a formação de chuvas orográficas. No entanto, as imagens selecionadas não apresentaram nuvens para a cena destacada para o estudo.

A distribuição espacial do saldo de radiação instantâneo em cada imagem acompanhou um padrão de variação, apresentando baixos valores de coeficiente de variação, assim como mostrado na Tabela 6, que destaca os principais valores estatísticos descritivos para os dados extraídos dos pixels das imagens processadas para o Rn.

**Tabela 6:** Valores estatísticos descritivos aplicados sobre os dados exportados das imagens de Rn resultantes da aplicação do SEBAL.

<b>Imagem</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Med.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Var.</b>	<b>DP</b>	<b>CV</b>
2005	16588	520,35	518,23	379,42	671,96	160,32	40,04	7,69
2007	16588	492,16	492,90	358,54	649,19	120,98	34,78	7,07
2008	16588	568,55	564,47	416,93	665,29	167,10	40,88	7,19
2009	16588	558,40	554,52	445,07	630,81	102,34	31,99	5,73
2010	16588	500,95	500,25	332,28	609,01	180,43	42,48	8,48

Nota: **N** é o Número de pixels; **Med.** é a Mediana ( $W/m^2$ ); **Mín.** é o valor Mínimo ( $W/m^2$ ); **Máx.** é o valor Máximo ( $W/m^2$ ); **Var.** é a Variância; **DP** é o Desvio Padrão; e **CV** é o Coeficiente de Variação (%).

Para os valores destacados acima, pode-se observar que, para as imagens de 2007 e 2010, os valores da média e da mediana foram bastante próximos.

Outro ponto importante de se destacar é a amplitude dos valores de Rn para as cinco imagens, que apresentou valores elevados. Contudo, a aplicação do algoritmo SEBAL é direcionada à superfície, e os valores máximos foram observados para a área do reservatório Dourado, que contribuiu para o aumento, não somente, dessa variável estatística, mas também das outras medidas de dispersão. Porém a observação dos dados que compreendem o reservatório foi importante devido à variação da sua área apresentar comportamento relacionado à sazonalidade local.

Como visto, os maiores valores de Rn foram observados para a área da lâmina d'água do reservatório Dourado, resultado explicado pelo baixo albedo, que representa, em porcentagem, a razão entre a radiação refletida e incidente em um corpo. No caso de corpos hídricos a parcela refletida da radiação incidente é baixa em relação ao solo exposto ou coberto por vegetação, devido à alta absorção de radiação pelas moléculas de água e à sua capacidade de refratar parcela da radiação incidente.

Já os valores mais baixos ocorreram para áreas de solo exposto, que apresentaram valores elevados de albedo, o que significa que grande parte da radiação solar incidente está sendo refletida para a atmosfera, reduzindo, conseqüentemente, o saldo de radiação instantâneo disponível a superfície. Esses valores, segundo Silva *et al.* (2005), são fortemente modulados pela radiação solar que chega ao solo, e é repartido em energia para aquecimento do ar, aquecimento do solo e para processos evaporativos, que são os fluxos de calor sensível (H), de calor no solo (G) e de calor latente (LE), respectivamente.

Considerando os resultados médios em escala temporal, os resultados mais elevados do Rn foram encontrados nas imagens inseridas em período com maior presença de precipitação, ano com maior índice pluviométrico, ou seja, nas imagens 2008 e 2009, conforme dados da Tabela 7. Esse comportamento foi causado pelo desenvolvimento da vegetação de Caatinga, que em períodos chuvosos formam sua biomassa verde devido a maior disponibilidade hídrica no solo. Esse fato reduz o albedo da área em relação ao solo exposto e seco, devido a maior absorção da radiação solar incidente sobre as plantas, o que provoca o incremento do saldo de radiação instantâneo.

**Tabela 7:** Valores diários das principais variáveis meteorológicas para cada imagem e precipitação anual acumulada.

Imagens	13/7/2005	19/7/2007	19/6/2008	8/7/2009	9/6/2010
Umidade Relativa (%)	51,25	48,50	62,00	66,25	67,00
Temp. Média do Ar (°C)	25,84	26,70	22,84	24,20	25,80
Radiação Global ( $Wm^{-2}$ )	283,95	279,18	278,10	266,48	281,25
Precipitação Diária (mm)	0,00	0,00	0,00	1,20	0,00
Precipitação Anual (mm)	512,80	338,90	996,10	1169,00	188,00

Fonte: Estação meteorológica convencional do INMET – Cruzeta/RN.

Diante do comportamento da vegetação de Caatinga frente a variação sazonal da precipitação e a influência sobre os resultados obtidos para as variáveis em estudo, Shusen e Davidson (2007), registraram médias maiores do Rn em área de vegetação de Caatinga densa (com grande presença de biomassa verde), e justificaram pelo baixo albedo na referida área, o que faz com que se tenha maior quantidade de radiação de onda curta. Arraes *et al.* (2012), em área de vegetação de Caatinga densa localizada no sul do estado do Ceará, em clima idêntico ao da região deste estudo, também encontraram valores médios em torno de  $550 Wm^{-2}$ , que corroboram os valores obtidos para as imagens 2008 e 2009 deste trabalho, conforme Tabela 6.

Em contra partida, a ocorrência dos menores valores de Rn foi no período mais seco (2005, 2007 e 2010), tendo como principal fator a esse comportamento a exposição do solo decorrente do comportamento da vegetação de Caatinga, que perdem biomassa verde do seu dossel como mecanismo fisiológico e morfológico de defesa a estiagem. Esse comportamento eleva os valores de albedo dessas áreas,

que provocam a redução do saldo de radiação disponível à superfície, como discutido anteriormente. De forma geral, nas três imagens desse período houve pouca alteração no saldo de radiação entre as mesmas, concentrando-se os valores entre 332,28 a 671,96  $Wm^{-2}$ , como pode ser visto na Tabela 6.

Silva *et al.* (2011), em trabalho comparativo entre vegetação nativa, solo exposto, cultivo irrigado e área sobre reservatório no semiárido paraibano, computaram valores instantâneos de Rn em áreas de solo exposto variando entre 470 e 520  $Wm^{-2}$ , apresentando-se inferiores às outras áreas analisadas. Esses resultados apresentaram valores semelhantes aos obtidos neste trabalho, podendo ser observados nas imagens 2005, 2007 e 2010, comparando-as com a legenda da Figura 8, confirmando a excelente aplicabilidade do SEBAL para avaliação temporal dessas variáveis em regiões semiáridas, principalmente para observação do comportamento da vegetação de Caatinga nessas condições climáticas.

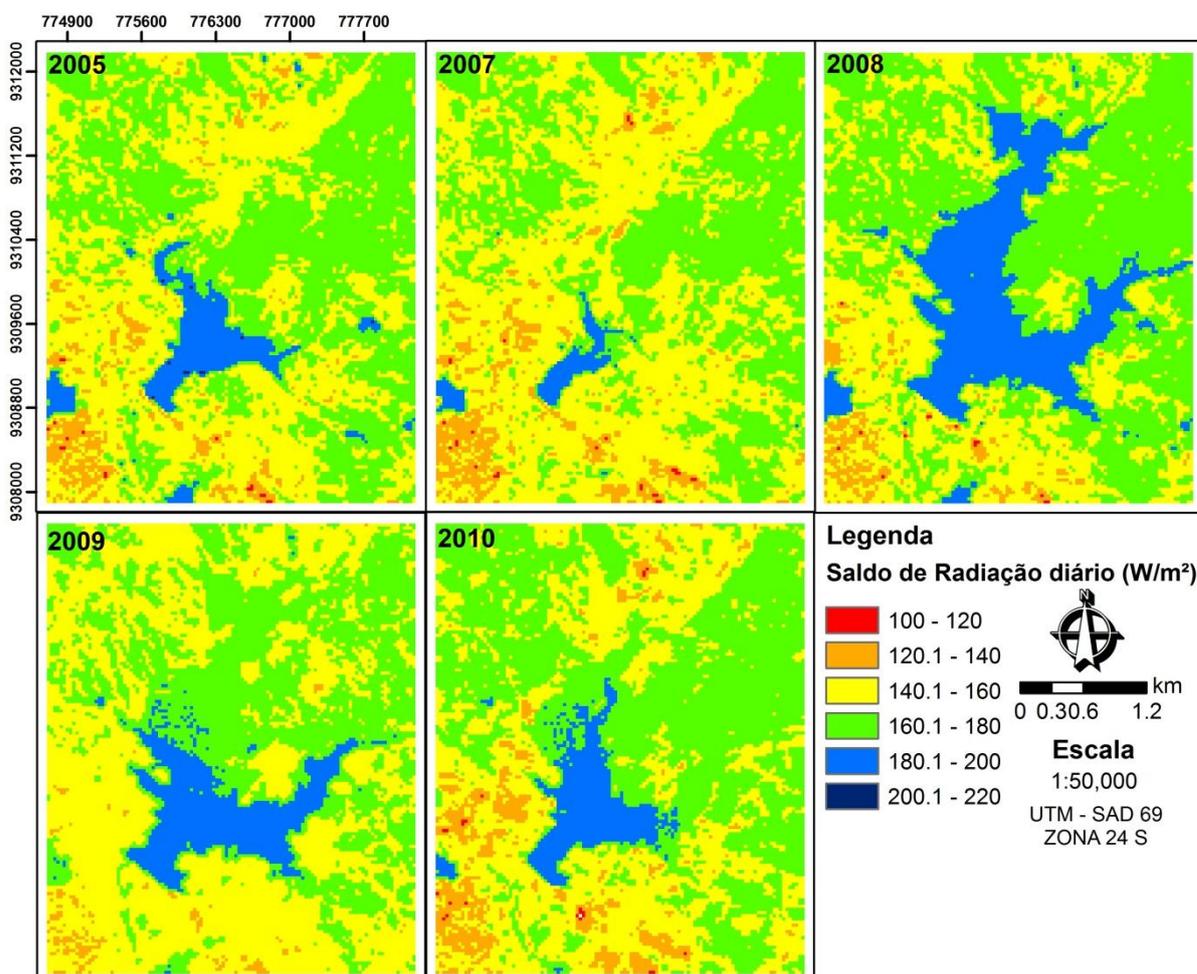
Em se tratando do saldo de radiação diário, os valores estimados pelo SEBAL foram coerentes com os dados medidos em estação meteorológica convencional e estimados pelo método de Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998). Essa análise comparativa pode ser vista na Tabela 8, onde os erros relativos, em sua maioria, foram inferiores a 10%, que segundo Bezerra *et al.* (2008) representa uma boa concordância entre os valores estimados pelos dois métodos.

**Tabela 8:** Análise comparativa entre a média das estimativas do Rn diária pelo SEBAL e os resultados obtidos pelo método de Penman-Monteith/FAO.

Imagem (Data)	Dia do ano	Rn (Penman-Monteith)	Rn SEBAL	Erro Absoluto	Erro Relativo
		$W/m^2$	$W/m^2$	$W/m^2$	(%)
13/07/2005	194	150,88	160,080	9,204	6,10
19/07/2007	200	149,33	156,570	7,238	4,85
19/06/2008	171	146,62	164,680	18,060	12,32
08/07/2009	189	151,45	161,270	9,824	6,49
09/06/2010	160	161,74	159,920	1,824	1,13

Na Figura 9 tem-se apresentados os mapas temáticos do  $Rn_{24h}$  para as cinco imagens selecionadas, apresentando a dinâmica temporal da variabilidade espacial dessa variável.

**Figura 9:** Mapa temático da variação espacial e temporal do saldo de radiação diário para o entorno do reservatório Dourado (Currais Novos/RN).



A variação espacial, observando as cartas temáticas, apresentou uma baixa amplitude, desconsiderando os valores mais elevados, que compreendem o reservatório Dourado. Apesar da heterogeneidade que envolve a área de entorno do reservatório, o comportamento da vegetação de Caatinga e de solo exposto prevaleceu sobre esses pontos de atividades agropecuárias, devido à pequena abrangência que esses usos do solo possuem no geral. Esse fato pode ser comprovado por valores obtidos por Silva *et al.* (2011), que obtiveram valores de  $Rn_{24h}$  variando de 90 a  $200 Wm^{-2}$ , sendo os menores valores para solos expostos e afloramentos rochosos e os maiores para áreas com superfície molhada, com os valores intermediários representando áreas com vegetação nativa (Caatinga) densa.

A Tabela 9 simplifica os valores dos mapas em dados estatísticos descritivos que permitem visualizar a baixa variação espacial dos dados de  $Rn_{24h}$  assim como a distribuição desses valores em relação ao tempo.

**Tabela 9:** Valores estatísticos descritivos aplicados sobre os dados exportados das imagens de  $Rn_{24h}$  resultantes da aplicação do SEBAL.

<b>Imagem</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Med.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Var.</b>	<b>DP</b>	<b>CV</b>
2005	16588	160,08	160,06	107,07	201,56	154,11	12,41	7,75
2007	16588	156,57	157,47	110,37	192,65	113,94	10,67	6,82
2008	16588	164,68	163,17	111,30	196,60	171,80	13,11	7,96
2009	16588	161,27	159,76	123,71	184,82	105,64	10,28	6,37
2010	16588	159,92	161,46	98,05	189,14	149,93	12,24	7,66

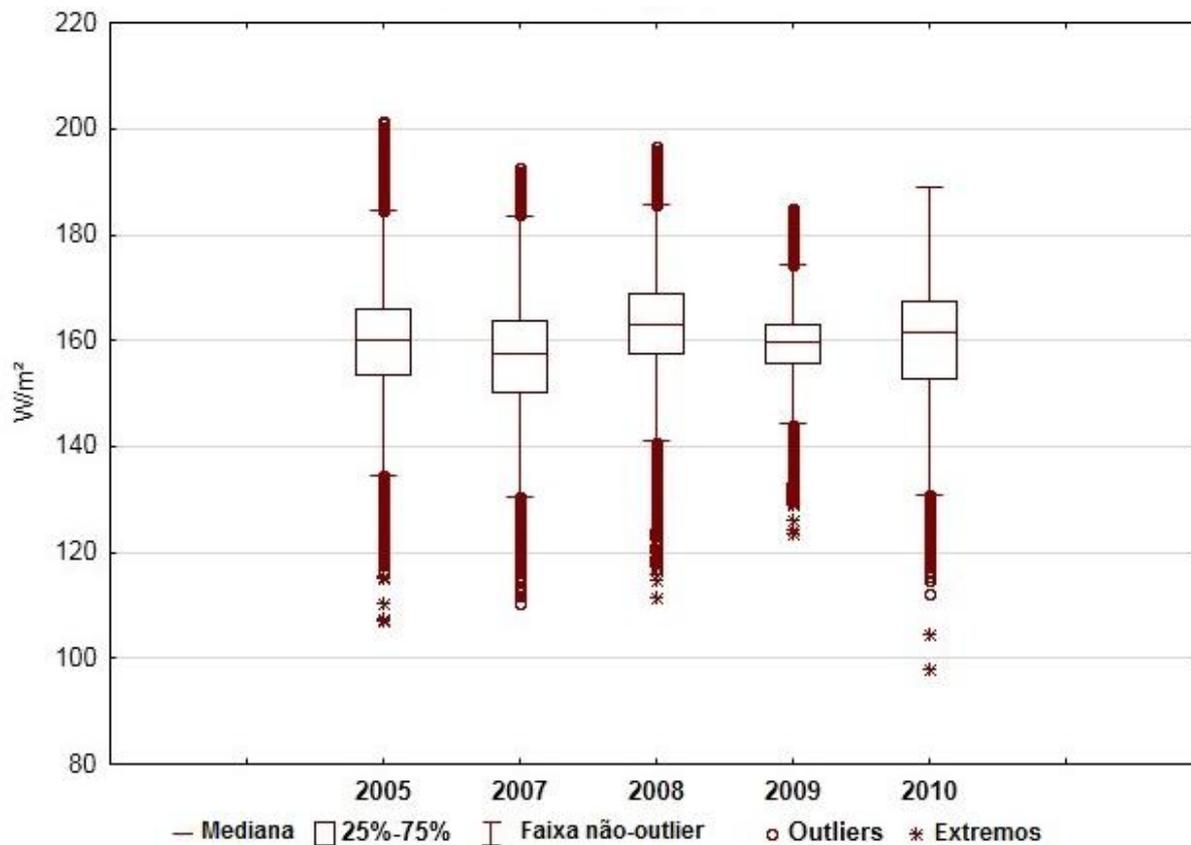
Nota: **N** é o Número de pixels; **Med.** é a Mediana ( $W/m^2.dia$ ); **Mín.** é o valor Mínimo ( $W/m^2.dia$ ); **Máx.** é o valor Máximo ( $W/m^2.dia$ ); **Var.** é a Variância; **DP** é o Desvio Padrão; e **CV** é o Coeficiente de Variação (%).

De acordo com o Zwart *et al.* (2006), valores de Coeficiente de Variação abaixo de 9% indicam extrema homogeneidade no padrão de distribuição espacial. Portanto, o  $Rn$  e o  $Rn_{24h}$  das imagens em estudo apresentam-se em um padrão espacial, podendo concluir que há uma homogeneidade na variabilidade dessas duas variáveis para a área avaliada.

Observa-se a partir dos valores médios de cada imagem, e também dos mapas temáticos da Figura 9, uma baixa variação do saldo de radiação diário em escala temporal. Esse fato também é comprovado pela pequena variação dos valores médios de cada imagem em relação à média geral de todas as imagens, que foi de  $160 Wm^{-2}$ . Esse valor foi aproximado ao encontrado por Silva *et al.* (2011), que também obtiveram baixa variação sazonal para as imagens estudadas, sendo áreas de solo exposto, reservatório e cultivos irrigados no semiárido paraibano.

Na Figura 10, observa-se o gráfico de *boxplot*, o qual permite verificar a baixa variação dos valores medianos. Contudo há uma presença significativa de *outliers*, valores extremos de máximo e de mínimo, que são justificados pelos resultados que compreendem a superfície molhada (Reservatório Dourado) e pelas áreas de solo exposto e/ou afloramento rochosos, respectivamente.

**Figura 10:** Gráfico de *Boxplot* para os dados das cinco imagens de  $Rn_{24h}$ .



A distribuição dos dados de  $Rn_{24h}$  para as imagens 2005, 2008 e 2009 apresenta-se de forma simétrica, enquanto que para os anos de 2007 e 2010 os valores se distribuem assimetricamente em relação à mediana, concentrado os resultados abaixo da mesma. Essa distribuição mostra o comportamento da dispersão dos valores da variável em estudo numa distribuição de frequência considerando uma medida de tendência central, que nesse caso foi a mediana.

## CONCLUSÕES

A variação sazonal do saldo de radiação apresentou-se dentro do esperado considerando trabalhos realizados em áreas semelhantes, e diante dos dados de superfície coletados em estação meteorológica e estimativa pelo método de Penman-Monteith, o que viabiliza a utilização do SEBAL como método para avaliar a evolução espaço temporal do  $Rn$  e do  $Rn_{24h}$ .

Tanto o  $R_n$  como o  $R_{n24h}$  sofreram influência da precipitação em sua variação sazonal em regiões semiáridas, provocado pela disponibilidade de água no solo e pelo desenvolvimento da vegetação de Caatinga para essas condições.

A distribuição espacial do  $R_n$  e do  $R_{n24h}$ , para as cinco imagens, apresentou padrão similar, causado pela pequena dimensão das diversas atividades, que sofreram influência do seu entorno, área de vegetação nativa (Caatinga).

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 279 p. 1998. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

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.

ANGSTRÖN, A. Solar e terrestrial radiation. **Quarterly Journal**, Royal Meteorological Society, 50:121-26. 1924.

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

BASTIAANSSEN, 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.

BASTIAANSSEN, 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**, New York, v.131, n.1, p.85-93, 2005.

BEZERRA JÚNIOR, J.G.O.; SILVA, N.M. da. Caracterização geoambiental da microrregião do seridó oriental do Rio Grande do Norte. **Holos**, ano 23, v.2, 2007.

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.

BRUIN, H. A. R. de. From Penman to Makkink. In: Hooghart, J. C. (ed.), **Proceedings...** TNO Committee on Hydrological. Gravenhage, The NetheRLands, v.39, p.5-31, 1987.

CARGNELUTTI FILHO, A.; MATZENAUER, R.; MALUF, J. R. T.; SILVA, B. P. da. Tamanho de amostra para a estimativa das médias decendiais de radiação solar global no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.31, n.5, p.1402-1410, set./out., 2007.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 11, p. 2674-2677, 2003.

KLEIN, S. A. Calculation of Monthly Average Insolation on titled surfaces. **Solar energy**, v.9, p.325-329, 1977.

MARKHAM, B. L. & BARKER, J. B. Thematic mapper band pass solar exoatmospherical irradiances. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 3, p. 517-523, 1987.

MENEZES, M. D. de; CURI, N.; MARQUES, J. J.; MELLO, C. R. de; ARAÚJO, A. R. de. Levantamento pedológico e sistema de informações geográficas na avaliação do uso das terras em sub-bacia hidrográfica de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.33, n.6, p.1544-1553, nov./dez., 2009.

PEZZOPANE, J.E.M.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; ORTOLANI, A.A.; MEYER, N. Radiação líquida e temperatura de folha no interior de estufa com cobertura plástica, durante o período noturno. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.3, p.1-4, 1995.

RIO GRANDE DO NORTE. INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE DO RIO GRANDE DO NORTE. **Perfil de seu município – Currais Novos**. Natal, RN, v. 10, p. 1-23, 2008. Disponível em: < [http://www.idema.rn.gov.br/contentproducao/aplicacao/idema/socio\\_economicos/arquivos/Perfil%202008/Currais%20Novos.pdf](http://www.idema.rn.gov.br/contentproducao/aplicacao/idema/socio_economicos/arquivos/Perfil%202008/Currais%20Novos.pdf) >. Acesso em: 21 jan. 2013.

SHUSEN, W.; DAVIDSON, A. Impact of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, n. 2, p. 133-142, 2007.

SILVA, B. B. da.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. de.; 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. da; BRAGA, A.C.; BRAGA, C.C. Balanço de radiação no perímetro irrigado São Gonçalo – PB mediante imagens orbitais. **Revista Caatinga**, Mossoro, v. 24, n. 3, p. 145-152, jul.-set., 2011.

TEIXEIRA, A.H. DE C.; BASSOI, L.H.; LOPES, H.L.; HERNANDEZ, F.B.T. Análises dos componentes dos balanços de radiação e de água por sensoriamento remoto em videiras para mesa no município de Petrolina-PE, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 71-77.

WELIGEPOLAGE, K. **Estimation of spatial and temporal distribution of evapotranspiration by satellite remote sensing – A case study in Hupselse Beek**. The Netherlands, p.114, 2005.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 245p. 1975.

ZWART, S.J.; BASTIAANSEN, W.G.M.; GARATUZA-PAYAN, J.; WATTS, C.J. SEBAL for detecting spatial variation of water productivity for wheat in the Yaqui Valley, Mexico. Earth Observation for Vegetation Monitoring and Water Management. **American Institute of Physics**, p. 154-161. 2006.

### CAPÍTULO 3

#### **Aplicação e validação da estimativa da evapotranspiração real diária a partir de produtos de sensoriamento remoto 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, com base na realidade hidro climática local. Diante disso, este trabalho tem como objetivo estimar a evapotranspiração real diária da região em estudo (semiárida, com predominância de cobertura vegetal de Caatinga) a partir do *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) e produtos de sensoriamento remoto, e validar as estimativas com valores obtidos pelo método de Penman-Monteith (método padrão da *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/Lansat-5, ponto 215, órbita 64, com área de estudo compreendendo 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 sazonal foi dentro do esperado diante dos dados medidos em estação meteorológica convencional.

**Palavras-chave:** Balanço de energia. Evapotranspiração. Sensoriamento remoto.

**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, based on local climate hydro reality. Given this, this study aims to estimate daily actual evapotranspiration of the region in study (semiarid, with predominance of Caatinga vegetal cover) from the *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) and remote sensing products, and validating estimates with the values obtained by the Penman-Monteith method (standard method of 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 seasonal variation was within the expected in the face of data measured in conventional meteorological station.

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

## INTRODUÇÃO

A estimativa da evapotranspiração espacial 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, com base na realidade hidro climática local.

Nas regiões semiáridas do Nordeste brasileiro, além de baixas médias de precipitação, que se distribui de forma irregular durante o ano, a evapotranspiração também é motivo de preocupação, pois representa grande parte da demanda do volume de água armazenada nessas regiões, devido a alta taxa de radiação solar incidente. Esses motivos têm atraído o foco de pesquisas na área de hidro meteorologia, principalmente na estimativa das variáveis do balanço hídrico e na análise de água disponível.

A utilização de dados de sensoriamento remoto na estimativa da evapotranspiração real tem sido estudada e têm demonstrado resultados úteis para aplicação em modelagens meteorológicas e hidrológicas, pois estas podem ser usadas em áreas com grandes dimensões e heterogeneidade, ao contrário dos métodos micro meteorológicos, que se limitam a estimativas locais e pontuais.

Dentre os métodos que utilizam o sensoriamento remoto como meio para estimar a evapotranspiração (ET), o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), tem se destacado por necessitar de poucos dados de superfície, proporcionar o balanço de energia à superfície de maneira efetiva e econômica, possibilitar uma grande cobertura espacial e, dependendo do sensor orbital que o alimenta com dados dos canais reflectivos e termais, apresentar grande resolução espacial.

A evapotranspiração espacial 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 a

dados radiométricos de qualquer sensor orbital que efetue medidas da radiância no visível, infravermelho próximo e infravermelho termal.

Diversos autores têm aplicado e validado esse método em diferentes áreas do Brasil e do mundo. A exemplo disso, Teixeira (2010) aplicou o modelo na bacia do rio São Francisco e concluiu que o uso do sensoriamento remoto em conjunto com uma rede de estações agrometeorológicas, nos possibilita fazer uma avaliação histórica da evapotranspiração em escala regional nas áreas semiáridas do Brasil. O autor ainda concorda que essas ferramentas (sensoriamento remoto) podem ser operacionalmente testadas e implementadas para monitorar o aumento da agricultura irrigada, subsidiando formas de evitar danos ambientais em bacias hidrográficas com a mudança de uso do solo.

Frente ao que foi apresentado, este trabalho tem como objetivo estimar a evapotranspiração real diária da região (semiárida, com predominância de cobertura vegetal de Caatinga) em estudo a partir do algoritmo SEBAL e produtos de sensoriamento remoto, e validar as estimativas com valores obtidos pelo método de Penman-Monteith, método padrão da *Food and Agriculture Organization* – FAO.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Área de estudo**

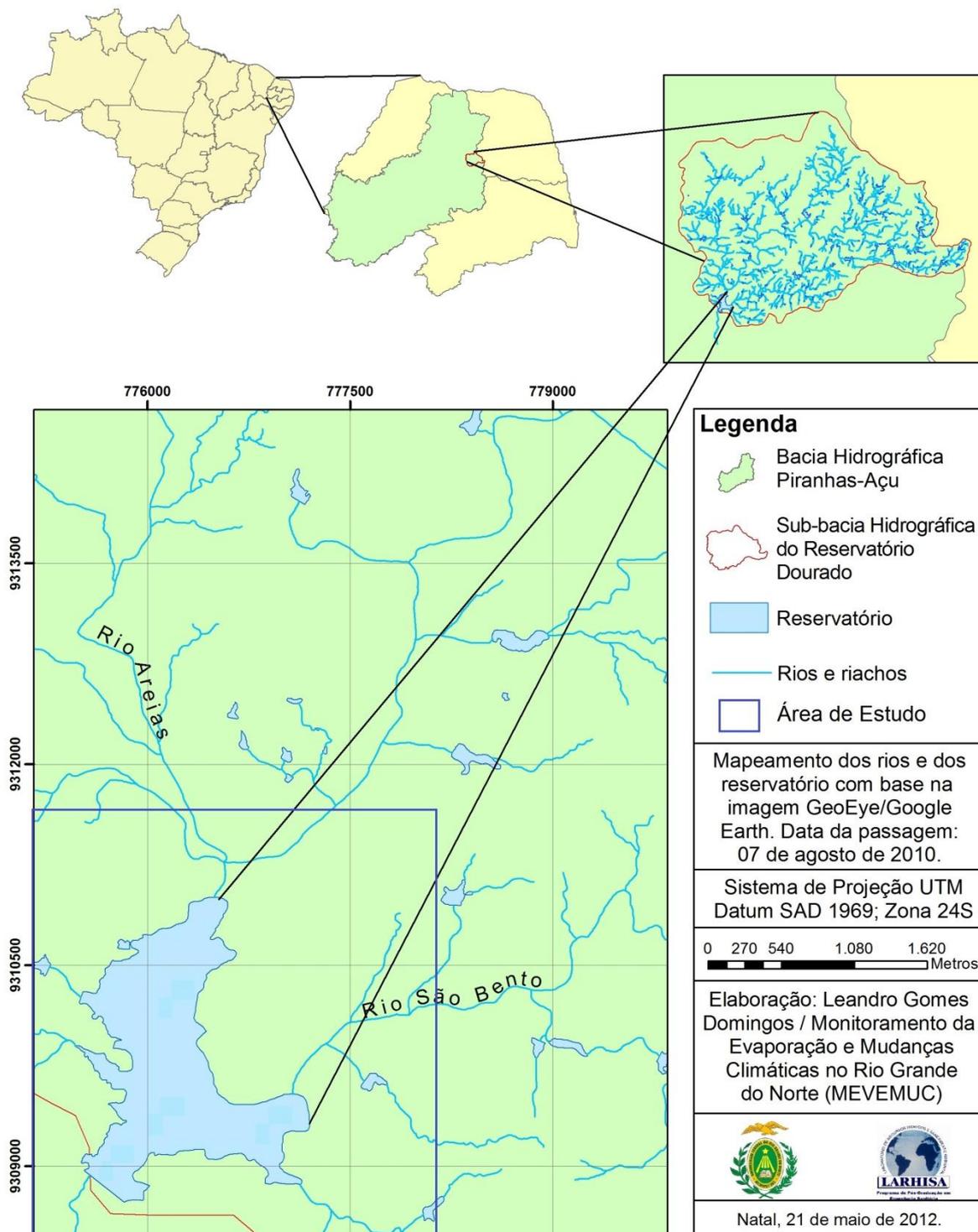
Localizado no município de Currais Novos, Seridó potiguar, o reservatório Dourado é a fonte do abastecimento de água para a população local. A sua capacidade máxima de acumulação está em torno de 10.321.600,00 m<sup>3</sup> de água, com uma área superficial de 3,16 km<sup>2</sup> e profundidade máxima de 10 m.

A região de entorno do reservatório compreende a área de interesse do estudo, o que possibilita a melhor compreensão da demanda hídrica por evapotranspiração dessa região, 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 do reservatório.

A Figura 11 apresenta a área de interesse do estudo e a hidrografia local, mostrando tanto os rios perenes como os intermitentes e efêmeros, que

caracterizam-se por existir, com água, apenas no período chuvoso, secando em tempo de estiagem devido a infiltração e a alta demanda evapotranspirométrica.

**Figura 11:** Mapa de localização da área de estudos com a hidrografia local.



O clima do Seridó é seco, com altas taxas de evapotranspiração que contribuem para a formação de rios temporários e pouca retenção de água no solo. Isto dificulta a produção agrícola em geral e a vida da população local. Dessa maneira, torna-se necessária a construção de adutoras e barragens que amenizem a situação (BEZERRA JÚNIOR; SILVA, 2007).

### Dados meteorológicos e orbitais

Os dados de superfície necessários para a estimativa da evapotranspiração pelo SEBAL foram obtidos junto a Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN), que opera estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no município de Cruzeta/RN, local mais próximo da área de estudo (menos de 40 km de distância). A Tabela 10 apresenta os valores médios para o referido dia de cada imagem trabalhada.

**Tabela 10:** Valores médios diário das variáveis meteorológicas medidas em estação meteorológica do INMET, Cruzeta/RN.

Imagens	13/7/2005	19/7/2007	19/6/2008	8/7/2009	9/6/2010
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

As imagens foram retiradas do catálogo de imagens do TM/Landsat-5 disponível no site do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) e do United States Geological Survey (USGS).

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 camada de nuvem sobre a área em estudo no momento do imageamento foram selecionados apenas as imagens listadas na Tabela 11, já que a região propicia uma grande formação de nuvens orográficas devido ao seu relevo de elevados planaltos.

**Tabela 11:** 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.

<b>Data da imagem</b>	<b>13/07/2005</b>	<b>19/07/2007</b>	<b>19/06/2008</b>	<b>08/07/2009</b>	<b>09/06/2010</b>
Hora (GMT*)	12:22:35	12:28:27	12:22:24	12:23:34	12:25:30
Elevação do Sol	48,3959	49,9648	48,167	48,2933	49,4188
Dia Sequencial	194	200	171	189	160

\*GMT: Greenwich Mean Time.

Para o processamento das imagens foi utilizada 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 ARCGIS para elaboração dos layouts contendo os mapas temáticos, classificados a partir dos valores de cada pixel para a variável estudada.

### **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 efetuada de acordo com procedimento descrito na Figura 7. De posse dos valores desses componentes o saldo de radiação foi determinado pela Equação 4.

### **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 fórmula:

$$G = [T_s(0,0038 + 0,007\alpha)(1 - 0,98NDVI^4)]R_n \quad (6)$$

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

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

### **Cômputo do fluxo de calor sensível**

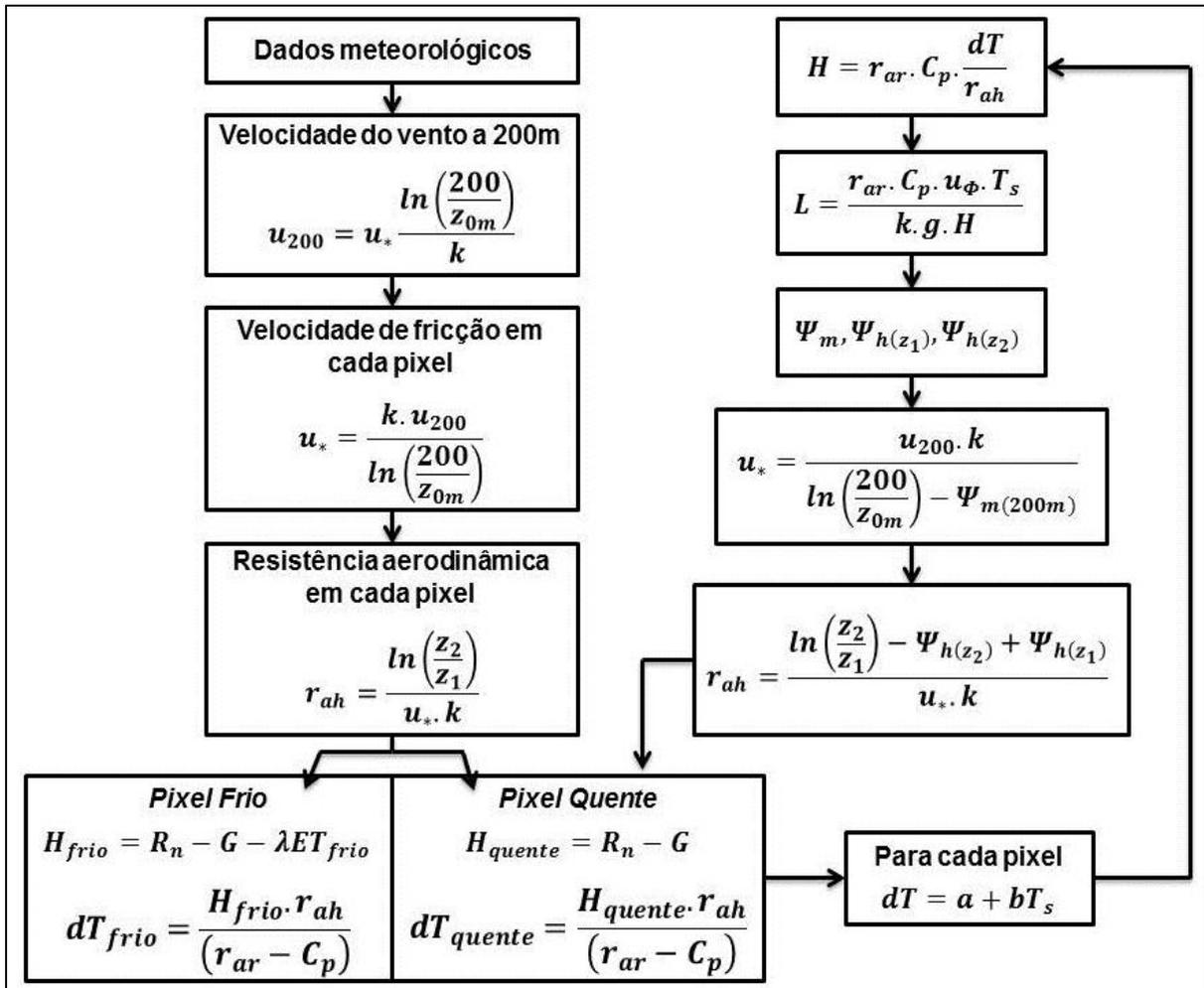
O cálculo da densidade de fluxo de calor sensível ( $H$ ) é considerado o cerne do SEBAL, e foi obtido com base na teoria da similaridade de Monin-Obukhov através de um processo iterativo levando em consideração as condições de estabilidade atmosférica. O mesmo foi calculado em função da diferença de temperatura ( $dT$ ) entre dois níveis diferentes das camadas inferiores da atmosfera ( $z_1$  e  $z_2$ ) e a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $r_{ah}$ ), que é computada 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 2 metros para a altura do dossel da vegetação ( $h$ ) da área de estudo. Esse valor foi adotado devido ao grande cultivo de capim-elefante no entorno do reservatório, e de cultivos irrigados como milho e acerola. Além disso, pelo fato da Caatinga da região também ser arbórea, apresentando vegetação de porte mais elevado. O valor da altura da vegetação foi aplicado para a estimativa do coeficiente de rugosidade ao transporte de momentum ( $z_{0m} = 0,12h$ ), necessário na prévia do processo iterativo, para o cômputo da velocidade do vento a 200 m ( $u_{200}$ ) e velocidade de fricção do vento em cada pixel ( $u^*$ ).

Para efetuar o processo iterativo de obtenção de  $H$ , esquematizado na Figura 12, o SEBAL parte da escolha de dois “pixels âncoras” na cena estudada, os quais são denominados como pixel “frio” e “quente”, que servem para definir uma relação linear entre a temperatura da superfície ( $T_s$ ) e a  $dT$ , a fim de estabelecer os valores das constantes de calibração de  $dT$  ( $a$  e  $b$ ). 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 solo exposto, sem cobertura

vegetal, até região urbana, compreendendo a área permeável da cidade de Currais Novos.

**Figura 12:** Esquema do processo iterativo para obtenção do fluxo de calor sensível (H) a partir do algoritmo SEBAL.



O processo iterativo foi realizado com o auxílio do EXCEL, a partir de planilha que efetuou as correções dos valores de a e b (constantes de calibração da diferença de temperatura – dT) a cada procedimento. 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 12, onde depende do módulo do campo gravitacional terrestre ( $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ ).

Após a calibração interna da diferença da temperatura próxima à superfície entre dois níveis distintos da superfície, e determinação dos valores corrigidos de  $u^*$  e  $r_{ah}$ , o fluxo de calor sensível (H) ( $\text{Wm}^{-2}$ ) foi estimado com base na equação proposta por Bastiaanssen *et al.* (1998):

$$H = \rho c_p \frac{(a+bT_s)}{r_{ah}} \quad (7)$$

onde  $\rho$  é a massa específica do ar ( $\text{kg.m}^{-3}$ ),  $c_p$  é o calor específico do ar ( $1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), a e b são constantes de calibração da diferença da temperatura entre dois níveis  $Z_1$  e  $Z_2$ ,  $T_s$  é a temperatura da superfície ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $\text{sm}^{-1}$ ).

### **Definição do fluxo de calor latente**

O fluxo de calor latente – LE ( $\text{Wm}^{-2}$ ) compreende o fluxo de massa na 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 os fluxos de calor sensível, no solo e o saldo de radiação, o LE foi calculado pela equação 1, onde os fluxos correspondem ao instante da passagem do satélite.

### **Estimativa da evapotranspiração real diária pelo SEBAL**

Para a obtenção da evapotranspiração real diária, a primeira etapa foi calcular a evapotranspiração real horária ( $ET_H$ ), dada pela razão entre o LE e o calor latente de vaporização da água ( $\lambda = 2,45 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ ), multiplicada por 3600, que é um fator de conversão de valor instantâneo para valor horário, conforme equação seguinte (ALLEN *et al.*, 2002, TREZZA, 2002):

$$ET_H = 3600 \frac{LE}{\lambda} \quad (8)$$

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:

$$FET_{0\_H} = \frac{ET_H}{ET_{0\_H}} \quad (9)$$

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

Considerando  $FET_{0\_H}$  igual a fração da evapotranspiração de referência diária ( $FET_{0\_24}$ ), tem-se:

$$FET_{0\_H} = FET_{0\_24} = \frac{ET_H}{ET_{0\_H}} = \frac{ET_{24}}{ET_{0\_24}} \quad (10)$$

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

$$ET_{24H} = FET_{0\_24} \cdot ET_{0\_24} \quad (11)$$

A evapotranspiração de referencia diária ( $ET_{0\_24}$ ) e a  $ET_{0\_H}$  foram calculadas usando o método de Penman-Monteith/FAO (ALLEN *et al.*, 1998), com dados da estação meteorológica convencional do INMET, situado em Cruzeta/RN. Os valores de  $ET_{0\_H}$  foram obtidos no intervalo de tempo que compreenda 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, onde todas as variáveis envolvidas foram obtidas de acordo com Allen *et al.* (1998), baseando-se na seguinte equação:

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T+273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (12)$$

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 média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $u_2$  a velocidade do vento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $e_s$  a pressão de vapor de saturação (kPa),  $e_a$  a pressão real de vapor (kPa),  $\Delta$  a inclinação da curva de pressão de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) e  $\gamma$  a constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

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 a 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 seguinte equação:

$$ET_r = ET_0 \cdot kc \quad (13)$$

## 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 14 e 15, respectivamente:

$$EA = |ET_r(\text{Penman Monteith}) - ET_r(\text{SEBAL})| \quad (14)$$

$$ER = \left| \frac{ET_r(\text{Penman Monteith}) - ET_r(\text{SEBAL})}{ET_r(\text{Penman Monteith})} \right| \cdot 100 \quad (15)$$

Para Bezerra *et al.* (2008), os valores estimados para serem considerados ótimos devem apresentar erros relativos abaixo de 10%, considerando que os

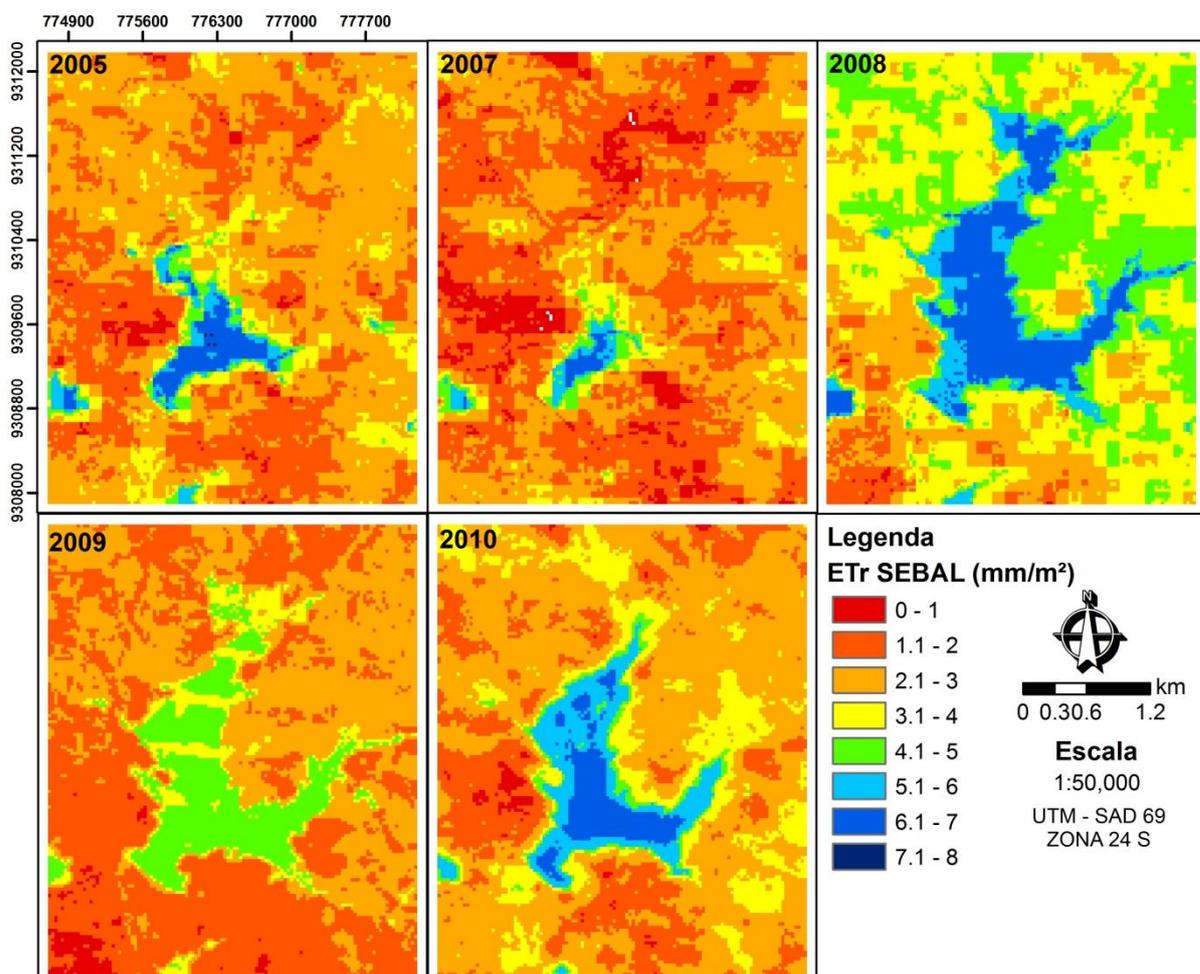
valores obtidos pelos dois métodos, analisados comparativamente, apresentaram-se muito próximos, e portanto a diferença entre eles é considerada aceitável.

Além da validação foi aplicada, a partir do *software* STATISTICA, estatística descritiva para os valores dos pixels dos mapas de evapotranspiração real diária, a fim de visualizar tendências de medida central e de dispersão dentro da variabilidade espacial e temporal para a variável em estudo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 13 apresenta a dinâmica temporal da variabilidade espacial da evapotranspiração real diária (ET<sub>r</sub>) estimada pelo SEBAL.

**Figura 13:** Mapa temático da variação espacial e temporal da evapotranspiração real diária para o entorno do reservatório Dourado (Currais Novos/RN).



As áreas de superfície que apresentaram valores de ETr menores que 1,0 mm.dia<sup>-1</sup> correspondem as áreas de solo exposto, enquanto a vegetação nativa de Caatinga muito rala e sem folhas obtiveram valores variando entre 1,0 e 3,0 mm.dia<sup>-1</sup>, já a vegetação de Caatinga mais densa apresentou valores da ordem de 3,0 a 5,0 mm.dia<sup>-1</sup>, sendo os valores mais elevados para o período de maior precipitação. Os valores acima de 5 mm.dia<sup>-1</sup> compreendem a área do reservatório Dourado, correspondendo ao processo de evaporação da lâmina d'água exposta à radiação solar incidente.

Esses valores foram semelhantes aos encontrados por Silva *et al.* (2012), que obtiveram ETr variando entre 0,6 e 1,4 mm.dia<sup>-1</sup> para áreas de sequeiro no semiárido paraibano.

A variabilidade sazonal dos valores obtidos com a estimativa pelo SEBAL, conforme figura acima, foram coerentes com os dados de temperatura do ar, umidade relativa, precipitação e radiação global medidos em estação meteorológica, e por isso, esperados para a área com cobertura vegetal de Caatinga. 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, que possui pixels de 30x30 m.

Considerando ainda a variação sazonal 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 (ver 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 o desenvolvimento da biomassa verde da vegetação de Caatinga no período chuvoso.

A imagem de 2010 apresentou valores um pouco mais elevados em relação às imagens de 2005, 2007 e 2009, o que pode ser justificado pela alto índice pluviométrico no mês de junho de 2010 (ver Figura 2), aumentando os valores de ETr no entorno do reservatório Dourado, como visto na Figura 13, o que pode ser associado ao escoamento superficial das águas para essa região, que situa-se em locais de cotas menores.

As imagens de 2005 e 2007 apresentaram valores baixíssimos de ETr 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.

Concordando com esses resultados, Bezerra (2013) afirma que nos ambientes semiáridos a dinâmica sazonal da variação da área foliar e os eventos de precipitação durante os ciclos de estiagem, associado a radiação solar global, apresentam influência, tanto no aquecimento da superfície, como no processo de evapotranspiração da superfície vegetada ou não. Essa afirmação possibilita concluir que devido ao elevado déficit hídrico promovido pelo regime de distribuição temporal irregular de chuvas, os maiores valores de ETr foram registrados no período de inverno, decorrente da disponibilidade hídrica neste período e ao processo de resiliência natural da biomassa da vegetação de Caatinga.

Durante o ano de 2009, apesar do índice pluviométrico ter ocorrido acima da média, a imagem desse ano apresentou resultados médios dentro dos padrões da vegetação de Caatinga para período de estiagem, conforme pode ser visto na Tabela 12, comparando-as com as imagens de 2005 e 2007. Esse comportamento é fruto da má distribuição de chuvas durante o ano (ver Figura 2), e no caso da imagem de 2009, em específico, devido às condições climáticas descritas na Tabela 10, mais precisamente pelo fato da radiação ter sido menor comparada as radiações das outras imagens, devido às condições atmosféricas estarem sob influência de umidade provocada pela precipitação de 1,2 mm no dia da imagem, ocasionando valores menores de ETr, inclusive na área do reservatório Dourado (Figura 13).

**Tabela 12:** Valores estatísticos descritivos aplicados sobre os dados exportados das imagens de ETr resultantes 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

Nota: **N** é o Número de pixels; **Med.** é a Mediana (mm/dia); **Mín.** é o valor Mínimo (mm/dia); **Máx.** é o valor Máximo (mm/dia); **Var.** é a Variância; **DP** é o Desvio Padrão; e **CV** é o 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 um padrão no comportamento espectral das áreas, onde a distribuição espacial dos valores de evapotranspiração real diária nas imagens não variou muito na área de entorno do reservatório Dourado, como pode ser vista na Figura 13.

As maiores dispersões dos valores de evapotranspiração real diária ocorreram nas imagens 2008 e 2010, quando os períodos apresentaram maior disponibilidade hídrica devido a maior distribuição de chuvas nos meses de junho e julho (ver Figura 2), nesse caso havendo um comportamento mais variado espacialmente entre as diversas coberturas do solo, sendo solo exposto, vegetação de Caatinga densa e Caatinga rala.

Assim como observado por Arraes *et al.* (2012), as maiores variações interanual das componentes do balanço de energia foram observadas na área com vegetação nativa densa, provavelmente como resultado da rápida resposta da vegetação as 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 imagens 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 devido às condições de umidade da atmosfera em 2009, ocasionando os reduzidos valores de desvio padrão e média de ETr para as respectivas imagens.

A Tabela 13 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 Penman-Monteith/FAO, de acordo com Allen *et al.* (1998). Os erros relativos foram muito superiores a 10%, valor considerado por Bezerra *et al.* (2008) como de boa concordância entre os valores estimados pelos dois modelos que estão sendo comparados.

**Tabela 13:** Resultados da validação das estimativas da ETr diária pelo SEBAL a partir dos valores obtidos pelo método de Penman-Monteith/FAO.

Imagem (Data)	Dia do ano	ETr	ETr	Erro	Erro
		(Penman-Monteith)	SEBAL	Absoluto	Relativo
		mm/dia	mm/dia	mm/dia	(%)
13/07/2005	194	6,53	3,14	3,39	51,92
19/07/2007	200	6,23	2,46	3,77	60,51
19/06/2008	171	4,65	3,37	1,28	27,57
08/07/2009	189	5,35	1,97	3,38	63,16
09/06/2010	160	5,70	3,75	1,95	34,25

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 no semiárido cearense, 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. Nesse caso, não foi possível determinar com precisão os valores da evapotranspiração real diária da acerola pelas imagens processadas, sendo essa área de cultivo escolhida para validar a estimativa dessa variável pelo SEBAL.

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, não foi possível validar as estimativas do SEBAL para área, visto que os valores da validação não foram satisfatórios e para isso será necessário ajustar as deficiências citadas anteriormente. Contudo, isso não significa que o algoritmo não tenha apresentado boas estimativas para a região, já que os valores foram coerentes com os esperados diante da variabilidade sazonal dos dados da estação meteorológica convencional, e as estimativas por Penman-Monteith utilizou dados aquém do necessário.

## CONCLUSÕES

A imagem de 2008 foi a que apresentou os maiores valores de ETr devido a maior distribuição das chuvas no decorrer do ano, considerando que as imagens usadas foram todas nos meses de junho e julho, período onde as precipitações começam a diminuir na região.

A imagem cuja estimativa obteve menor erro absoluto e relativo foi aquela do período citado acima, já que a área da acerola obteve valores subestimados referentes a interferências da vegetação de Caatinga circunvizinha, que apresentou valores maiores de evapotranspiração durante o período com chuvas, quando desenvolveu sua biomassa verde.

Apesar da validação não ter atingido o conceito excelente, 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.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 279 p., 1998. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

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 de; SILVA, B.B. da. Dinâmica do balanço de energia sobre o açude Orós e suas adjacências. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 1, p. 119-127, jan.-mar., 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.

BASTIAANSSEN, 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.

BEZERRA JÚNIOR, J.G.O.; SILVA, N.M. da. Caracterização geoambiental da microrregião do seridó oriental do Rio Grande do Norte. **Holos**, ano 23, v.2, 2007.

BEZERRA, J.M. **Estimativa da evapotranspiração real para área de caatinga utilizando SEBAL**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 77 p, 2013.

MARTINS NETO, D.; BEZERRA F.M.L.; COSTA R.N.T. 1998. 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, 1998. p. 55-57.

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

SILVA, B.B.; BRAGA, A.C.; BRAGA, C.C.; OLIVEIRA, L.M.M. de; GALVÍNCIO, J.D.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Evapotranspiração e estimativa da água consumida no perímetro irrigado do semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.9, p.1218-1226, set. 2012.

TEIXEIRA, A.H. de C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated crops and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1287-1319, 2010.

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

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A área apresentou dificuldades para a disponibilidade de imagens aplicáveis ao modelo devido a grande formação de nuvens na região, que é cercada por formações montanhosas, provocando chuvas orográficas. Nesse contexto as imagens disponíveis para ponto/órbita 215/64 são limitadas para uma possível parametrização das estimativas de evapotranspiração real diária pelo SEBAL, portanto não favorecendo à uma validação mais acurada para o referido modelo. Isso se agrava pela falta de uma série histórica de dados medidos em estação meteorológica na área em estudo.

Apesar da diversidade de atividades praticadas no entorno do reservatório Dourado, o comportamento da cobertura vegetal de Caatinga prevaleceu, por motivos espaciais, ou seja, as ocupações não apresentam áreas grandes o suficiente, o que limita a estimativa precisa desses pixels pela imagem do TM/Landsat-5, que possui resolução espacial 30x30m.

Com isso, a aplicação do SEBAL para regiões heterogêneas com pequenas áreas de ocupação da superfície se torna limitada com a utilização desse sensor orbital. Nesse caso, o TM/Landsat-5 não detectou com precisão os valores estimados para área de cultivo de acerola, utilizada para validação deste estudo, demonstrando a necessidade de utilização de sensores orbitais com maior resolução espacial.

No entanto, o SEBAL apresentou eficiência e confiabilidade nas estimativas de todas as variáveis (variáveis biofísicas, balanço de radiação e energia) envolvidas no processo, mostrando a viabilidade técnica e econômica da utilização do algoritmo em regiões semiáridas, com fins de monitoramento ambiental, objetivando a dinâmica sazonal e espacial dos recursos naturais presentes sobre a superfície terrestre, possibilitando a espacialização dos dados pontuais de estações meteorológicas convencionais.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 279 p., 1998. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

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.

ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R. A landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. **Irrigation and Drainage Systems**, Dordrecht, v. 19, p. 251-268, 2005.

ARAÚJO, J.C. Assoreamento em reservatórios do semiárido: modelagem e validação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, p. 38-56, 2003.

BASTIAANSEN, W.G.M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate**. 1995. 272 p. Tesis, (PhD Dissertation - CIP Data Koninklijke Bibliotheek), Den Haag, 1995.

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.

BASTIAANSEN, W.G.M.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across Indus Basin, Pakistan. **Agriculture Ecosystems & Environments**, v. 94, p. 321-340, 2003.

BEZERRA, M. V. C. **Balço de Energia em Áreas Irrigada Utilizando Técnicas de Sensoriamento Remoto**. 108f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2004.

BEZERRA, B.G. **Obtenção da evapotranspiração diária no Cariri Cearense utilizando imagens Landsat 5-TM e o algoritmo SEBAL**; 135 f. Dissertação

(Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

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.

BEZERRA, M. V. C.; SILVA, B. B. DA; BEZERRA, B. B. Avaliação dos efeitos atmosféricos no albedo e NDVI obtidos com imagens de satélite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.7, p.709–717, 2011.

BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; THOMSEM, A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. **Remote Sensing of Environmental**, New York, v. 79, p. 329-343, 2002.

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

DINGMAN, S.L. **Physical hydrology**. Long Grove: Prentice Hall, 600p., 2002.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. 2 ed. Rome: FAO, 1977, 179 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).

DROOGERS, P.; BASTIAANSEN, W.G.M. Irrigation performance using hydrological and remote sensing modeling. **Journal and Irrigation and Drainage Engineering**, v. 128, p. 11-18, 2002.

DURAND, B.J., GONDIM, R.S., SILVA, E.J. da., MOREIRA, L.C.J., TEIXEIRA, A.S. dos. Estimativa da evapotranspiração real utilizando o algoritmo SEBAL e imagens do satellite Landsat 7. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABRH, 2007.

FRENCH, A.N. JACOB, F.; ANDERSON, M.C.; KUSTAS, W.P.; TIMMERMANS, W.; GIESKE, A.; SU, Z.; SU, H.; McCABE, M.F.; LI, F.; PRUEGER, J.; BRUNSELL, N. Surface energy fluxes with the advanced Spaceborne thermal Emission and Reflectance Radiometer (ASTER) at the Iowa 2002 SMACEX site (USA). **Remote Sensing of Environment**, v. 99, p. 55-65, 2005.

GOMES, H.B. **Balanço de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no estado de São Paulo mediante imagens orbitais**. Tese de Doutorado em Meteorologia, UFCG, Campina Grande – PB. 2009.

HAFEEZ M.M.; CHEMIM, Y.; VAN DE GIESEN, N.; BOUMAN, B.A. M Field Evapotranspiration in Central Luzon, Philippines, using Different Sensors: Landsat 7 ETM+, Terra Modis and Aster. In: SIMPOSIUM ON GEOSPATIAL THEORY, PROCESSING AND APPLICATIONS, 2002, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa: Canadian Institute of Geomatics, p. 1-18, 2002.

HEMAKUMARA, H.M.; CHANDRAPALA, L.; MOENE, A.F. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetations areas measured from large aperture scintilometer. **Agriculture Water Manegement**, v. 58, p. 109-112, 2003.

JACOB, F.; OLIOSO, A.; GU, X.; SU, Z.; SEGUIN, B. Mapping surface fluxes using airborne visible, near infrared, thermal infrared remote sensing and a spatialized energy balance model. **Agronomie**, v. 22, p. 669-680, 2002.

JIA, L.; SU, Z.; VAN DER HURK, B.; MONENTI, M.; MOENE, A.; DE BRUIM, H.A.R. Estimation of sensible heat flux using the Surface Energy Balance System (SEBS) and ATSR measurements. **Physics and Chemistry of the Earth**, Amsterdam, v. 28, n. 1/3, p. 75-88, 2003.

KIMURA, R.L.B.; FAN, J.; TAKAYAMA, N.; HINOKIDANI, O. Evapotranspiration estimation over the river basin of the Loess Plateau of China based on remote sensing. **Journal of Arid Environments**, n. 68, p. 53-65, 2007.

KITE, G.W.; DROOGERS, P. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 3-18, 2000.

KRAMER, J.W. **Developing evapotranspiration Data for Idaho's Trasure Valley using the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)**. Idaho: Idaho Departament of Water Resources, 34p. 2002.

LAGOUARDE, J.P.; JACOB, F.; GU, X.F.; OLIOSO, A.; BONNEFOND, J.M.; KERR, Y.; MCANENEY, K.J.; IRVINE, M. Spazialization of sensible heat flux over a heterogeneous landscape. **Agronomie**, v. 22, p. 627-633, 2002.

MOHAMED, Y.A.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; SAVENNIJE, H.H.G.; Spatial variability of evaporation and moisture storage in the swamps of the upper Nile studied by remote sensing techniques. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 289, n. 1/4, p. 145-164, 2004.

MOREIRA, L.C.J.; **Estimativa da evapotranspiração horária usando o algoritmo SEBAL e imagens do Landsat 5-TM**. Monografia (Agronomia), Universidade Federal do Ceará. 91 p, 2007.

MOREIRA, L.C.J. **Evapotranspiração da melancia irrigada por meio do sebal, balanço hídrico e correlações turbulentas**. Dissertação de Mestrado. Fortaleza. UFC, 94 p, 2009.

NORMAN, J.M.; KUSTAS, W.P.; HUMES, K.S. Two source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observation of directional radiometric surface temperature. **Agriculture and Forest Meteorology**, Oxford, v. 77, p. 263-293, 1995.

OKI, T.; KANAE, S. Global hydrological cycles and world water resources. **Science**, Washington, DC, v. 313, p. 1068-1072, 25 aug. 2006.

OLIVEIRA, L.M.M. de.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ANTONINO, A.C.D.; SILVA, B.B. da.; MACHADO, C.C.C.; GALVÍNIO, J.D. Análise quantitativa de parâmetros biofísicos de bacia hidrográfica obtidos por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.9, p.1209-1217, set. 2012.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London**, v.A193, p.120-146, 1948.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia Fundamentos e Aplicações Práticas**. Guaíba-RS: Livraria e Editora Agropecuária Ltda, 2002.

ROERINK, G.J.; SU, Z.; MENENTI, M.A Simple remote sensing algorithm to estimates the surface energy balance. **Physics and Chemistry of the Earth (B)**, Amsterdam, v. 25, p. 147-157, 2000.

SAMARASINGHE, G.B. Growth and yields of Sri Lanka's major crops interpreted from public domain satellites. **Agriculture Water Management**, v. 58, p. 145-157, 2003.

SILVA, B.B. da; LOPES, G.M.; AZEVEDO, P.V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, p. 243-252, 2005.

SILVA, B.B. da; BEZERRA, M.V.C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM – Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, SP, v. 14, p. 1-10, 2006.

SILVA, R.M. Entre o combate à seca e a convivência com o semiárido: políticas públicas e transição paradigmática. **Revista Econômica do Nordeste**. Fortaleza, v. 38, n. 3, p. 466-485, 2007.

SILVA, B.B.; BRAGA, A.C.; BRAGA, C.C.; OLIVEIRA, L.M.M. de; GALVÍNCIO, J.D.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Evapotranspiração e estimativa da água consumida no perímetro irrigado do semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.9, p.1218-1226, set. 2012.

THORNTHWAITE, C.W. Na approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v.38, p.55-94, 1948.

TIMMERMANS, W.J.; MEIJERINK, A.M.J. Remotely sensed actual evapotranspiration: implications for groundwater in Botswana. **International Journal of Applied Earth Observations**, v. 1, Issue 3-4, p. 222-233, 1999.

VALADÃO, C.E.A. ; SANTOS, A.S.; JESUS, E.S.; BARRETO, N.JC.; CORREIA FILHO, W.L.F.; SCHMIDT, D.M.; SILVA, B.K.N.; OLIVEIRA, P.T.; PINHEIRO, J.U.; MATTOS, A. Classificação Climática da Microrregião do Seridó/RN. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 16., 2010, Belém. **Anais...** Belém: SBMET, 2010.

VAREJÃO-SILVA, M.A. **Meteorologia e climatologia**. Versão digital 2 – Recife, 449 p., 2006.

WANG, J.; MA, Y.; MENENTI, M.; BASTIAANSEN, W.G.M.; MISTSUTA, Y. The scaling-up of processes in the heterogeneous landscape of HEIFE with the aid of satellite remote sensing. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v.73, p. 1235-1244, 1995.

ZWART, S.J.; BASTIAANSEN, W.G.M. SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems. **Agricultural Water Management**, v. 89, p. 287-296, 2007.