

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

# **METEOROLOGIA**



## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Jéssica Gomes Fontes Nery**

**OBTENÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO POR  
IMAGENS MULTIESPECTRAIS NO PERÍMETRO  
IRRIGADO DE SÃO GONÇALO – PB E ESTAÇÃO  
ECOLÓGICA DO SERIDÓ-RN**

**Campina Grande, Setembro de 2018**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA



## **DISSERTAÇÃO**

**JÉSSICA GOMES FONTES NERY**

**OBTENÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO POR IMAGENS  
MULTIESPECTRAIS NO PERÍMETRO IRRIGADO DE SÃO GONÇALO – PB  
E ESTAÇÃO ECOLÓGICA DO SERIDÓ-RN**

CAMPINA GRANDE, PB

2018

**JÉSSICA GOMES FONTES NERY**

**OBTENÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO POR IMAGENS  
MULTIESPECTRAIS NO PERÍMETRO IRRIGADO DE SÃO GONÇALO – PB  
E ESTAÇÃO ECOLÓGICA DO SERIDÓ-RN**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

**Área de concentração:** Agrometeorologia e Micrometeorologia

**Subárea:** Sensoriamento Remoto Aplicado

**Orientador:** Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

CAMPINA GRANDE, PB

2018

N456

Nery, Jéssica Gomes Fontes.

Obtenção do saldo de radiação por imagens multiespectrais no perímetro irrigado de São Gonçalo-PB e estação ecológica do Seridó-RN / Jéssica Gomes Fontes Nery. – Campina Grande, 2019.  
75 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva".  
Referências.

1. Albedo. 2. Torre micrometeorológica. 3. Semiárido brasileiro. I. Silva, Bernardo Barbosa da. II. Título.

CDU 551.521.13(043)

JÉSSICA GOMES FONTES NERY

OBTENÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO POR IMAGENS MULTIESPECTRAIS  
NO PERÍMETRO IRRIGADO DE SÃO GONÇALO-PB E ESTAÇÃO ECOLÓGICA  
DO SERIDÓ-RN.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/09/2018

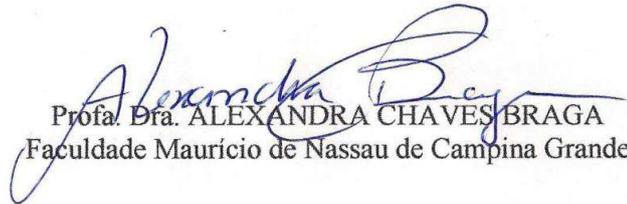
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. CELIA CAMPOS BRAGA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. ALEXANDRA CHAVES BRAGA  
Faculdade Mauricio de Nassau de Campina Grande

*Aos meus pais, meus irmãos, meu  
esposo e a razão da minha vida e  
existência meu filho Murilo!*

**Dedico**

*“Na corrida dessa vida é preciso entender que você vai rastejar, que vai cair, vai sofrer.*

*E a vida vai lhe ensinar que se aprende a caminhar e só depois correr.”*

**Bráulio Bessa**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar força, saúde e coragem para superar os obstáculos enfrentados na minha caminhada, por me conceder persistência para conclusão desse trabalho.

Aos meus pais Alberóni e Maria, em especial a minha mãe que nunca permitiu que desistisse que me deu apoio no momento mais preciso da minha vida.

Aos meus irmãos Jerceanne, Jeyffeson, Natielly, a minha sobrinha e afilhada Sofia, vocês são meu suporte nessa vida.

Ao meu esposo e companheiro Fellype Nery por todo o amor, carinho, respeito e paciência. Por está sempre presente, nessa caminhada árdua da vida.

Aos meus sogros Francisca e Neto, as minhas cunhadas Maria e Clara, a minha sobrinha Maria Heloísa vocês são parte desse trabalho.

Aos meus avós que estarão sempre vivos em minha memória Alaíde (*in memoriam*), João Batista (*in memoriam*), Elídia Fontes (*in memoriam*) e Francisco Fontes.

Ao Prof. Bernardo Barbosa pela orientação, compreensão e ensinamentos.

Ao Prof. Carlos Costa pelo fornecimento dos dados.

A minha banca examinadora Prof<sup>ª</sup>. Dra. Célia Campos, e a Prof<sup>ª</sup>. Dra. Alexandra Braga pelas contribuições e sugestões para enriquecimento do trabalho.

A Danielle Chaves por ser luz, por me descontraír e ensinar que a vida vai além da academia.

Aos amigos que foram além da graduação Jordanna, Mayara e Karlla vocês são pessoas importantes e fundamentais nessa caminhada.

Aos amigos conquistados na pós-graduação pelos ensinamentos, companheirismo e dedicação em especial a Ianne, Celina, Maurício, Jamilly, André e Fernanda.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, pelos ensinamentos, atenção, dedicação e disposição.

A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	ix
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	xii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	xiii
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	xiv
<b>RESUMO.....</b>	xvi
<b>ABSTRACT.....</b>	xvii
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	1
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	5
2.1 Sensoriamento Remoto.....	5
2.2 Satélite Landsat.....	6
2.3 Landsat 8 OLI/TIRS.....	7
2.4 MODIS/TERRA.....	8
2.5 Saldo de radiação.....	9
2.6 Albedo de superfície.....	11
2.7 Temperatura de superfície.....	12
2.8 Índices de vegetação.....	13
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	15
3.1 Área de estudo.....	15
3.2 Dados meteorológicos.....	17
3.3 Dados orbitais.....	18

3.3.1	Imagens OLI/TIRS Landsat 8.....	18
3.3.2	Imagens MODIS/TERRA.....	20
3.4	Tratamentos dos dados.....	23
3.5	Metodologia empregada.....	23
3.5.1	Radiância espectral.....	24
3.5.1.1	Landsat 8 OLI/TIRS.....	24
3.5.2	Reflectância planetária.....	25
3.5.2.1	Landsat 8 OLI/TIRS.....	25
3.5.2.2	Landsat 8 OLI (cômputo dos pesos).....	25
3.5.3	Albedo no topo da atmosfera.....	26
3.5.3.1	Landsat 8 OLI/TIRS.....	26
3.5.4	Albedo na superfície.....	26
3.5.4.1	Landsat 8 OLI/TIRS.....	26
3.5.4.2	MODIS/TERRA.....	27
3.5.5	Índices de vegetação.....	27
3.5.5.1	NDVI.....	28
3.5.5.2	SAVI.....	28
3.5.5.3	IAF.....	29
3.5.6	Emissividade da superfície.....	29
3.5.7	Temperatura de superfície.....	29
3.5.8	Radiação de onda longa emitida pela superfície.....	30
3.5.9	Radiação de onda curta incidente na superfície.....	30

3.5.10 Radiação de onda longa emitida pela atmosfera.....	30
3.5.11 Saldo de radiação instantânea na superfície.....	30
3.5.12 Saldo de radiação diário.....	31
3.6 Análise estatística dos resultados.....	31
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>33</b>
4.1 Dados meteorológicos.....	33
4.2 Mapas temáticos do albedo.....	38
4.3 Mapas temáticos do saldo de radiação.....	45
4.4 Validação do saldo de radiação instantâneo.....	51
4.5 Mapas temáticos do saldo de radiação diário.....	56
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1</b> - Esquema dos elementos que compõem o sistema de imagens.....	6
<b>Figura 2</b> - Cronograma da série dos satélites Landsat.....	7
<b>Figura 3</b> - Representação esquemática do saldo de radiação.....	10
<b>Figura 4</b> - Localização da área estudo com destaque para os pontos de coleta de dados.....	16
<b>Figura 5</b> - Torre micrometeorológica contendo sensores para medições dos componentes do balanço de radiação, instalada na caatinga preservada da Estação Ecológica do Seridó (ESEC – ICMBio) em Serra Negra do Norte, RN.....	18
<b>Figura 6</b> - Tiles do sensor MODIS, com destaque para o <i>tile</i> em que se encontra a área de estudo.....	21
<b>Figura 7</b> - Etapas do processamento de obtenção do saldo de radiação à superfície – $R_n$ , para as imagens OLI/TIRS.....	23
<b>Figura 8</b> – Etapas do processamento de obtenção do saldo de radiação à superfície – $R_n$ , para os produtos MODIS.....	24
<b>Figura 9</b> - Ciclo médio mensal das variáveis meteorológicas, temperatura do ar - $T_a$ (°C) e umidade relativa do ar - UR (%), para o ano de 2015.....	34
<b>Figura 10</b> - Ciclo médio mensal das variáveis meteorológicas, temperatura do ar - $T_a$ (°C) e umidade relativa do ar - UR (%), para o ano de 2016.....	36
<b>Figura 11</b> - Mapas temáticos do albedo de superfície obtidos com imagens OLI-Landsat 8 na Torre Micrometeorológica referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2015 (Projeção: geográfica, <i>Datum</i> : WGS 84).....	38
<b>Figura 12</b> - Mapas temáticos do albedo de superfície obtidos com imagens OLI-Landsat 8 no Perímetro Irrigado de São Gonçalo referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2015 (Projeção: geográfica, <i>Datum</i> : WGS 84).....	39

<b>Figura 13</b> - Mapas temáticos do albedo de superfície obtidos com imagens OLI-Landsat 8 na Torre Micrometeorológica referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2016 (Projeção: geográfica, <i>Datum</i> : WGS 84).....	40
<b>Figura 14</b> - Mapas temáticos do albedo de superfície obtidos com imagens OLI-Landsat 8 no Perímetro Irrigado de São Gonçalo referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2016 (Projeção: geográfica, <i>Datum</i> : WGS 84).....	41
<b>Figura 15</b> - Comportamento do albedo de superfície dos produtos MODIS referente aos dias e alvos selecionados para a pesquisa: a) resolução de 250 m ano de 2015; b) resolução de 500 m ano de 2015; c) resolução de 250 m ano de 2016; d) resolução de 500 m ano de 2016.....	43
<b>Figura 16</b> - Mapas temáticos do saldo de radiação ( $Wm^{-2}$ ) obtidos com o OLI/TIRS Landsat 8 na Torre Micrometeorológica referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2015 (Projeção: geográfica, <i>Datum</i> : WGS 84).....	45
<b>Figura 17</b> - Mapas temáticos do saldo de radiação ( $W/m^2$ ) obtidos com o OLI/TIRS Landsat 8 no Perímetro Irrigado de São Gonçalo referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2015 (Projeção: geográfica, <i>Datum</i> : WGS 84).....	46
<b>Figura 18</b> - Mapas temáticos do saldo de radiação ( $Wm^{-2}$ ) dos produtos do OLI/TIRS Landsat 8 na Torre Micrometeorológica referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2016 (Projeção: geográfica, <i>Datum</i> : WGS 84).....	47
<b>Figura 19</b> - Mapas temáticos do saldo de radiação ( $Wm^{-2}$ ) dos produtos do OLI/TIRS Landsat 8 no Perímetro Irrigado de São Gonçalo referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2016 (Projeção: geográfica, <i>Datum</i> : WGS 84).....	48
<b>Figura 20</b> - Comportamento do saldo de radiação instantâneo ( $Wm^{-2}$ ) obtido dos produtos MODIS referentes aos dias e alvos selecionados para a pesquisa: a) resolução de 250 m ano de 2015; b) resolução de 500 m ano de 2015; c) resolução de 250 m ano de 2016; d) resolução de 500 m ano de	

2016.....	50
<b>Figura 21</b> - Representação gráfica dos valores de $R_n$ estimado e medido para os dias em estudo no ano de 2015 para os produtos: a) MODIS, resolução de 250 m; b) MODIS, resolução de 500 m e c) Landsat 8.....	52
<b>Figura 22</b> - Representação gráfica dos valores de $R_n$ instantâneo estimado e medido para os dias em estudo no ano de 2016 para os produtos: a) MODIS, resolução de 250 m; b) MODIS, resolução de 500 m e c) Landsat 8.....	53
<b>Figura 23</b> - Mapas temáticos do saldo de radiação diário ( $Wm^{-2}$ ) obtidos do OLI/TIRS Landsat 8 na Torre Micrometeorológica referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2015 (Projeção: geográfica, <i>Datum</i> : WGS 84).....	56
<b>Figura 24</b> - Mapas temáticos do saldo de radiação diário ( $Wm^{-2}$ ) obtidos do OLI/TIRS Landsat 8 no Perímetro Irrigado de São Gonçalo referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2015 (Projeção: geográfica, <i>Datum</i> : WGS 84).....	57
<b>Figura 25</b> - Mapas temáticos do saldo de radiação diário ( $Wm^{-2}$ ) obtidos do OLI/TIRS Landsat 8 na Torre Micrometeorológica aos dias selecionados para a pesquisa em 2016 (Projeção: geográfica, <i>Datum</i> : WGS 84) .....	58
<b>Figura 26</b> - Mapas temáticos do saldo de radiação diário ( $Wm^{-2}$ ) obtidos do OLI/TIRS Landsat 8 no Perímetro Irrigado de São Gonçalo referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2016 (Projeção: geográfica, <i>Datum</i> : WGS 84).....	59
<b>Figura 27</b> - Representação gráfica do saldo de radiação diária ( $Wm^{-2}$ ): a) produto MODIS resolução de 250 m para o ano de 2015; b) produto MODIS resolução de 500 m para o ano de 2015; c) produto MODIS resolução de 250 m para o ano de 2016; d) produto MODIS resolução de 500 m para o ano de 2016.....	60

## LISTA DE TABELAS

	Página
<b>Tabela 1</b> - Especificação técnicas do sensor MODIS.....	9
<b>Tabela 2</b> - Características de cada banda utilizada dos sensores OLI/TIRS.....	19
<b>Tabela 3</b> - Imagens selecionadas do Landsat 8 para Serra Negra do Norte, RN, no ano de 2015, órbita 215 e ponto 65. Dia de ordem do ano (DOA); ângulo de elevação do Sol (E); distância relativa Terra-Sol (dr); cosseno do ângulo zenital solar (Cos Z).....	19
<b>Tabela 4</b> Imagens selecionadas do Landsat 8 para São Gonçalo, PB, no ano de 2015 e 2016, órbita 216 e ponto 65. Dia de ordem do ano (DOA); ângulo de elevação do Sol (E); distância relativa Terra-Sol (dr); cosseno do ângulo zenital solar (Cos Z).....	20
<b>Tabela 5</b> - Descrição dos produtos MODIS utilizados nesse estudo.....	21
<b>Tabela 6</b> - Dias selecionados para o estudo dos anos de 2015 e 2016, onde DOA é o Dia de Ordem do Ano.....	22
<b>Tabela 7</b> - Erro Médio Absoluto – EMA, Erro Médio Percentual - EMP, Raiz do Erro Quadrático Médio - REQM relacionados aos valores medidos e estimados do albedo para os produtos OLI Landsat 8 e MODIS com resolução de 250 m e 500 m nos anos de 2015 e 2016.....	42
<b>Tabela 8</b> - Erro Médio Absoluto - EMA ( $Wm^{-2}$ ), Erro Médio Percentual - EMP, Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) relacionados aos valores medidos e estimados do saldo de radiação instantâneo para os produtos OLI/TIRS Landsat 8 e MODIS com resolução de 250 m e 500 m nos anos de 2015 e 2016.....	49
<b>Tabela 9</b> - Erro Médio Absoluto - EMA ( $Wm^{-2}$ ), Erro Médio Percentual - EMP, Raiz do Erro Quadrático Médio – REQM ( $Wm^{-2}$ ) relacionados aos valores medidos e estimados do saldo de radiação instantâneo diário para os produtos OLI/TIRS Landsat 8 e MODIS com resolução de 250 m e 500 m nos anos de 2015 e 2016.....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>EOS</b>	Earth Observing System
<b>ETM</b>	Enhanced Thematic Mapper
<b>INMET</b>	Instituto Nacional de Meteorologia
<b>LANDSAT</b>	Land Remote Sensing Satellite
<b>LDCM</b>	Landsat Data Continuity Mission
<b>MODIS</b>	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
<b>MSS</b>	Multispectral Scanner
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration
<b>OLI</b>	Operational Land Imager
<b>Rn</b>	Saldo de radiação instantâneo
<b>SEBAL</b>	Surface Energy Balance Algorithm for Land
<b>TIRS</b>	Thermal Infrared Sensor
<b>TM</b>	Thematic Mapper
<b>UFCG</b>	Universidade Federal de Campina Grande
<b>USGS</b>	United States Geological Survey
<b>UTM</b>	Universal Transverse Mercator

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Albedo da superfície
$\alpha_{\text{Toa}}$	Albedo no topo da atmosfera
Z	Altitude de cada pixel (m)
E	Ângulo de elevação do Sol
$\Sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
S	Constante solar
$K_1$ e $K_2$	Constantes de radiação específicas das bandas termais do Landsat 8 TIRS (banda termal 10, $L_{b10}$ ), extraídos dos metadados
DOA	Dia da Ordem do Ano
$\epsilon_a$	Emissividade atmosférica
$\epsilon_0$	Emissividade da superfície
$\epsilon_{\text{NB}}$	Emissividade na banda termal
K	Graus Kelvin
IAF	Índice de Área Foliar ( $\text{m}^2\text{m}^{-2}$ )
SAVI	Índice de vegetação ajustado aos efeitos do solo
NDVI	Índice de vegetação da diferença normalizada
ND	Número digital (nível de cinza)
$P_o$	Pressão atmosférica instantânea
$R_{s \text{ inc}} \downarrow$	Radiação de onda curta incidente
$R_{ol \text{ atm}} \downarrow$	Radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície

$R_{ol\ emit\ \uparrow}$	Radiação de onda longa emitida pela superfície
$L_{\lambda}$	Radiância monocromática
$R_n$	Saldo de radiação instantâneo
$T_s$	Temperatura da superfície
$T_a$	Temperatura do ar
$Mult_{rad\ b}$ e $Mult_{ref\ b}$	Termo multiplicativo do satélite Landsat 8 OLI para radiância e reflectância, respectivamente
$\tau_{sw}$	Transmissividade da atmosfera
$Add_{rad\ b}$ e $Add_{ref\ b}$	Termo aditivo do satélite Landsat 8 OLI para radiância e reflectância, respectivamente

## RESUMO

O saldo de radiação representa a principal fonte de energia usada pelos processos químicos, físicos, biológicos e meteorológicos à superfície e nas camadas inferiores da atmosfera. O saldo de radiação e suas componentes (radiação incidente e refletida de onda longa e de onda curta) têm aplicações em agricultura, hidrologia, energias renováveis e pesquisa climática. Neste sentido, o objetivo geral deste estudo é estimar o saldo de radiação instantâneo –  $R_n$  e diário –  $R_{n,24h}$  do Perímetro Irrigado de São Gonçalo-PB, Torre Micrometeorológica-RN e áreas com diferentes tipo de uso e ocupação no Semiárido brasileiro, para os anos de 2015 e 2016, utilizando imagens OLI/TIRS - Landsat 8 e produtos MODIS/TERRA. Os produtos MODIS utilizados na pesquisa foram MOD09GA (reflectância, ângulo solar), MOD09GQ (reflectância) e MOD11A1 (temperatura de superfície, horário da passagem do satélite) com resoluções de 250 m, 500 m e 1000 m. Foram selecionadas imagens sem presença de nuvens nos anos de 2015 e 2016, sendo 9 e 15 imagens do satélite OLI/TIRS Landsat-8 e 79 e 61 dos produtos MODIS, para os referidos anos. A validação dos resultados foi realizada com dados de uma torre micrometeorológica, localizada em área de caatinga preservada, situadas no município de Serra Negra do Norte, RN na Estação Ecológica do Seridó (ESEC-ICMBio). Os valores de albedo e saldo de radiação instantâneo com resolução de 250 m proporcionaram um resultado mais satisfatório do que o albedo e o saldo de radiação instantâneo calculado pelas imagens Landsat-8. Salientando-se, portanto, que o saldo de radiação diário apresentou melhor resultado com imagens OLI/TIRS Landsat 8 comparados com os obtidos pelo MODIS nas resoluções de 250 m e 500 m, para ambos os anos.

**Palavras-chaves:** albedo, torre micrometeorológica, semiárido brasileiro

## ABSTRACT

The radiation balance represents the main source of energy used by the chemical, physical, biological and meteorological processes in the surface and in the lower layers of the atmosphere. The balance of radiation and its components (incident and reflected of long wave and shortwave radiation) have applications in agriculture, hydrology, renewable energies and climate research. Therefore, the aim of this study is to estimate the instantaneous radiation balance –  $R_{n,ins}$  and daily –  $R_{n,24h}$  of the irrigated perimeter of São Gonçalo, Tower Micrometeorological-RN and surrounding areas with different types of use and occupation in the Brazilian semi-arid, for the years 2015 and 2016, using OLI/TIRS-Landsat 8 images and MODIS/TERRA products. The MODIS products used in the research were MOD09GA (reflectance and sun angle), MOD09GQ (reflectance) and MOD11A1 (surface temperature, time of satellite passage) with resolutions of 250m and 500m. Images without the presence of clouds from the years 2015 and 2016 were selected, with 9 17 images from the OLI/TIRS Landsat-8 satellite and 79 and 61 from the MODIS products, for mentioned years of study. The validation of the results was performed with data from a micrometeorological tower, located in an area of preserved caatinga, located in the city of Serra Negra do Norte, RN in the Seridó Ecological Station (ESEC-ICMBio). The values of albedo and instantaneous radiation balance with resolution of 250m provided more satisfying results than the albedo and radiation balance calculated by the Landsat 8 images. It should be noted, therefore, that the daily radiation balance presented a better result with Landsat OLI / TIRS images 8 compared to those obtained by MODIS at resolutions of 250 m and 500 m for both years.

**Keywords:** albedo; micrometeorological tower; brazilian semi-arid

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos são notáveis as problemáticas enfrentadas pela região Nordeste, em decorrência das irregularidades do seu regime pluvial, que atingem principalmente a agricultura de sequeiro e sua hidrologia. O nosso planeta tem disponível cerca de 1.400 milhões de quilômetros cúbicos de água, e apenas 2,5% desse volume é de água doce, disponível em geleiras, águas subterrâneas, lagos e rios. Da água doce consumida pela humanidade, cerca de 70% são utilizadas na agricultura irrigada, que é uma importante alternativa de desenvolvimento do Semiárido brasileiro (BRAGA, 2014; SOUZA, 2007). Diante disto, deve-se ter uma atenção especial com o monitoramento dos recursos naturais, principalmente no aspecto hídrico.

Desde meados de 1970, que imagens do satélite Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*) vêm sendo utilizadas como subsídio a pesquisas relacionadas ao mapeamento do uso do solo e cobertura vegetal, planejamento territorial e pesquisas de prospecção mineral. Recentemente, existem diversas aplicações utilizando as imagens do satélite Landsat, por exemplo: monitoramento na qualidade de água (PRADO & NOVO, 2007), recarga de aquíferos (ALBHAISI et al., 2013), mudanças climáticas (VIEIRA et al., 2013), recessão e movimento de geleiras (AHLERT & SIMÕES, 2009; JOAQUIM et al., 2011), diversidade de espécies (ROCHA et al., 2007), saúde dos recifes de corais (RUDORFF & GHERARDI, 2008), tipos de uso e ocupação do solo (FUJACO et al., 2010), taxas de desmatamento, e gestão de recursos agronômicos e florestais (PHUA et al., 2008).

As mudanças causadas nos cenários da vegetação natural da região Nordeste estão ligadas a vários fatores, dentre eles os antrópicos, mediante o desmatamento indevido, o crescimento urbano, o manejo inadequado da agricultura irrigada, à intensiva prática agropecuária, dentre outras atividades (SILVA. J, 2016).

Com isso, ficam evidentes as alterações causadas no clima local da região como consequência das trocas de energia e massa resultantes das mudanças no uso e ocupação da terra. Algumas variáveis biofísicas retratam bem tais mudanças, a exemplo do albedo, da temperatura da superfície, e diversos índices de vegetação, como o índice de diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e índice de área foliar (IAF). Outra variável de destaque e que tem grande importância na determinação das referidas trocas de calor e massa entre a superfície e atmosfera, é o saldo de radiação, que depende bastante do comportamento desses parâmetros biofísicos (SILVA et al., 2005ab;

RODRIGUES et al., 2009; SILVA et al., 2010; ARRAES et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; GUSMÃO et al., 2012; BEZERRA et al., 2014; SILVA et al., 2016; SOUZA et al., 2016).

O saldo de radiação é um componente fundamental para a estimativa do balanço de energia na superfície, previsão do tempo e aplicação na agricultura. Ele representa a energia disponível aos processos físicos e biológicos que ocorrem na superfície terrestre, e representa a síntese de um processo, o balanço de radiação, que consiste na contabilização dos fluxos radiativos de onda curta e longa que atingem a superfície do nosso planeta, e que emergem dessa mesma superfície em forma de onda curta e longa (KLEIN et al., 1977; WELIGEPOLAGE et al., 2005). O principal fator ambiental que pode ocasionar alterações nos valores do saldo de radiação, influenciando diretamente nas radiações de ondas curta e longas são: latitude, altitude, época do ano, cobertura de nuvens, composição espectral da radiação incidente, tipo de cobertura vegetal, disponibilidade hídrica no solo, temperatura da superfície e da atmosfera, déficit de vapor na atmosfera, sendo um dos grandes fatores de influência nas trocas de energia entre a biosfera e a atmosfera (NASCIMENTO, 2012).

Estima-se o saldo de radiação de duas maneiras. No método convencional são usados sensores específicos que podem ser instalados em mastros e/ou torres micrometeorológicas. Alternativamente, podem-se empregar imagens de satélite multiespectrais que possibilitem a determinação do albedo e possuam banda termal. Nas torres micrometeorológicas os sensores usado para medir a radiação solar incidente e também refletido são denominados de radiômetros e a faixa espectral de suas medidas cobre a região da onda curta. Já os sensores usados para medir a radiação de onda longa proveniente da atmosfera e da superfície são chamados de pirgeômetros.

Um problema que tem sido reportado é o de que as estações meteorológicas usualmente não são equipadas com esses sensores. Outro problema reside no fato de que as medições obtidas cobrem uma área circular com raio dez vezes maior que a altura do instrumento. As imagens de sensores orbitais, por sua vez, podem reunir milhões de pixels e têm custo muito baixo, e que basicamente compreende a aquisição de um bom software de tratamento de imagem, já que muitas imagens são obtidas gratuitamente em sites de órgãos governamentais específicos. No entanto, há de se registrar que um grande problema enfrentado com o uso de imagens multiespectrais para se quantificar o saldo de radiação

reside nos impedimentos causados com a presença de nuvens e a baixa resolução temporal dos sensores de alta resolução espacial.

Tendo em vista, essas limitações e com o objetivo de estimar as diferentes componentes do balanço de radiação, utiliza-se nessa pesquisa o Sensoriamento Remoto, que vem sendo muito empregado no Brasil e no exterior, principalmente na região Nordeste, através das técnicas baseadas no emprego de imagens de satélite Landsat e outras plataformas (SILVA et al., 2005a; ALLEN et al., 2007; RODRIGUES et al., 2009; SILVA et al., 2010; ARRAES et al., 2012; LIMA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; BEZERRA et al., 2014; GIONGO & VETTORAZZI, 2014; OLIVEIRA et al., 2015; SILVA et al., 2016). A maior vantagem no uso do sensoriamento remoto nas estimativas do balanço de radiação e dos fluxos de energia é permitir a obtenção sinótica e em escala regional dessa importante variável biofísica, observando as especificidades de cada ponto da superfície (BASTIAANSSEN, 1995; SILVA et al., 2005a).

As trocas de calor e massa que se processam entre a superfície do nosso planeta e a porção inferior da atmosfera podem ser substancialmente alteradas com resultado das mudanças no uso e ocupação da terra. Nesse sentido, pretende-se com a pesquisa avaliar, por meio de técnicas de sensoriamento remoto orbital, como essas mudanças se processam. Como se sabe, em vários projetos irrigados do planeta tais mudanças são capazes de comprometer a fertilidade do solo com sua salinização, que resulta em aumento no albedo e temperatura da superfície. Essas alterações podem resultar em mudanças climáticas localmente e, portanto, deve-se investigar se imagens de média resolução são capazes de detectá-las (SILVA et al., 2011).

Considerando-se as apresentações citadas acima, o objetivo geral deste estudo é estimar o saldo de radiação instantâneo –  $R_n$  e diário –  $R_{n,24h}$  do Perímetro Irrigado de São Gonçalo-PB, Torre Micrometeorológica-RN e áreas com diferentes tipo de uso e ocupação no Semiárido brasileiro, para os anos de 2015 e 2016, utilizando imagens OLI/TIRS - Landsat 8 e produtos MODIS/TERRA. Como objetivos específicos, a pesquisa se propõe avaliar:

- O albedo da superfície obtido com diferentes resoluções espacial e diferentes produtos MODIS;
- O saldo de radiação estimado com imagens OLI/TIRS - Landsat 8 e MODIS/TERRA, sobre diferentes alvos na região de estudo;

- E também a validar o  $R_n$  estimado pela metodologia proposta neste estudo, com o  $R_n$  calculado através de dados medidos na torre micrometeorológica.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Sensoriamento Remoto (SR)**

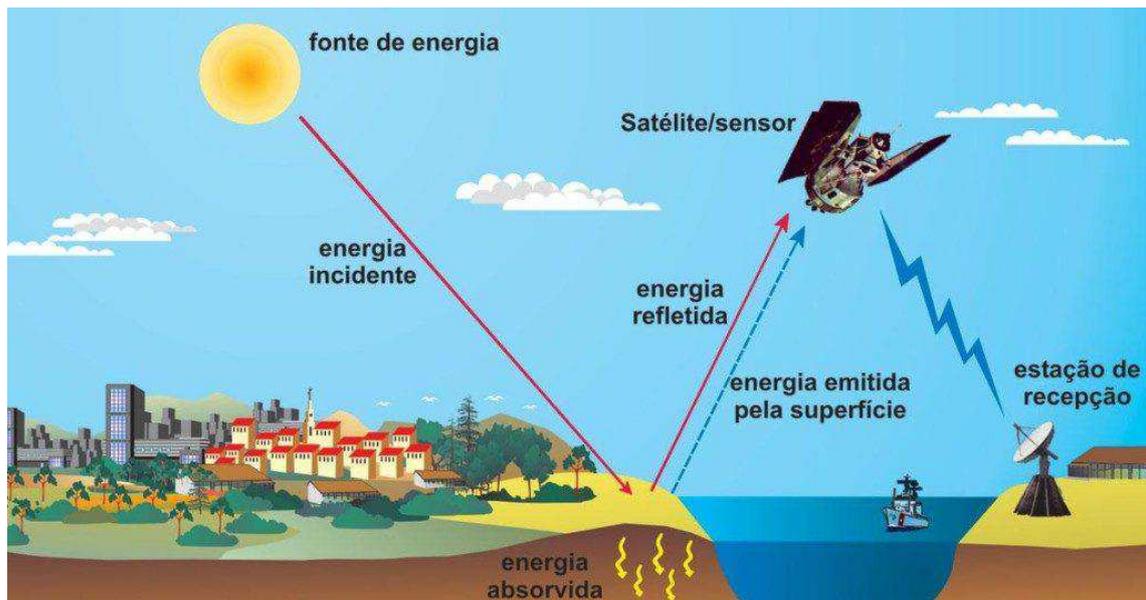
O Sensoriamento Remoto tem se tornado uma ferramenta de grande importância nas pesquisas, estudos e monitoramento de diversos fenômenos ambientais, já que o mesmo está consolidado em diversos ramos da ciência. Com imagens polissêmicas e recursos que permitem realizar levantamentos periódicos tornando-se possível a aplicação em diferentes temáticas, como o monitoramento de fenômenos dinâmicos que ocorrem na superfície terrestre (KALAF et al., 2013).

De acordo com Lillesand & Kiefer (1993), o SR é uma ciência que obtém informações sobre um determinado objeto, fenômeno ou área através da análise de dados sem que haja contato físico com o objeto ou fenômeno em estudo.

Novo (2010) conceituou o SR como sendo a utilização integrada de sensores, equipamentos para processamento e transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou plataformas com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície da Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que compõem o meio de propagação em suas mais diversas manifestações.

Com um baixo custo operacional em escala local, regional e até mesmo global, o sensoriamento remoto é uma importante ferramenta para uma melhor compreensão da superfície da terra e do padrão local de determinadas regiões e das alterações deste padrão (SILVA et al., 2013).

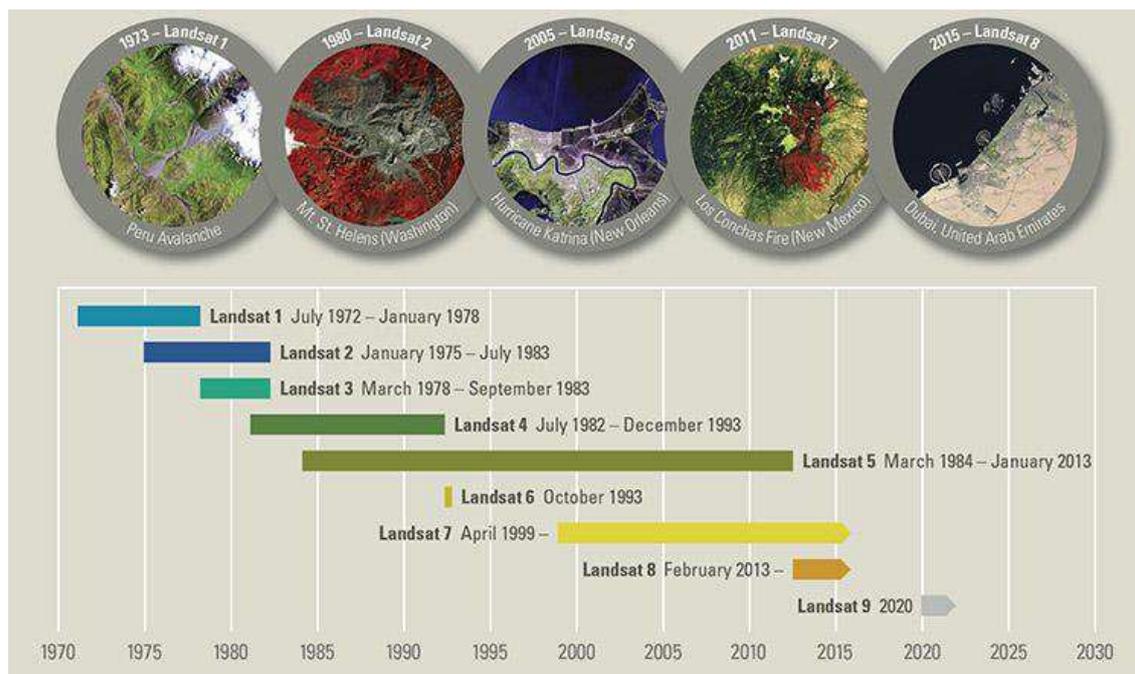
O processo do SR abrange uma interação entre a radiação eletromagnética e os alvos de interesse, além de envolver detecção de energia emitida e a utilização de sensores não-imageadores. Na Figura 1 observa-se o processo de coleta de dados a nível orbital a partir de um sensor imageador. A radiação solar incide na superfície, parte dela é refletida e captada pelo sensor a bordo de um satélite, que transmite os dados para uma estação de recepção que irá processar os mesmos dados, gerando como produto imagens com dados sobre a superfície.



**Figura 1.** Esquema dos elementos que compõem o sistema de imagens (FLORENZANO, 2011).

## 2.2 Satélite Landsat

Na metade dos anos 60, a Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (NASA) iniciou o programa de monitoramento por satélite conhecido como Landsat (Land Remote Sensing Satellite). Tendo como objetivo auxiliar cientistas a compreender e avaliar mudanças na paisagem oriundas de processos naturais ou antrópicos, sua formação, evolução e consequências sobre a superfície do planeta. A partir do ano de 1972, se deu início ao programa Landsat, com o lançamento do primeiro satélite da série (denominado ERTS-1 e posteriormente renomeado de Landsat-1), levando dois instrumentos a bordo: as câmeras *Return Beam Vidicon* (RBV) e *Multispectral Scanner System* (MSS), apresentando o maior registro contínuo de imageamento da Terra (*United States Geological Survey* (USGS), 2018). A Figura 2 ilustra o tempo de operação de cada um dos satélites da série Landsat, que já dura mais de 30 anos de atividade.



**Figura 2.** Cronograma da série dos satélites Landsat (USGS, 2018).

O satélite Landsat-5 foi o mais utilizado em sensoriamento remoto, tendo sido lançado em março de 1984 e que operou até janeiro de 2013. Ele foi equipado com dois sensores imageadores, o MSS, com resolução espacial de 80 m e o mais importante deles, denominado de *Thematic Mapper (TM)*, com resolução espacial de 30 m, ambos recobrando uma área de 185 km x 185 km da superfície terrestre (NASA, 2017a).

### 2.3 Landsat 8 OLI/TIRS

O satélite Landsat 8 foi lançado em 11 de fevereiro de 2013, na Base de Força Aérea Vandenberg, Califórnia. Ele é composto por dois instrumentos científicos: o *Operational Land Imager (OLI)* e o sensor de infravermelho térmico (TIRS). Estes dois sensores fornecem cobertura sazonal da massa terrestre global em uma resolução espacial de 30 m (visível, NIR, SWIR), 100 m (térmico) e 15 m (pancromática). O satélite foi desenvolvido em parceria entre a NASA e o USGS, e o tamanho aproximado de cada cena do OLI/IRTS é de 170 km ao norte-sul por 183 km a leste-oeste.

A NASA ficou responsável pelas fases de design, construção, lançamento e calibração em órbita. Nesse período o satélite era chamado de *Landsat Data Continuity Mission (LDCM)*. No dia 30 de maio de 2013, o USGS veio a assumir as operações de rotina, a liderança das atividades de calibração pós-lançamento, operações de satélites,

geração de dados e arquivamento de dados no centro de Observação e Ciência de Recursos Terrestre (EROS), tornando-se nesse período o Landsat 8 (NASA, 2017b).

Os instrumentos a bordo do Landsat 8 representam um avanço evolutivo na tecnologia. O OLI é um sensor push-broom com um telescópio de quatro espelhos e quantificação de 12 bits, que coleta dados para bandas espectrais de visível, infravermelho próximo, médio e distante (todas as bandas reflectivas), e também uma banda pancromática. O sensor de infravermelho térmico (TIRS) mede a temperatura da superfície da terra em duas faixas térmicas com uma nova tecnologia que aplica a física quântica para detectar o calor; o sensor TIRS foi adicionado à missão satélite porque ficou claro que os gerentes estaduais de recursos hídricos confiam nas medidas altamente precisas da energia térmica da Terra obtidas pelos satélites Landsat 8, Landsat 5 e Landsat 7, para rastrear como a terra e água estão sendo utilizadas (NASA, 2017b).

## **2.4 MODIS/TERRA**

No programa Sistema de Observação Terrestre (EOS – Earth Observing System) da NASA, o primeiro satélite a ser lançado foi o TERRA o que ocorreu em dezembro de 1999, iniciando-se a coleta de dados somente em fevereiro de 2000. O segundo a ser lançado foi o AQUA, isto em maio de 2002. Conhecido como EOS-AM, o MODIS é um dos cinco instrumentos do satélite TERRA. Os outros sensores a bordos são: CERES, ASTER, MISR e MOPITT. Neste estudo os dados utilizados são do sensor MODIS/TERRA.

O sensor MODIS é o carro-chefe que veio para completar essa lacuna na disponibilidade efetiva de dados de sensoriamento remoto. Na Tabela 1 estão dispostas as especificações técnicas do sensor MODIS, que foi projetado para satisfazer os requisitos de três campos de estudos: atmosfera, terra e oceano, com bandas de resolução espectral e espacial selecionadas para estes objetivos e uma cobertura global quase diária (a cada 1-2 dias) (JUSTICE et al., 2002). O MODIS opera em 36 bandas espectrais, com resolução espacial de 250 m, 500 m e 1000 m. Os seus produtos se destinam aos estudos das propriedades das nuvens, a dinâmica e as propriedades da vegetação na cobertura terrestre, e a temperatura da superfície terrestre e dos oceanos do nosso planeta (SALOMONSON & TOLL, 1991).

**Tabela 1.** Especificação técnicas do sensor MODIS.

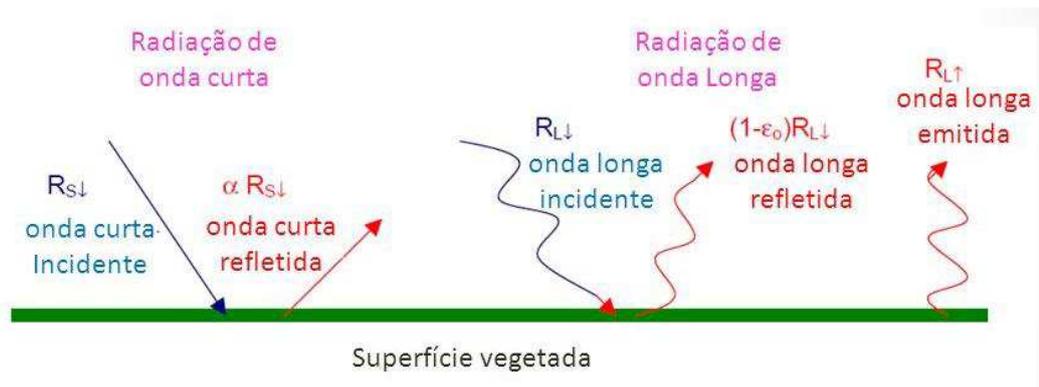
<b>SATÉLITE</b>	<b>MODIS</b>
<b>Órbita</b>	705 km, 10:30h no descende Terra; 13:30h no ascendente Aqua, heliossíncrona, quase polar, circular
<b>Taxa de leitura</b>	20.3 rpm, faixa transversal
<b>Dimensões de faixa</b>	2330 km (transversal) por 10 km (ao longo do Nadir)
<b>Telescópio</b>	17.78 cm de diâmetro fora do eixo, afocal, com campo de pausa intermediário
<b>Tamanho</b>	1.0 x 1.6 x 1.0 m
<b>Peso</b>	228.7 kg
<b>Energia</b>	162.5 W (single orbit average)
<b>Taxa de dados</b>	10.6 Mbps (peak daytime); 6.1 Mbps (orbit average)
<b>Quantização</b>	12 bits
<b>Resolução espacial</b>	250 m (bandas 1-2) 500 m (bandas 3-7) 1000 m (bandas 8-37)

**Fonte:** NASA, 2017c.

## **2.5 Saldo de radiação ( $R_n$ )**

O saldo de radiação ( $R_n$ ) em  $Wm^{-2}$  de uma superfície representa a quantidade de energia na forma de ondas eletromagnéticas disponíveis para repartir em meio aos fluxos de energia necessários aos processos de evapotranspiração, aquecimento do ar, aquecimento do solo e fotossíntese (MACHADO et al., 2014).

O saldo de radiação representa a principal fonte de energia usada pelos processos físicos, químicos, biológicos e meteorológicos à superfície e nas camadas inferiores da atmosfera, proporcionando informações importantes para o estudo da evapotranspiração da cobertura vegetal. O mesmo é determinado pela diferença entre os fluxos de radiação solar incidente e refletido, mais os fluxos de radiação de onda longa incidente (gerado pela atmosfera), refletido e emitido pela superfície (Figura 3). Tem aplicações em hidrologia, pesquisa climática, agricultura e energias renováveis (BISTH & BRAS, 2010; BEZERRA, 2013).



**Figura 3.** Representação esquemática do saldo de radiação (Adaptado de Allen, 2002).

A radiação de onda curta é a energia disponível na superfície da Terra representada por medidas de radiação global, que inclui a radiação direta e difusa, e do albedo da superfície (PEREIRA et al., 2011). No entanto, o saldo de onda curta numa determinada área dependerá (faixa espectral de 0,3 a 4,0  $\mu\text{m}$ ) da radiação solar incidente, e, principalmente, do albedo que se altera diante dos diferentes alvos e tipos de solo (MENDONÇA, 2007; GOMES et al., 2009).

Já a radiação de onda longa atmosfera (4,0 a 100,0  $\mu\text{m}$ ) é a parte do balanço de radiação mais difícil de ser medida, resultando da diferença da radiação atmosférica incidente e a radiação emitida da superfície (GOMES, 2009). Por causa, da dificuldade faz-se necessário utilizar modelos baseados na lei de radiação de Stefan-Boltzmann. Deste modo, o balanço de radiação pode ser resolvido por uma combinação de dados obtidos mediante o uso do sensoriamento remoto e dados complementares de superfície (BASTIAANSEN et al., 1998a).

No período das horas de brilho solar, o saldo de radiação em uma superfície qualquer tende a ser positivo, porque os fluxos incidentes (global e atmosférico) são superiores as frações refletidas e emitidas. Por outro lado, durante a noite, o seu valor tende a ser negativo, pois o processo de liberação de energia se inverte e a incidência de energia é baixa, proveniente apenas da atmosfera, tornando de tal modo, o fluxo de energia emitida pela superfície terrestre superior (MONTEITH & UNSWORTH, 1990; PEZZOPANE et al., 1995; GALVANI et al., 2001). Em decorrência da variação dos valores do  $R_n$  (positivo/negativo) nas 24 horas diárias, o meio ambiente tende a ajustar suas funções, para que no período de incidência de energia solar, a vegetação realize suas funções, principalmente de fotossíntese e transpiração, visto que no período da noite quase não há processos biológicos.

Como depende muito da natureza da superfície, e sofre grande influência do albedo e temperatura da superfície o  $R_n$  não é usualmente medido em estações meteorológicas. Usualmente o  $R_n$  é medido para estudos que determinem a obtenção dos componentes do balanço de energia (AZEVEDO et al., 2003; SILVA et al., 2007; ZHANG et al., 2008).

O  $R_n$  pode ser medido por meios de saldos radiômetros, que não são frequentemente empregados em estações meteorológicas convencionais e automatizadas, uma vez que têm custo elevado e suas medições não possibilitam pesquisas com resultados em escala regional (GOMES et al., 2009; Di PACE et al., 2008). As medições realizadas por sensores orbitais, disponibilizadas gratuitamente, como exemplo do Mapeador Temático do Landsat 5, OLI/TIRS do Landsat 8 e MODIS-TERRA/AQUA, reúnem alta cobertura espacial e, portanto, possibilitam estudos regionalizados com baixo custo operacional. Contudo, possuem a desvantagem do impedimento causado pela presença de nuvens e a frequência de revisita dos sensores que pode ser de apenas 16 dias (caso dos satélites Landsat) ou de 1 a 2 dias, caso do Terra e Aqua (OLIVEIRA et al., 2015).

Silva et al. (2011) analisaram o balanço de radiação no Perímetro Irrigado de São Gonçalo e áreas adjacentes através de imagens orbitais do TM e alguns dados da estação meteorológica instalada no interior do perímetro irrigado através de procedimentos do SEBAL e concluíram que o saldo de radiação e pomar apresentam resultados superior ao das outras áreas observadas, onde apresentou-se menor temperatura da superfície e albedo, portanto, o saldo de radiação foi maior, o que favoreceu na diminuição da temperatura do ar local.

## **2.6 Albedo da superfície ( $\alpha$ )**

O albedo da superfície representa a fração da energia eletromagnética solar que incide sobre a superfície terrestre (PEREIRA et al., 1997; PONZONI & SHIMABUKURO, 2010). Ele controla o saldo de radiação sobre a superfície terrestre, e, conseqüentemente, o balanço de energia nas interações solo-planta-atmosfera, que resulta no aquecimento do solo, ar e na evapotranspiração da vegetação nativa ou cultivada (SILVA et al., 2016; HE et al., 2012; MATTAR et al., 2014).

Com variações do tipo e condições da superfície o albedo de superfície pode variar bastante, indo desde os valores tão baixos como 5% (para oceanos sob condições de vento leve), a tão altos quanto 90% (para neve seca e fresca). O albedo mais comum é o de uma

superfície da água, que vem a depender do ângulo zenital, nebulosidade, impurezas da água, e velocidade do vento (Di PACE, 2004).

Silva et al. (2016), analisando os procedimentos de cômputo do albedo com imagens OLI, mapearam o mesmo em áreas do Perímetro Irrigado São Gonçalo – PB, registraram grandes diferenças entre os valores do albedo de diversos usos da terra como, corpos d'água, das parcelas irrigadas e de vegetação nativa e, portanto, concluíram que o albedo obtido com as imagens OLI demonstra maior grau de diferenciação desses usos, observados pelos autores, como resultado do acréscimo substancial da resolução radiométrica deste novo sensor.

Segundo Pereira et al. (2002) existe uma relação direta do albedo com o saldo de radiação. Observa-se que quanto mais densa e fechada a vegetação, primária ou agrícola, menor será a radiação solar refletida, por consequência, maior a sua absorção e, conseqüentemente, maior o saldo de radiação.

## **2.7 Temperatura de superfície ( $T_s$ )**

A temperatura de superfície é um dos parâmetros importantes para o controle dos processos físicos, químicos e biológicos que permeiam a interface entre a superfície terrestre e a atmosfera (ZHANG et al., 2009). Ressalta-se que a temperatura de superfície é relevante nos processos físicos à superfície terrestre em escala global e regional, podendo ser utilizada como indicador de degradação terrestre e de mudança climática, por causa da sua grande relação no balanço de energia, na evaporação e transpiração da vegetação, e também em processos de desertificação (ARAÚJO & Di PACE, 2010).

Silva et al. (2005a) observaram as maiores temperaturas em solo exposto e as menores no lago, no Semiárido, comprovado a partir dos resultados, e observações consistentes no balanço radiativo realizadas à superfície. Já Rodrigues et al. (2009) concluíram, em estudo na região Semiárida, que os maiores valores de temperatura da superfície encontrados podem ser demonstrados pela maior ou menor quantidade de energia em forma de calor sensível, em consequência da baixa proporção da vegetação sobre a área na data de 25 de outubro de 2000, sendo o período seco para região. Porém, os mesmos autores encontraram em 24 de julho de 2001, no período de transição com o período chuvoso para o seco, na qual ainda há carga de umidade no ar e no solo observaram os menores valores de temperatura da superfície.

## 2.8 Índices de Vegetação

Exibimos a vegetação como um indicador sensível das propriedades do ecossistema que influenciam no balanço de energia, no clima, na hidrologia e nos ciclos biogeoquímicos (HUETE et al., 1994). Técnicas de sensoriamento remoto e algoritmos de processamento de imagens foram desenvolvidos para caracterizar o dossel de extensas áreas vegetadas, a partir de diversos índices de vegetação.

Os índices de vegetação são modelos matemáticos desenvolvidos para analisar a cobertura vegetal e relacionam a assinatura espectral e os parâmetros mensuráveis no campo tanto quantitativamente quanto qualitativamente (BARBOSA, 2006). As transformações lineares de bandas espectrais são geralmente nas faixas do vermelho, e infravermelho próximo do espectro eletromagnético (EPIPHANIO et al, 1996). Essas equações dos índices são as ferramentas pelas quais as transformações são efetuadas, sendo realizadas diretamente pelos sistemas de informação geográfica. As bandas das imagens de satélite são compostas por pixels, uma vez que, são transformados diretamente pelas equações, ressaltando determinados aspectos inerentes a cada índice (ROSENDO & ROSA, 2005).

Os índices de vegetação utilizados nesta pesquisa são: Índice de Vegetação Normalizada (NDVI), Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) e Índice de Área Foliar (IAF). Eles são empregados em algumas parametrizações envolvidas nos balanços de radiação e energia, como na determinação da emissividade da superfície.

O Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) foi desenvolvido por Rouse et al. (1973) e foi introduzido para produzir um índice de vegetação espectral que divide a vegetação verde do brilho do solo de fundo, utilizando inicialmente os dados digitais do Landsat. Esse índice é muito aplicado para monitoramento agrícola, por apresentar forte correlação linear com o desenvolvimento das culturas. É representado pela razão entre a diferença das reflectâncias banda do infravermelho próximo e vermelho, e pela soma da reflectância dessas mesmas das bandas (MARCUSSE et al., 2010; BERNARDI, 2014).

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) foi criado visando amenizar o efeito de solo e se baseia nos princípios de que a curva de vegetação tende a aproximar-se da curva de solo para baixas densidades de vegetação, passando por uma mistura de respostas

espectrais para densidades médias e quase nenhuma influência do solo para densidades altas de vegetação. O SAVI consiste na própria fórmula do NDVI, acrescida de uma constante L, que varia de 0 a 1, dependendo do grau da maior ou menor cobertura do solo, respectivamente (BERNARDI, 2014).

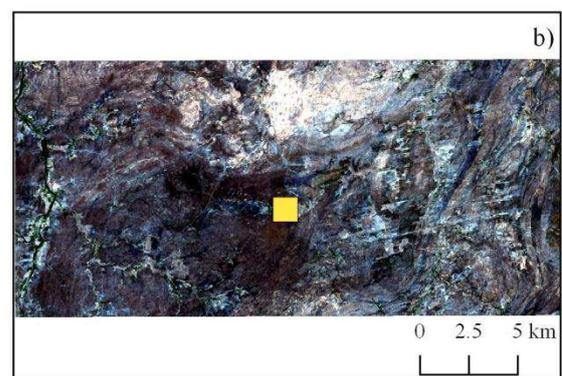
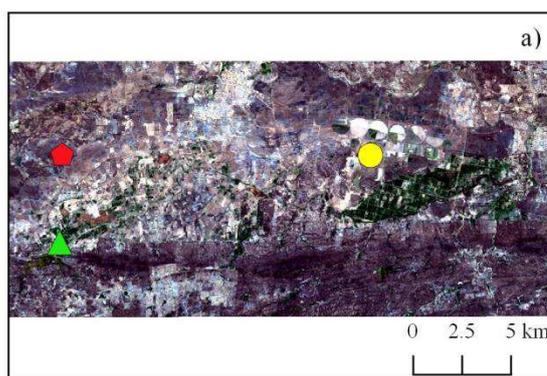
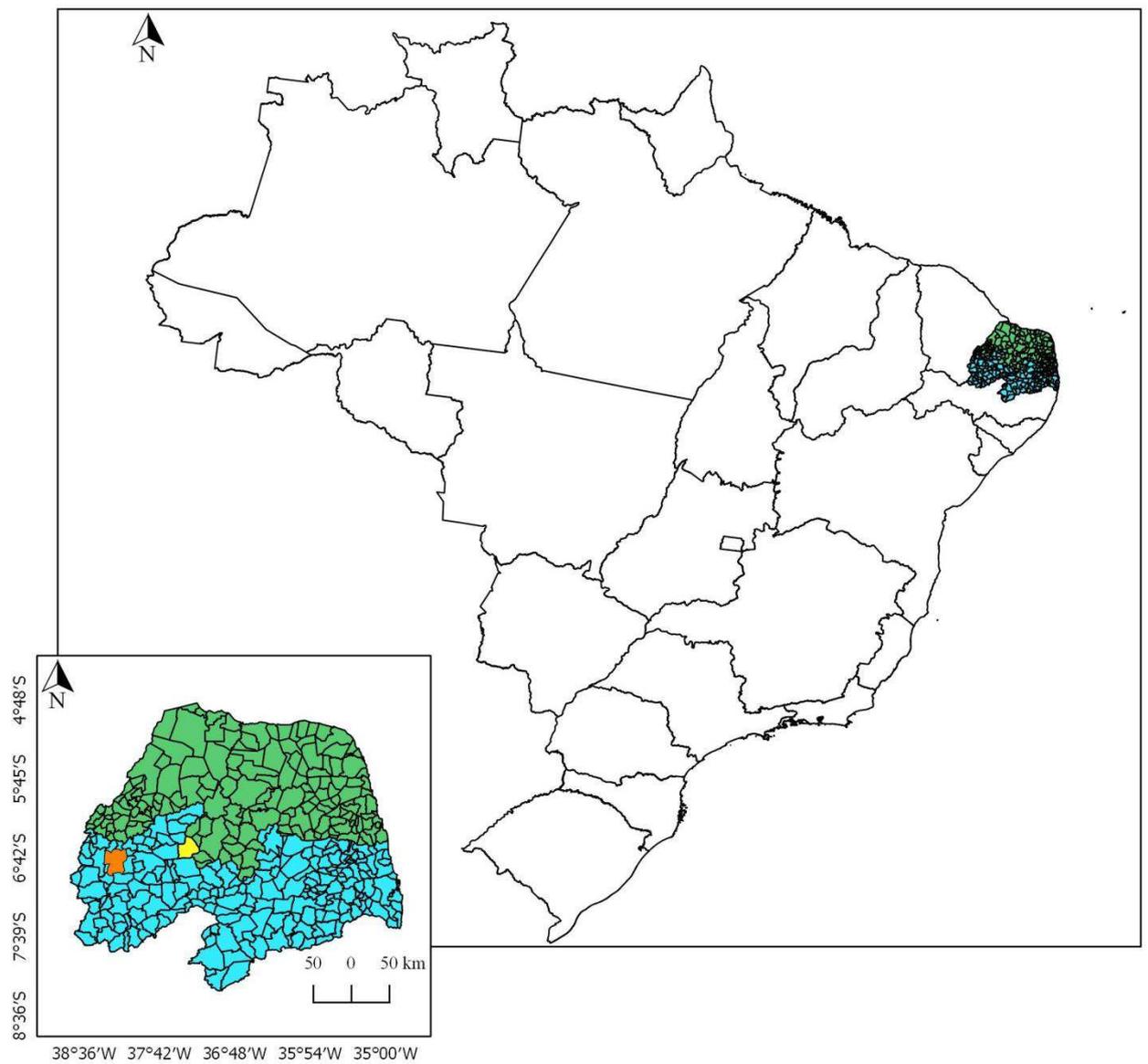
O Índice de Área Foliar (IAF) é um importante parâmetro biofísico da vegetação, sendo definido como a área foliar total projetada por unidade de área de terreno ( $m^2/m^2$ ) (Allen et al., 2002). A sua importância tem relação com a biomassa vegetal e por caracterizar a arquitetura do dossel fornecendo informações importantes sobre a vigor da cobertura vegetada e justificando a variedade de estudos em sensoriamento remoto envolvendo estimativas deste parâmetro. As estimativas permitem uma avaliação das trocas energia/matéria ocorridas nos mesmos (HABOUDANE et al., 2004). A utilização dos dados orbitais constitui-se em um método indireto e não destrutivo para estimativa do índice de área foliar. Espera-se que quanto maior o IAF, menor será o valor de radiância espectral referente a regiões do visível (380 a 720 nm) e do infravermelho médio (1300 a 3000 nm), correspondente à maior disponibilidade de pigmentos fotossintetizantes absorvendo Radiação Eletromagnética (REM) incidente e quantidade de água, respectivamente, e maior valor na região do infravermelho próximo, devido ao múltiplo espalhamento entre folhas (BERNARDI, 2014).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Área de estudo**

A região de estudo conhecida como Perímetro Irrigado de Sousa (06° 45' 39" S; 38° 13' 51" W), ou Várzeas de Sousa, está situada a oeste do estado da Paraíba no distrito de São Gonçalo e localizam-se a 15 km da zona urbana do município de Sousa, PB (6,84° S; 38,32° W; 234 m), estando à aproximadamente 444 km da capital João Pessoa. O perímetro foi criado através de uma iniciativa do Governo do Estado da Paraíba e está localizado na mesorregião do Sertão Paraibano, tendo como finalidade impulsionar e dinamizar a agricultura na sua área de influência, com efeitos positivos sobre a economia estadual, por meio de ações voltadas para o crescimento das atividades agrícolas e agroindustriais. Este modelo definido para o Projeto constituiu para o poder público a responsabilidade pelo planejamento e construção da infraestrutura de irrigação de uso comum. Já a iniciativa privada ficou responsável pela execução dos processos de produção e comercialização (MELO et al., 2010; LIMA, 2014). A Figura 4 corresponde desde a área do Perímetro Irrigado localizado em São Gonçalo, PB (Figura 4a) até a localização da torre micrometeorológica na Estação Ecológica do Seridó – ESEC (ICMBIO) em Serra Negra do Norte, RN (Figura 4b).

As terras das Várzeas de Sousa são constituídas de solos profundos, proporcionando uma alta aptidão para a prática da irrigação. Sua topografia é plana, sujeitas a insolação, tem baixa umidade atmosférica, e não se detecta a presença de ventos fortes (COSTA FILHO, 2005). De acordo com a classificação de Köppen o perímetro está inserido na zona climática do tipo Bsh, clima semiárido, com chuvas concentradas nos meses de janeiro a maio, precipitação média anual de 800 mm, temperaturas variando entre 25° C a 38 °C, e umidade relativa do ar em torno de 64 %. O perímetro apresenta um relevo plano e suave ondulado com solos do tipo Neossolos Flúvicos, com altitude média de 235 m acima do nível do mar (EMBRAPA, 2006). Possui uma área de 5.290 ha, mas recentemente só é utilizada cerca de 3.212 ha, sendo 2.412 ha irrigáveis e 800 ha em área de sequeiro. A distribuição da área é de 2.412 ha para os irrigantes; 128 ha para o Instituto Federal da Paraíba (IFPB) Campus Sousa e 303 ha para a Cooperativa Mista dos Empresários em Ciências (COMECA) (SILVA et al., 2017).



**Legenda**

- |                     |                      |                          |
|---------------------|----------------------|--------------------------|
| Brasil              | Sousa                | Pivô Central             |
| Paraíba             | Serra Negra do Norte | Torre Micrometeorológica |
| Rio Grande do Norte | Coqueiro             | Vegetação Nativa         |

Elaboração: Jéssica Fontes      Fonte de dados: IBGE, 2017.

**Figura 4.** Localização da área estudo com destaque para os pontos de coleta de dados.

### 3.2 Dados meteorológicos

A estação onde foram obtidos os dados está situada na cidade de São Gonçalo (A333; Código: OMM: 81774) e, pertence ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A coleta de dados meteorológicos obedece às normas estabelecidas pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), sendo, portanto efetivada a cada hora. De acordo com a Norma Técnica 001/INMET, são realizadas medições a cada 5 segundos das variáveis meteorológicas: temperatura do ar ( $T_a$ , °C), umidade relativa do ar (UR, %), pressão atmosférica ( $P_o$ , kPa), velocidade e direção do vento, e de radiação solar global ( $R_g$ ,  $Wm^{-2}$ ). Ainda de acordo com a referida Norma Técnica, no minuto que antecede cada hora, é extraída a média aritmética de  $T_a$ , UR e  $P_o$ , que é registrada como o valor instantâneo de cada uma dessas variáveis. Já a radiação solar é integrada e registrado o seu valor a cada hora em  $kJm^{-2}$ . Foram considerados na pesquisa os dados coletados no período de 01 de janeiro de 2015 a 31 de dezembro de 2016.

Foram empregados dados coletados numa torre micrometeorológica, localizada no município de Serra Negra do Norte no estado do Rio Grande do Norte (Figura 4), que foram usados na validação dos resultados. Essa torre foi adquirida no Projeto monitoramento do estoque de carbono em ecossistemas de caatinga preservada e degradada (Número: 446172/2015-4; Órgão financiado pelo CNPq) e que é coordenado pelo Prof. Dr. Carlos Antônio Costa dos Santos. Sua instalação foi realizada em área de caatinga preservada da Estação Ecológica do Seridó (ESEC – ICMBio) situada a  $6^{\circ}34'46.8''$  S e  $37^{\circ}14'55.9''$  W com altitude de 193 m.

Para determinação de dados de superfície, as medidas das variáveis ambientais foram realizadas por sensores instalados na torre (Figura 5), que se encontra a altura superior ao dossel da vegetação. Os dados para avaliação das estimativas foi armazenada em Datalogger CR300 (Campbell Scientific, Inc., UT, USA), programado para fazer leituras das medidas a cada 30 segundos e armazenar uma média a cada 30 minutos.



**Figura 5.** Torre micrometeorológica contendo sensores para medições dos componentes do balanço de radiação, instalada na caatinga preservada da Estação Ecológica do Seridó (ESEC – ICMBio) em Serra Negra do Norte, RN.

### **3.3 Dados orbitais**

O estudo foi realizado a partir de imagens geradas pelos sensores OLI/TIRS (*Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor*) a bordo do satélite Landsat 8, além de produtos obtidos com base em imagens MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) do satélite TERRA. Os downloads das imagens foram adquiridos a partir da realização de um cadastro nos sites específicos. Adotou-se o critério de escolha sob condição de céu claro, onde a seleção foi a menor ou inexistente presença de nuvens.

#### **3.3.1 Imagens OLI/TIRS - LANDSAT 8**

As imagens foram adquiridas junto ao United States Geological Survey (USGS) em sua plataforma *Earth Explorer*. O Landsat 8 OLI/TIRS possui 11 bandas multiespectrais cujas características estão representadas na Tabela 2. As imagens têm resolução espectral de 12 bits, mas são disponibilizadas em 16 bits no formato GeoTIFFs e TXT (metadados), com intensidade de cada pixel entre 0 a 65.535, permitindo assegurar um maior grau de detalhamento das informações geradas.

**Tabela 2.** Características de cada banda utilizada do sensor OLI/TIRS.

<b>Bandas</b>	<b>Comprimento de ondas (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Resolução (m)</b>
1 (aerossol)	0,435-0,451	30
2 (azul)	0,452-0,512	30
3 (verde)	0,533-0,590	30
4 (vermelho)	0,636-0,673	30
5 (infravermelho próximo)	0,851-0,879	30
6 (SWIR 1)	1,566-1,651	30
7 (SWIR 2)	2,107-2,294	30
8 (pancromática)	0,503-0,676	30
9 (cirrus)	1,363-1,384	30
10 (infravermelho termal 1)	10,60-11,19	100
11 (infravermelho termal 2)	11,50-12,51	100

**Fonte:** NASA (2017b).

Foram selecionadas imagens com céu claro no instante da passagem do satélite, nas órbitas 215 e 216 e pontos 65 nos anos de 2015 e 2016, cujos dados extraídos no metadados constam nas Tabelas 3 e 4.

**Tabela 3.** Imagens selecionadas do Landsat 8 para Serra Negra do Norte, RN, 2015, órbita 215 e ponto 65. Dia de ordem do ano (DOA); ângulo de elevação do Sol (E); distância relativa Terra-Sol (dr); cosseno do ângulo zenital solar (Cos Z).

<b>Dia</b>	<b>DOA</b>	<b>Órbita</b>	<b>Hora da passagem do satélite</b>	<b>E (<math>^{\circ}</math>)</b>	<b>dr</b>	<b>Cos Z</b>
27/09/2015	270	215	12:35:15	63.7628	0.9953	0.8970
29/10/2015	302	215	12:35:21	65.7388	1.0135	0.9117
14/11/2015	318	215	12:35:21	64.1729	1.0215	0.9001
30/11/2015	334	215	12:35:24	61.8636	1.0281	0.8818
08/05/2016	129	215	12:34:49	53.6173	0.9813	0.8051
25/06/2016	178	215	12:35:02	48.5110	0.9678	0.7491
11/07/2016	193	215	12:35:10	48.9824	0.9676	0.7545
27/07/2016	209	215	12:35:15	50.7694	0.9697	0.7746
12/08/2016	225	215	12:35:17	53.6865	0.9741	0.8058
13/09/2016	257	215	12:35:28	61.1565	0.9881	0.8759
29/09/2016	273	215	12:35:28	64.2879	0.9968	0.9010
02/12/2016	337	215	12:35:34	61.4873	1.0289	0.8787

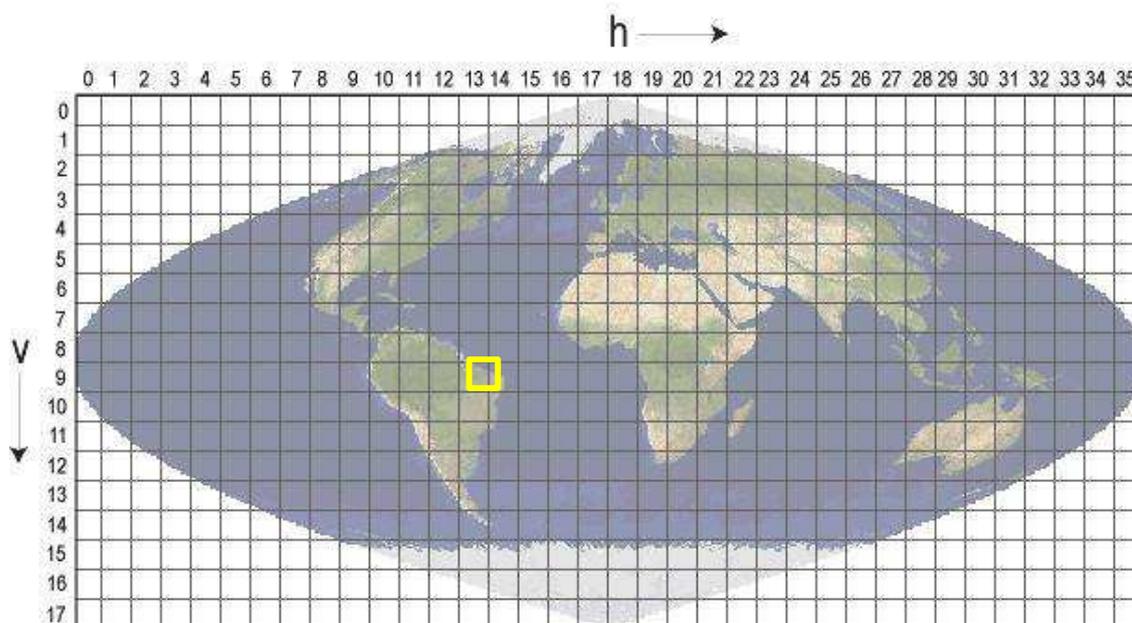
**Tabela 4.** Imagens selecionadas do Landsat 8 para São Gonçalo, PB no ano de 2015 e 2016, órbita 216 e ponto 65. Dia de ordem do ano (DOA); ângulo de elevação do Sol (E); distância relativa Terra-Sol (dr); cosseno do ângulo zenital solar (Cos Z).

Dia	DOA	Órbita	Hora da passagem do satélite	E (°)	dr	Cos Z
04/10/2015	277	216	12:41:27	64.8248	0.9993	0.9050
05/11/2015	309	216	12:41:32	65.9472	1.0171	0.9132
21/11/2015	325	216	12:41:34	63.1958	1.0247	0.8926
07/12/2015	341	216	12:41:33	60.8479	1.0302	0.8733
23/12/2015	357	216	12:41:34	65.9472	1.0084	0.9132
12/03/2016	71	216	12:41:16	59.4497	1.0124	0.8612
15/05/2016	135	216	12:40:59	52.4959	0.9783	0.7933
16/06/2016	167	216	12:41:07	48.8138	0.9689	0.7526
18/07/2016	199	216	12:41:24	49.6086	0.9683	0.7616
03/08/2016	215	216	12:41:27	51.9244	0.9713	0.7872
04/09/2016	247	216	12:41:37	59.0456	0.9835	0.8576
20/09/2016	263	216	12:41:40	62.6653	0.9919	0.8883

### 3.3.2 Imagens MODIS/TERRA

Os produtos do MODIS encontram-se rearranjados em mosaicos denominados “*tiles*”, que utilizam um sistema de projeção padrão, o *Sinusoidal Tiling System*. Esse sistema distribui as imagens em *tiles* de 10 em 10 graus. O sistema de coordenadas *tiles* inicia em (0,0) (número de *tile* na horizontal, número de *tile* na vertical), a partir do canto superior esquerdo e prossegue para direita (horizontal) e para baixo (vertical), como pode ser visto na Figura 6.

A área de estudo encontra-se no *tiles* v9\_h14 (Figura 6). Antes dos produtos serem cedidos eles são calibrados e corrigidos atmosféricamente. Eles são distribuídos em formato HDF (*Hierarchical Data Format*), e para visualização e processamento das imagens, pode-se utilizar o software MRT (*MODIS Reprojection Tool*) que pode ser usado para converter as imagens no formato GeoTIFF, ou pode-se utilizar o ERDAS, que possibilita a importação das imagens para posterior processamento do saldo de radiação.



**Figura 6.** Tiles do sensor MODIS, com destaque para o *tile* em que se encontra a área de estudo (Fonte: NASA, 2017).

A Tabela 5 descreve os produtos MODIS utilizados no presente estudo, com os fatores de correção (multiplicativos e/ou adicional) que são empregados para converter os valores originais em dados de temperatura (K), reflectância (adimensional), ângulo zenital solar (adimensional), hora da passagem do satélite.

**Tabela 5.** Descrição dos produtos MODIS utilizados nesse estudo.

Produto	Descrição	Fator multiplicativo	Fator adicional	Resolução (espacial e temporal)	Unidades
MOD09GA	Ângulo zenital	0,01	-	1000 m diária	Grau
	Reflectância de superfície	0,0001	-	500 m diária	Adimensional
MOD09GQ	Reflectância de superfície	0,0001	-	250 m diária	Adimensional
MOD11A1	Temperatura da superfície	0,02	-	1000 m diária	Kelvin
	Hora da passagem do satélite	0,01	-		Hora

Fonte: NASA, (2017).

Os dias selecionados para os estudos estão representados na Tabela 6, que compreendem 79 imagens em 2015 e 61 imagens em 2016.

**Tabela 6.** Dias selecionados para o estudo dos anos de 2015 e 2016, onde DOA é o dia de ordem do ano.

ANO 2015				ANO 2016			
DIA	DOA	DIA	DOA	DIA	DOA	DIA	DOA
17/01	17	29/09	272	30/01	30	27/10	301
20/01	20	30/09	273	11/02	42	28/10	302
27/01	27	02/10	275	12/02	43	04/11	309
14/03	73	03/10	276	29/02	60	05/11	310
16/04	106	05/10	278	01/03	61	06/11	311
26/04	116	08/10	281	02/03	62	18/11	323
28/04	118	10/10	283	06/03	66	22/11	327
30/04	120	17/10	290	07/03	67	24/11	329
11/05	131	19/10	292	29/03	89	25/11	330
01/06	152	21/10	294	19/04	110	26/11	331
03/06	154	22/10	295	24/04	115	28/11	333
11/06	162	23/10	296	27/04	118	29/11	334
13/06	164	25/10	298	30/04	121	01/12	336
15/06	166	26/10	299	03/05	124	03/12	338
20/06	171	28/10	301	04/05	125	04/12	339
06/07	187	30/10	303	05/05	126	05/12	340
10/07	191	06/11	310	07/05	128	08/12	343
20/07	201	07/11	311	21/07	203	10/12	345
04/08	216	11/11	315	22/07	204	12/12	347
09/08	221	13/11	317	24/07	206	31/12	366
13/08	225	15/11	319	26/07	208		
16/08	228	16/11	320	07/09	251		
18/08	230	17/11	321	08/09	252		
20/08	232	19/11	323	09/09	253		
23/08	235	20/11	324	14/09	258		
25/08	237	24/11	328	16/09	260		
27/08	239	25/11	329	18/09	262		
28/08	240	26/11	330	19/09	263		
29/08	241	27/11	331	21/09	265		
31/08	243	29/11	333	22/09	266		
01/09	244	03/12	337	25/09	269		
05/09	248	04/12	338	02/10	276		
06/09	249	08/12	342	03/10	277		
07/09	250	10/12	344	05/10	279		
08/09	251	11/12	345	09/10	283		
12/09	255	12/12	346	10/10	284		
19/09	262	13/12	347	16/10	290		
21/09	264	15/12	349	17/10	291		
22/09	265			18/10	292		
26/09	269			19/10	293		
28/09	271			23/10	297		

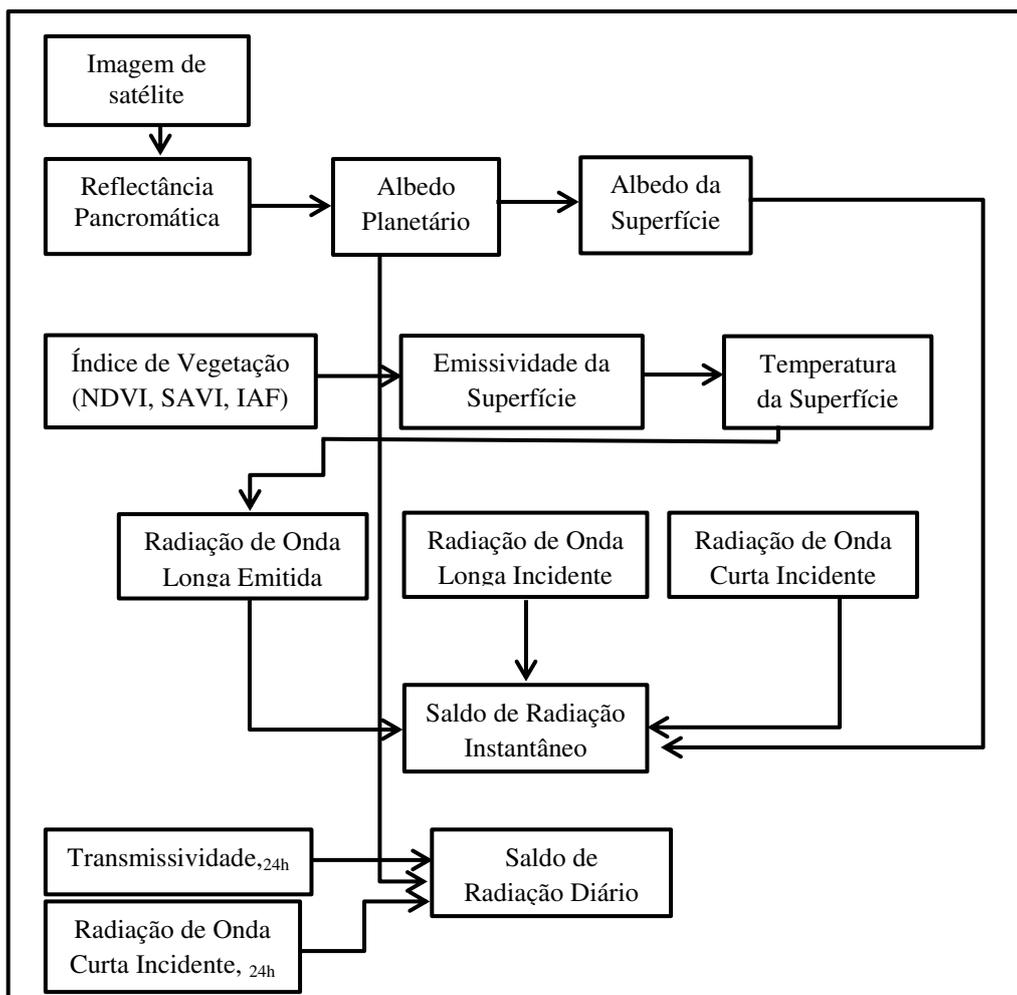
### 3.4 Tratamentos dos dados

As imagens do OLI/TIRS - Landsat 8 correspondem às bandas 2 a 7, mais a banda 10, foram inicialmente empilhadas. Já as imagens do produto MODIS passaram inicialmente pelo processo de importação seguido do recorte da área em estudo.

### 3.5 Metodologia empregada

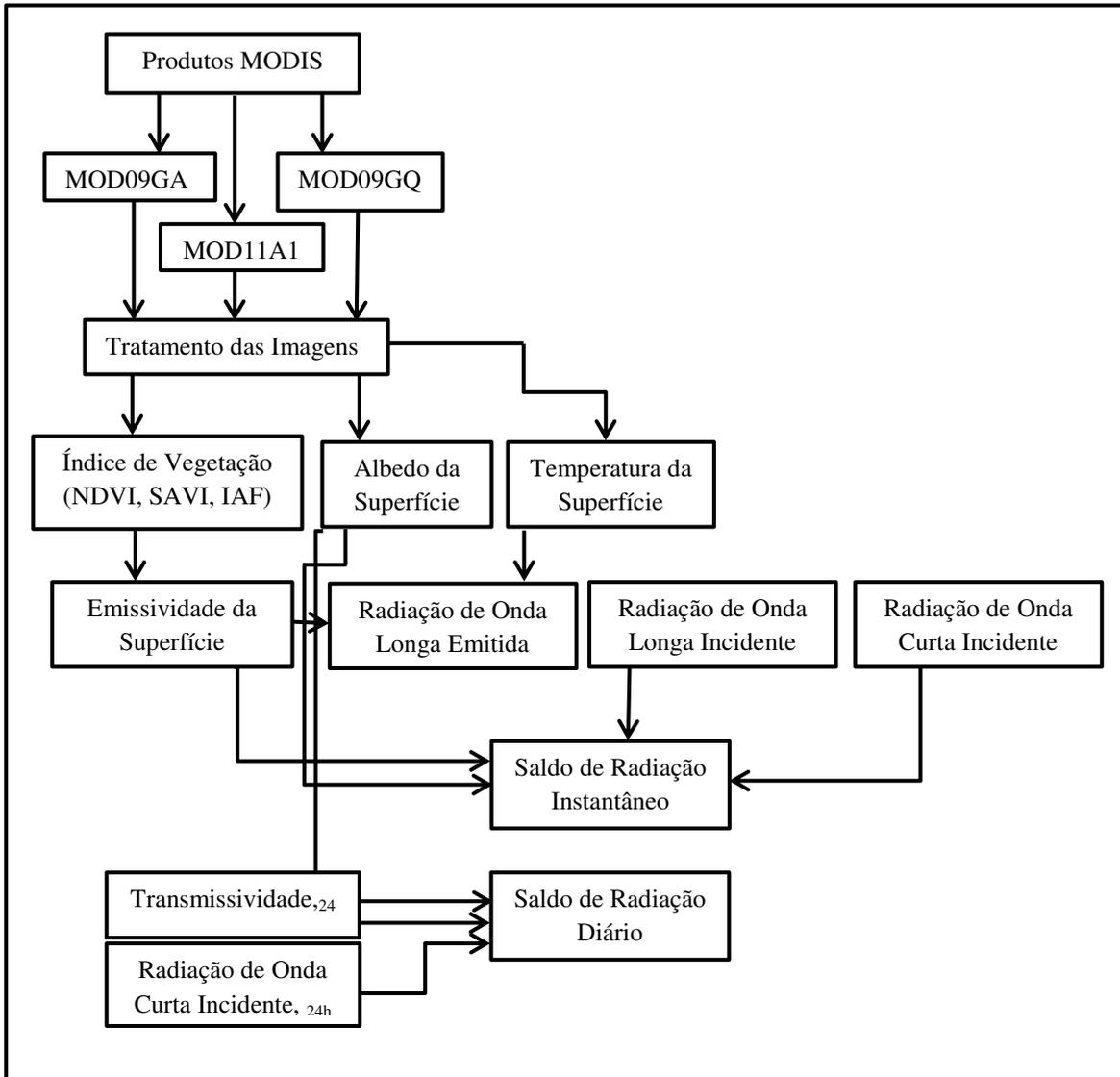
Todas as etapas envolvidas no processo de estimativa do balanço de radiação foram realizadas através da ferramenta *Model Maker* do software ERDAS Imagine 9.1

Os dados nesse estudo são composições de 16 dias obtidas pelo sensor OLI/TIRS no satélite Landsat 8, para uma área localizada em São Gonçalo, PB e Serra Negra do Norte, RN. A Figura 7 representa todo o procedimento empregado para estimar o saldo de radiação instantâneo ( $R_n$ ) e o diário ( $R_{n,24h}$ ) a partir das imagens do OLI/TIRS - Landsat 8.



**Figura 7.** Etapas do processamento de obtenção do saldo de radiação à superfície –  $R_n$ , para as imagens OLI/TIRS.

Os dados remotos utilizados nesse estudo são composições temporais diárias obtidas do sensor MODIS/TERRA, para uma área que inclui o Perímetro Irrigado de São Gonçalo, PB e a Reserva de Serra Negra do Norte, RN. A Figura 8 representa um modelo realizado para estimar o saldo de radiação instantâneo ( $R_n$ ) e diário ( $R_{n,24h}$ ).



**Figura 8.** Etapas do processamento de obtenção do saldo de radiação à superfície –  $R_n$ , para os produtos MODIS.

### 3.5.1 Radiância espectral

#### 3.5.1.1 Landsat 8 OLI

Para determinar a radiância espectral ( $L_b$ ) de cada uma das bandas do OLI/TIRS utilizou-se os termos aditivos e multiplicativos, tanto para radiância espectral quanto para a reflectância. Houve a necessidade de converter os valores quantizados e calibrados do

nível de cinza de cada banda no sistema sensor Landsat 8 OLI em radiância espectral, deste modo, foram utilizados coeficientes radiométricos referentes a radiância, disponibilizados nos arquivos de metadados das imagens utilizadas no trabalho.

Para determinação da radiância espectral em cada banda (CHANDER & MARKHAM, 2003; SILVA et al., 2016):

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

em que,  $Add_{rad\ b}$  é o termo aditivo e  $Mult_{rad\ b}$  o multiplicativo, relativos à radiância, que foram extraídos do metadados de cada imagem do OLI/TIRS e  $ND_b$  é a intensidade de cada pixel e banda (valor entre 0 e 65.3650).

### 3.5.2 Reflectância planetária

#### 3.5.2.1 Landsat 8 OLI

As reflectâncias de todas as bandas (2-7) foram obtidas pela seguinte equação (CHANDER & MARKHAM, 2003; SILVA et al., 2016):

$$r_b = \frac{Add_{rad\ b} + Mult_{rad\ b} \cdot ND_b}{\text{sen } E \cdot d_r} \quad (2)$$

em que,  $r_b$  (adimensional) é a refletância monocromática de cada pixel em cada banda;  $Add_{rad\ b}$  e  $Mult_{rad\ b}$  é o termo aditivo e multiplicativo relativos à reflectância de cada banda, extraídos do metadados;  $E$  é o ângulo de elevação do Sol e  $d_r$  é a correção da excentricidade da órbita terrestre, obtido com base na distância Terra-Sol em Unidade Astronômica, também extraída do metadados de cada imagem.

O cosseno do ângulo zenital solar ( $Z$ , adimensional) é obtido a partir do ângulo de elevação do Sol ( $E$ , graus), disponibilizado nos metadados das imagens:

$$\cos Z = \cos\left(\frac{\pi}{2} - E\right) = \text{sen}(E) \quad (3)$$

#### 3.5.2.2 Landsat 8 OLI (cômputo dos pesos)

Conforme a metodologia de (CHANDER & MARKHAM, 2003 e SILVA et al., 2016) determinaram-se os coeficientes de pesos para cada banda das imagens. Foi necessário estimar a constante solar ( $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ ) associada a cada uma das bandas reflectivas do OLI, por meio da seguinte equação:

$$k_b = \frac{\pi \cdot L_b}{r_b \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (4)$$

em que,  $k_b$  ( $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ ) é a irradiância solar espectral de cada uma das bandas refletivas do *Landsat 8 OLI* no Topo da Atmosfera (TOA). Em seguida, calculou-se os pesos ( $p_b$ , adimensional) para cada banda do OLI, a obtenção do valor de  $p_b$  de cada banda espectral, se dá pela razão entre o  $k_b$  daquela banda e o somatório de todos os  $k_b$  do *Landsat 8 OLI* (STARKS et al., 1991; CHANDER & MARKHAM, 2003; SILVA et al., 2005b; SILVA et al., 2016):

$$p_b = \frac{k_b}{\sum k_b} \quad (5)$$

Os pesos obtidos foram empregados no cômputo do albedo planetário, na próxima etapa do trabalho.

### 3.5.3 Albedo no topo da atmosfera

#### 3.5.3.1 Landsat 8 OLI/TIRS

Estimou-se o albedo sem correção por Silva et al. (2016), qual seja:

$$\alpha_{\text{toa}} = p_2 \cdot r_2 + p_3 \cdot r_3 + p_4 \cdot r_4 + p_5 \cdot r_5 + p_6 \cdot r_6 + p_7 \cdot r_7 \quad (6)$$

em que,  $\alpha_{\text{toa}}$  é o albedo planetário ou albedo da superfície sem correção atmosférica;  $p_2, p_3, \dots, p_7$ , são os pesos de cada uma das bandas e  $r_2, r_3, \dots, r_7$  são as reflectâncias de cada uma das bandas utilizadas, respectivamente.

### 3.5.4 Albedo na superfície

#### 3.5.4.1 LANDSAT 8 OLI/TIRS

O albedo na superfície foi calculado usando a seguinte equação (BASTIAANSSEN et al., 1998a; ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2005a; OLIVEIRA et al., 2012; SILVA et al., 2016):

$$\alpha_{\text{sup}} = \frac{\alpha_{\text{toa}} - \alpha_{\text{atm}}}{\tau_{\text{sw}}^2} \quad (7)$$

em que,  $\alpha_{\text{toa}}$  é o albedo planetário em cada pixel ou albedo corrigido;  $\alpha_{\text{atm}}$  é o albedo atmosférico;  $\tau_{\text{sw}}$  é a transmissividade atmosférica no domínio da radiação solar, que pode ser obtida por (ASCE-ERWI, 2005; ALLEN et al., 2002; ALLEN et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2012; SILVA et al., 2016):

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \cdot \exp \left[ \frac{-0,00146 \cdot P_o}{K_t \cdot \cos Z} - 0,75 + \left( \frac{W}{\cos Z} \right)^{0,4} \right] \quad (8)$$

em que,  $P_o$  (kPa) é a pressão atmosférica instantânea (medida na estação meteorológica automática da área em estudo);  $K_t$  é o coeficiente de turbidez da ar ( $K_t = 1,0$  para céu claro e limpo e  $K_t = 0,5$  para ar extremamente turbido ou poluído, por ALLEN et al., 2002; 2007a), sendo que para este trabalho foi utilizado o  $K_t = 1,0$  (OLIVEIRA et al., 2012; SILVA et al., 2016);  $W$  (mm) é a água precipitável obtida em função da umidade relativa do ar instantânea (medida na estação meteorológica automática) conforme GARRISON & ADLER 1990:

$$W = 0,14 \cdot e_a \cdot P_o + 2,1 \quad (9)$$

em que,  $e_a$  (kPa) é a pressão real de vapor d'água atmosférico, calculada mediante dados meteorológicas da estação automática localizada na área em estudo, dada por:

$$e_a = \frac{UR \cdot e_s}{100} \quad (10)$$

em que,  $e_s$  (kPa) é a pressão de saturação do vapor d'água obtida por meio de dados da estação automática:

$$e_s = 0,6108 \cdot \exp \left( \frac{17,27 \cdot T_{ar}}{237,3 + T_{ar}} \right) \quad (11)$$

em que,  $T_{ar}$  (°C) é a temperatura do ar instantânea da estação meteorológica automática.

Ocorrendo uma eventual falta de dados de pressão atmosférica ( $P_o$ , kPa) obtêm-se a mesma de acordo com ASCE-EWRI (2005) e Allen et al. (2002), conforme Equação 16.

$$P_o = 101,3 \left( \frac{T_{ar} - 0,0065 \cdot Z}{T_{ar}} \right)^{5,26} \quad (12)$$

em que,  $T_{ar}$  é a temperatura do ar da estação meteorológica automática, em Kelvin e  $Z$  é a altitude, em metros.

#### 3.5.4.2 MODIS/TERRA

Para determinação do albedo com resolução de 500 m e imagens MOD09GA do MODIS utilizou-se a equação proposta por Trezza et al. (2013):

$$\alpha_{sup} = 0,215 \cdot p_1 + 0,266 \cdot p_2 + 0,242 \cdot p_3 + 0,129 \cdot p_4 + 0,112 \cdot p_6 + 0,036 \cdot p_7 \quad (13)$$

Já para o cálculo do albedo com resolução de 250 m, utilizou-se a equação formulada por Teixeira et al. (2008):

$$\alpha_{sup} = 0,08 + 0,41 \cdot p_1 + 0,14 \cdot p_2 \quad (14)$$

em que,  $p_1, p_2$  são as reflectâncias das bandas 1, 2 do MODIS.

### 3.5.5 Índices de vegetação

Estimamos os seguintes índices de vegetação: NDVI, SAVI e IAF para todos os pixels das imagens processadas para a área em estudo.

#### 3.5.5.1 NDVI

Sendo o NDVI um indicador sensível da quantidade de vegetação verde, seus valores variam de (-1) a (+1), nas superfícies que exista alguma vegetação o NDVI varia de (0) a (1), já para a presença de água e nuvens o NDVI geralmente tem valor menor que zero.

O índice de vegetação da diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI) foi obtido através da razão entre a diferença das refletâncias do infravermelho próximo ( $r_{b\,V}$ ) e do vermelho ( $r_{b\,IV}$ ), pela soma das mesmas, de acordo com os pesquisadores (ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2005a; RODRIGUES et al., 2009; ARRAES et al., 2012; CUNHA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; GUSMÃO et al., 2013; BEZERRA et al., 2014; SOUZA, 2014), segundo a equação:

$$NDVI = \frac{r_{b\,IV} - r_{b\,V}}{r_{b\,IV} + r_{b\,V}} \quad (15)$$

em que,  $r_{b\,IV}$  e  $r_{b\,V}$ , respectivamente, correspondem às bandas refletivas 5 e 4 do OLI-Landsat 8, e bandas 2 e 1 do produto MOD09GA e MOD09GQ.

#### 3.5.5.2 SAVI

Em seguida, obteve-se o índice de vegetação ajustado as condições do solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* – SAVI), que busca amenizar os efeitos antecedentes do solo (HUETE, 1988). Em diversos estudos observou-se a sua determinação (ALLEN et al., 2002; OLIVEIRA et al, 2012; SOUZA, 2014), conforme equação:

$$SAVI = \frac{(1+L) \cdot (r_{b\,IV} - r_{b\,V})}{L + r_{b\,IV} + r_{b\,V}} \quad (16)$$

em que,  $L$  é a constante de ajuste ao solo, que depende do tipo de solo, o valor mais utilizado pelos pesquisadores é 0,5 (ALLEN et al., 2002; ACCIOLY et al., 2002; BOEGH et al., 2002).

### 3.5.5.3 IAF

Após a obtenção do SAVI tornou-se possível também obter o Índice de Área Foliar (IAF,  $m^2m^{-2}$ ), o qual é determinado pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. Calculamos de acordo com Allen et al. (2007):

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0,69-SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (17)$$

### 3.5.6 Emissividade da superfície

Para a emissividade da superfície, utilizou-se a equação de Planck invertida, válida para um corpo negro, para obtenção da temperatura da superfície. Como cada pixel não emite radiação eletromagnética como um corpo negro, há a necessidade de introduzir a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal -  $\epsilon_{NB}$  (10,4 – 12,5  $\mu m$ ). No entanto, para a obtenção da radiação de onda longa emitida por cada pixel, deve ser considerada a emissividade no domínio da banda larga  $\epsilon_0$  (5 – 100  $\mu m$ ).

As emissividades de cada pixel podem ser obtidas, para  $NDVI > 0$  e  $IAF < 3$  (ALLEN et al., 2002), conforme as equação abaixo:

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 \cdot IAF \quad (18)$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 \cdot IAF \quad (19)$$

Para pixels com  $IAF \geq 3$  assume-se  $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$ ; porém, para corpos de água ( $NDVI < 0$ ) considera-se que  $\epsilon_{NB} = 0,99$  e  $\epsilon_0 = 0,985$ .

### 3.5.7 Temperatura da superfície

Após determinar-se as emissividades, foi obtida a temperatura da superfície -  $T_s$  (K) (ALLEN et al., 2007; RODRIGUES et al., 2009; SILVA et al., 2011; CUNHA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; BEZERRA et al., 2014; SOUZA et al., 2016):

$$T_s = \frac{K_2}{\left(\frac{K_1 \cdot \epsilon_{NB}}{L_{b10}} + 1\right)} \quad (20)$$

em que,  $K_1$  e  $K_2$  ( $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ) são constantes de calibração da banda termal do Landsat 8 TIRS (banda termal 10,  $K_1 = 774,89$  e  $K_2 = 1321,08 \text{ W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ) obtidos através dos metadados da imagens;  $L_{b10}$  é a radiância da banda termal;  $\epsilon_{NB}$  é a emissividade de cada pixel.

### 3.5.8 Radiação de onda longa emitida pela superfície

A radiação de onda longa emitida pela superfície ( $R_{ol\ emit\uparrow}$ ,  $\text{Wm}^{-2}$ ) por cada pixel, foi obtida através da equação de Stefan-Boltzmann, conforme Allen et al. (2007):

$$R_{ol\ emit\uparrow} = \epsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (21)$$

em que,  $\epsilon_0$  é a emissividade de cada pixel;  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ) e  $T_s$  é a temperatura da superfície (K).

### 3.5.9 Radiação de onda curta incidente na superfície

A radiação de onda curta incidente na superfície ( $R_{sol\ inc\downarrow}$ ,  $\text{Wm}^{-2}$ ) é o fluxo de radiação solar direta e difusa que atinge a superfície terrestre, que para condições de céu claro (ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2005a; SILVA et al., 2011) é dada pela seguinte equação:

$$R_{s\ inc\downarrow} = S \cdot \cos Z \cdot d_r \cdot \tau_{sw} \quad (22)$$

em que,  $S$  é a constante solar ( $1367 \text{ Wm}^{-2}$ );  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica.

### 3.5.10 Radiação de onda longa atmosférica

A radiação de onda longa incidente pela atmosfera na direção da superfície -  $R_{ol\ atm}$ , ( $\text{Wm}^{-2}$ ) também foi obtido pela equação de Stefan-Boltzmann, qual seja:

$$R_{ol\ atm\downarrow} = \epsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (23)$$

em que,  $\epsilon_a$  é a emissividade atmosférica obtida por meio da seguinte equação (BASTIAANSSEN et al., 2005):

$$\epsilon_a = 0,85 \cdot (-\ln \cdot \tau_{sw})^{0,09} \quad (24)$$

### 3.5.11 Saldo de radiação instantâneo na superfície

O saldo de radiação instantâneo à superfície -  $R_n$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ) foi estimado conforme expressão (BASTIAANSSEN, 1995; ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2005a; SILVA et al., 2011; SILVA et al., 2012; GUSMÃO et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2015):

$$R_n = R_{s \text{ inc} \downarrow} \cdot (1 - \alpha_{\text{sup}}) - R_{\text{ol emit} \uparrow} + R_{\text{ol atm} \downarrow} - (1 - \epsilon_0) \cdot R_{\text{ol atm} \downarrow} \quad (25)$$

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

### 3.5.12 Saldo de radiação diário

O saldo de radiação diário à superfície -  $R_{n,24h}$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ) foi estimado mediante o modelo calibrado para condições verificadas no semiárido brasileiro (BASTIAANSSEN et al, 1998, SILVA et al., 2011; SILVA et al., 2012):

$$R_{n,24h} = R_{s,24h \downarrow} \cdot (1 - \alpha) - 123 \cdot \tau_{24h} \quad (26)$$

em que,  $\alpha$  é o albedo,  $R_{s,24h \downarrow}$  é a radiação solar média incidente diária ( $\text{W m}^{-2}$ ),  $\tau_{24h}$  é a transmitância atmosférica média diária, que foi obtida por:

$$\tau_{24h} = \frac{R_{s,24h \downarrow}}{R_{s,TOA,24h}} \quad (27)$$

em que,  $R_{s,24h \downarrow}$  é a radiação solar diária incidente à superfície ( $\text{MJ m}^{-2}$ ), obtida da estação meteorológica e  $R_{s,TOA,24h}$  é a radiação solar diária incidente no topo da atmosfera ( $\text{MJ m}^{-2}$ ).

### 3.6 Análises estatísticas dos resultados

Com base em alguns parâmetros estatísticos bem conhecidos, ou seja, o erro médio absoluto - EMA, que representa o módulo da diferença entre o valor observado e o valor estimado. Considerando que  $X$  representa o valor observado,  $X'$  representa o valor estimado a partir dos modelos e  $N$  representa o número de valores, tem-se que o EMA é dada por:

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_i - X'_i| \quad (28)$$

O erro médio percentual (EMP) é dado pela seguinte expressão:

$$EMP (\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_i - X'_i|}{X'_i} \quad (29)$$

E a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) é dada pela seguinte expressão:

$$REQM = \sqrt{\left(\frac{\sum_i^N (X_i - X'_i)^2}{N}\right)} \quad (30)$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

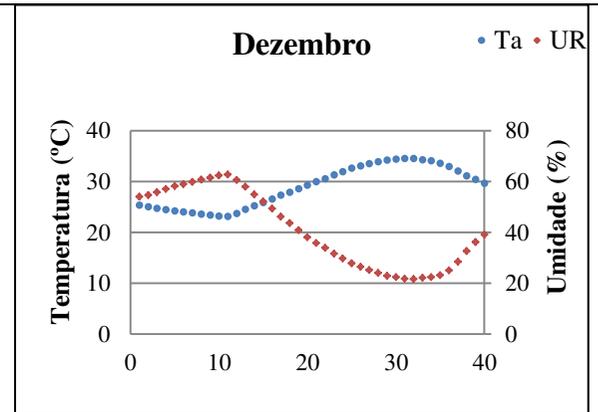
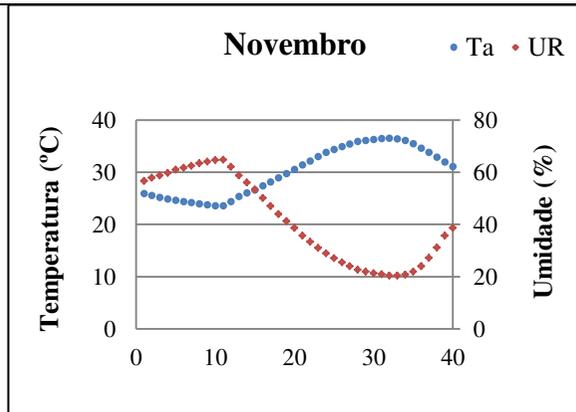
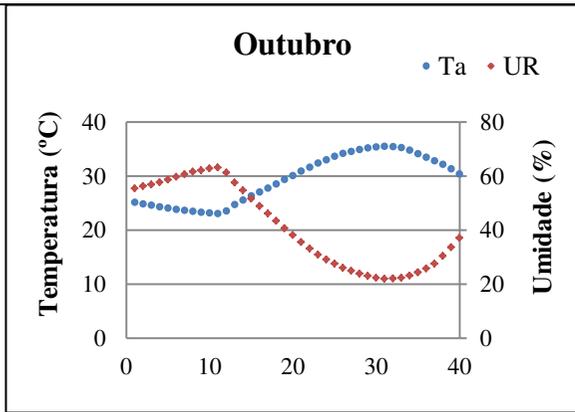
### 4.1 Dados meteorológicos

Nas Figuras 9 e 10 estão representados os ciclos diários da temperatura do ar - Ta (°C) e a umidade relativa – UR (%), que consistem nos valores médios de cada um dos 48 intervalos de 30 minutos contidos em cada dia dos meses nos anos de 2015 e 2016. Observa-se em todos os meses do ano um mesmo padrão que revelam claramente que quando ocorre aumento da Ta simultaneamente os valores de UR diminui.

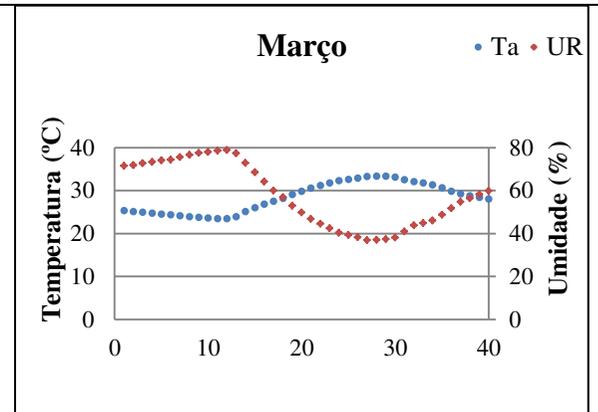
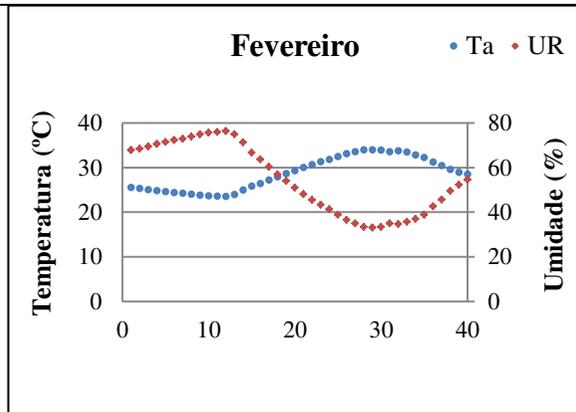
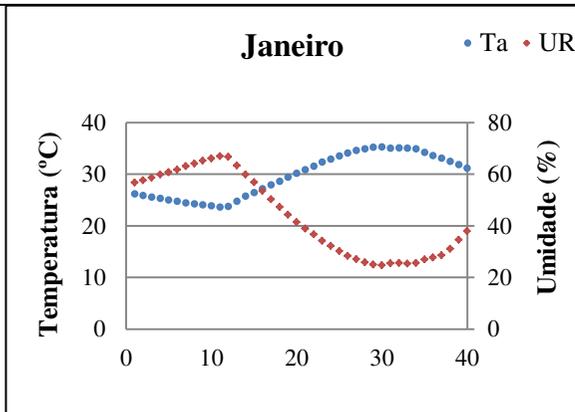
De acordo com a Figura 9 os valores máximos de Ta para a estação da primavera variam entre 23,09 °C a 36,49 °C e para a UR esses valores foram 20,42 % a 64,80 %; para o verão os valores obtidos se situaram entre 23,42 °C a 35,28 °C para Ta e 24,68 % a 78,80% para UR; no outono foram registrados valores de 22,19 °C a 34,72 °C para Ta e 31,80 % a 81,40 % para UR; já no inverno os valores de Ta ficaram entre 21,50 °C a 34,68 °C e 23,13 % a 69,60 para UR; todos esses dados correspondem ao ano de 2015. O valor máximo de Ta ocorreu na estação da primavera (outubro a dezembro) e o mínimo na estação de inverno (julho a setembro), o valor máximo de UR são na estação do outono (abril a junho), e o mínimo encontra-se na estação da primavera.

A Figura 10 representa os ciclos de Ta e UR para o ano de 2016, em que se observa que os valores máximos de Ta para a estação da primavera variam entre 23,31 °C a 36,37 °C e para a UR esses valores foram de 20,64 % a 63,35 %; para o verão os valores obtidos foram de 23,01 °C a 34,08 °C para Ta e 38,47 % a 80,09% para UR; no outono observam-se valores de 22,20 °C a 33,38 °C para Ta e 29,59 % a 79,76 % para UR; já na estação do inverno os valores de Ta se situaram entre 21,56 °C a 35,10 °C e 21,00 % a 65,93 para a UR; todos esses dados correspondem ao ano de 2016. O valor máximo de Ta e UR ocorreram na estação do verão (janeiro a março) e o mínimo de Ta e UR na estação de inverno (julho a setembro) e estação da primavera (setembro a dezembro), respectivamente. De acordo com Santos et al. (2015) as temperaturas encontradas na região de São Gonçalo foram superiores 30 °C principalmente nos meses de novembro a janeiro referente aos anos entre 2010 a 2015, com valor máximo de 37,2 °C, nos meses de maio a julho a uma queda na temperatura.

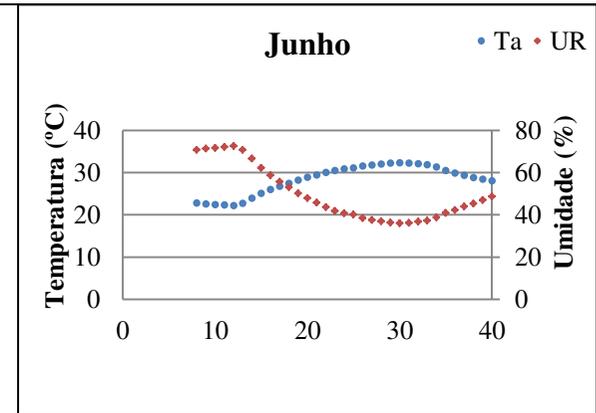
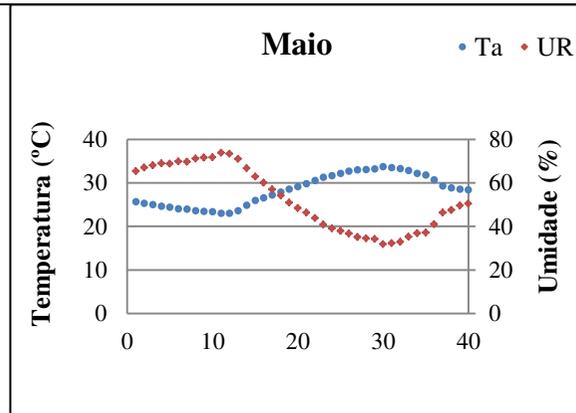
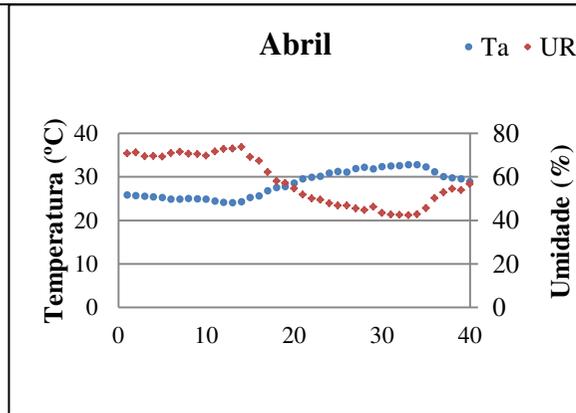
**PRIMAVERA**



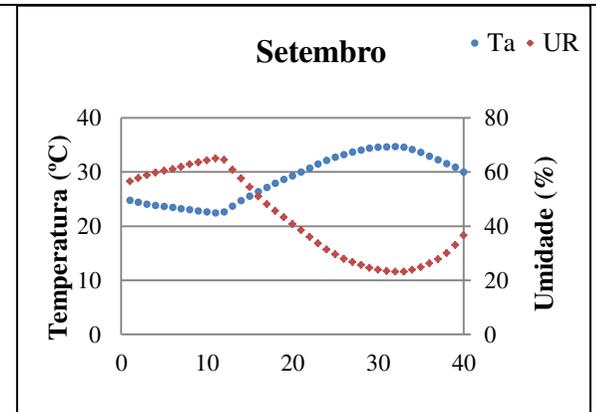
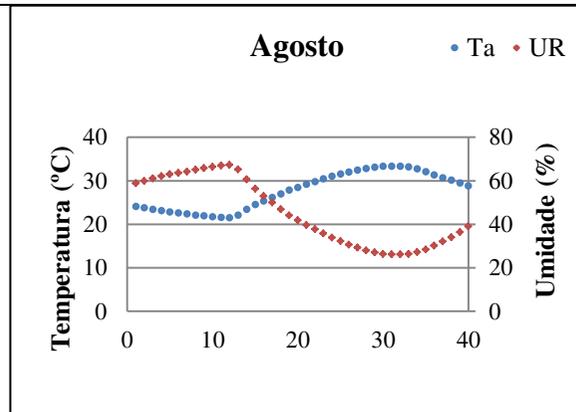
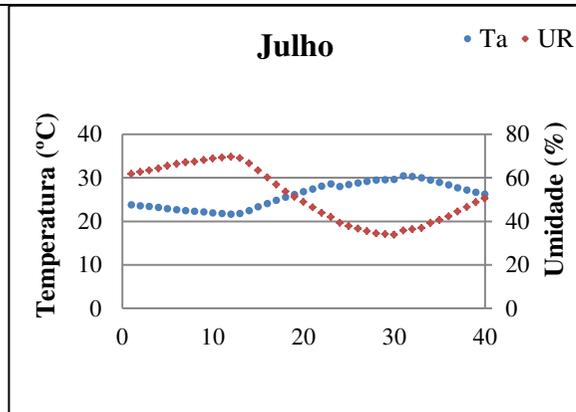
**VERÃO**



## OUTONO

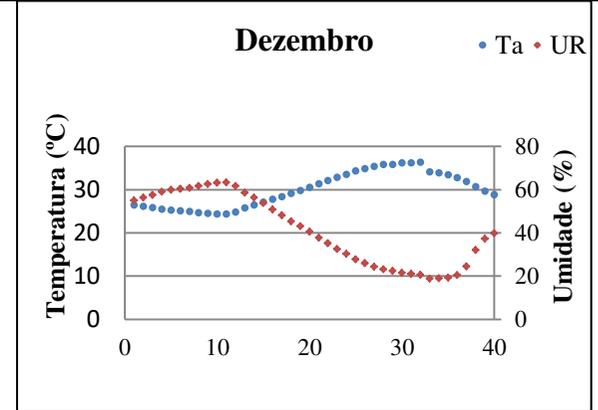
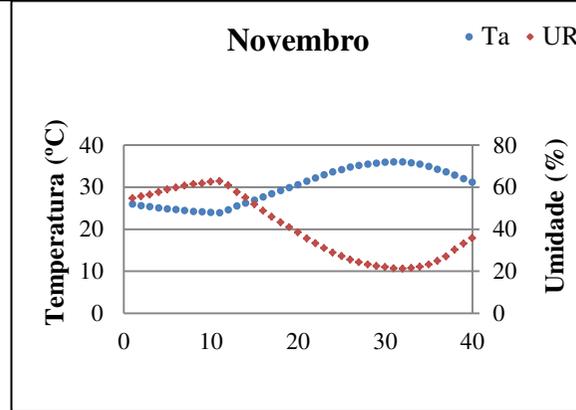
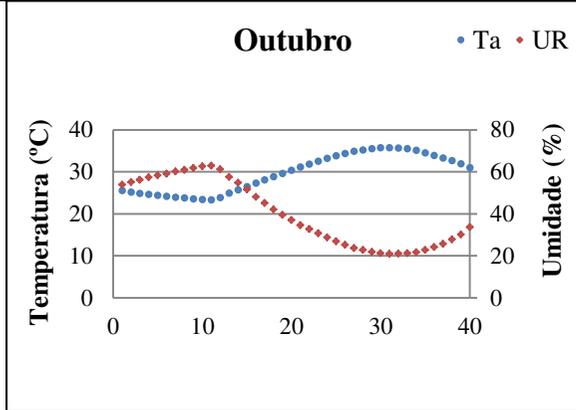


## INVERNO

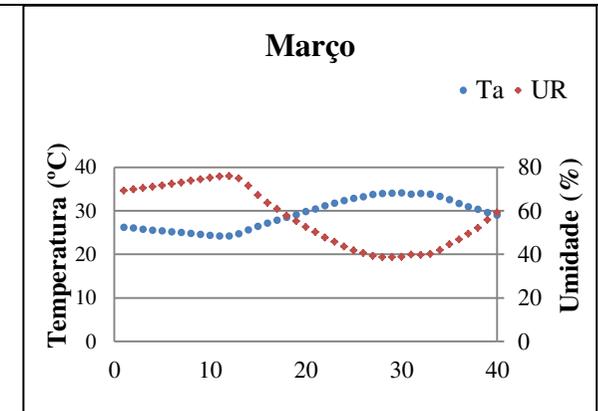
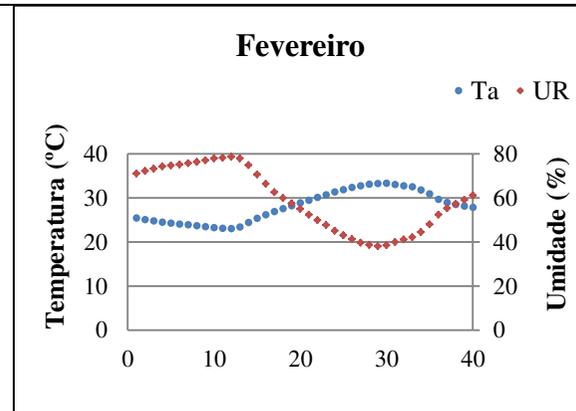
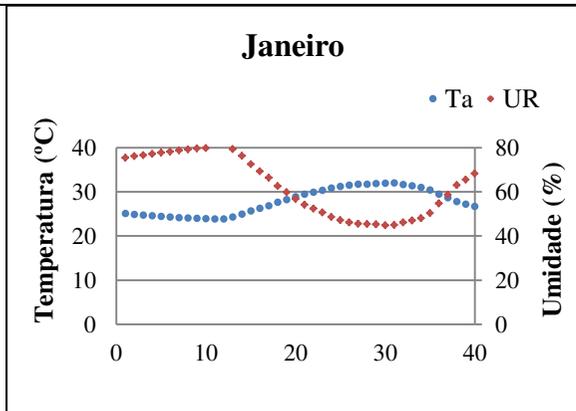


**Figura 9.** Ciclo médio mensal das variáveis meteorológicas, temperatura do ar - Ta (°C) e umidade relativa do ar - UR (%), para o ano de 2015.

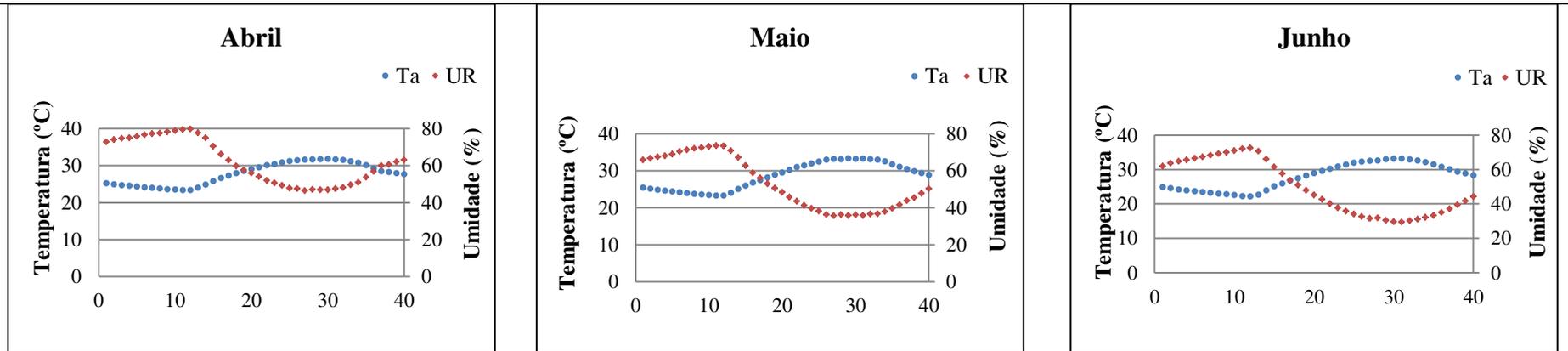
**PRIMAVERA**



**VERÃO**



## OUTONO



## INVERNO

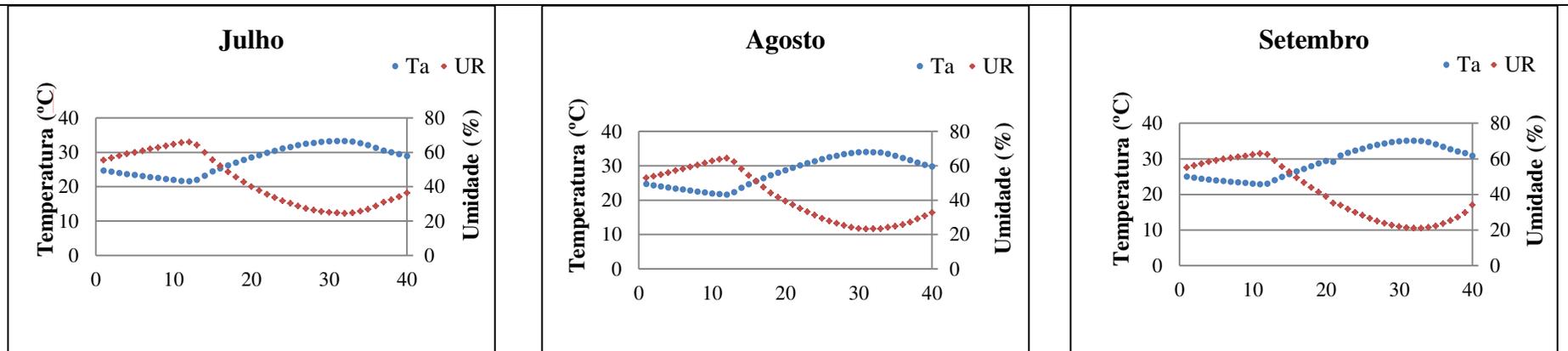


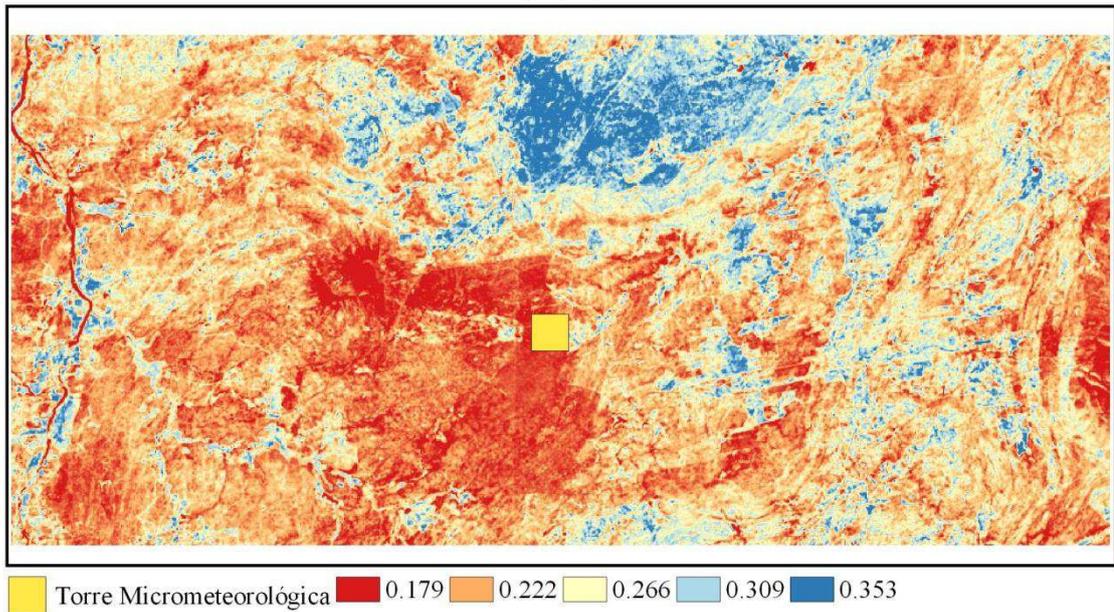
Figura 10. Ciclo médio mensal das variáveis meteorológicas, temperatura do ar - Ta (°C) e umidade relativa do ar - UR (%), para o ano de 2016

## 4.2 Mapas temáticos do albedo

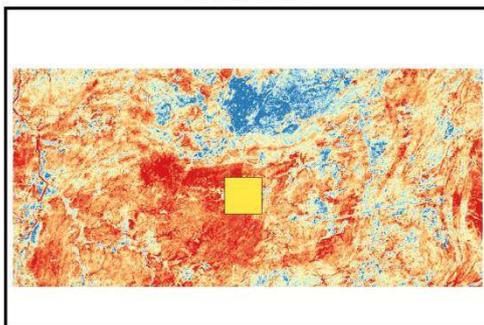
Nas Figuras 11, 12, 13 e 14 estão representados os mapas do albedo de superfície de todo o recorte selecionado para a pesquisa, que envolve as localidades da Torre Micrometeorológica e do Perímetro Irrigado de São Gonçalo elaborados com base em imagens OLI-Landsat 8 nos anos de 2015 e 2016. O albedo da superfície desempenha um controle na quantidade de energia que é absorvida pela superfície terrestre, atuando no balanço final de radiação e energia.

Percebe-se que nas quatro imagens do ano de 2015 (Figura 11) e nas sete imagens do ano de 2016 (Figura 13) os valores de albedo nas proximidades torre (cor laranja na parte central da imagem) apresentam variação com maior frequência entre 0,18 a 0,23, enquanto o albedo em seu entorno varia entre 0,14 a 0,18. Nas Figuras 12 e 14, que compreendem a área do perímetro irrigado, tem-se uma variação de albedo entre 0,13 a 0,15 (vermelho), ocorrendo o mesmo em áreas serranas do recorte. Em consequência da grande heterogeneidade da área não fica nítida a diferenciação entre os cultivos irrigados, solos com grande exposição e caatinga. Estes resultados corroboram com outros estudos realizados para o semiárido, caso do trabalho de Silva et al. (2011) que encontraram para solos sem cobertura vegetal albedo maiores que 28 % e para cultivos irrigados valores do albedo entre 15 % e 20 %. Borges et al. (2010), por sua vez, encontraram valores de albedo no intervalo de 10 % a 20 % em áreas agrícolas irrigadas, bem como de 20 % a 30 % em solo exposto.

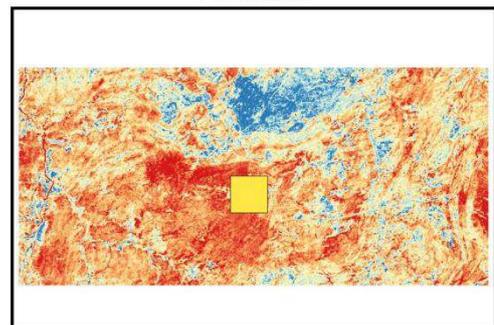
27/09/2015



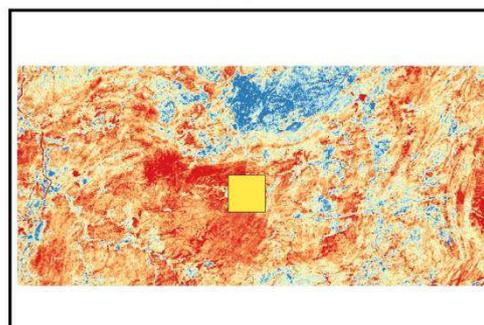
29/10/2015



14/11/2015

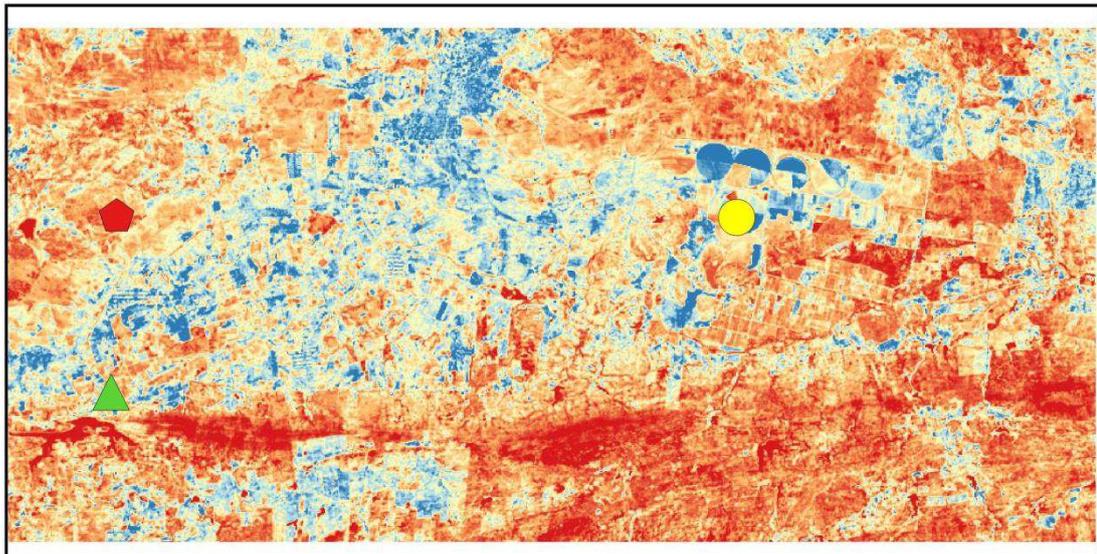


30/11/2015



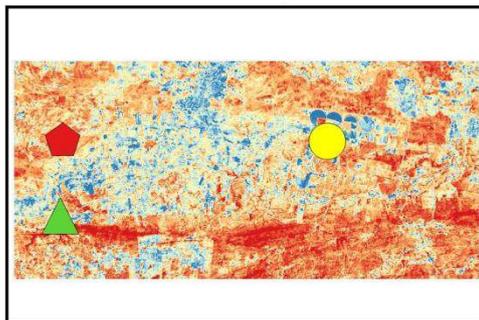
**Figura 11.** Mapas temáticos do albedo de superfície dos produtos do OLI-Landsat 8 na Torre Micrometeorológica referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2015 (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).

04/10/2015



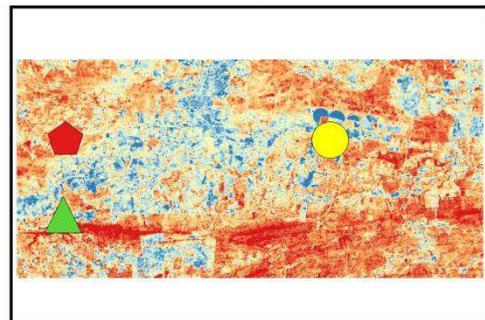
▲ Coqueiro    ⬠ Vegetação Nativa    ● Pivô Central    ■ 0.154    ■ 0.199    ■ 0.244    ■ 0.289    ■ 0.335

05/11/2015



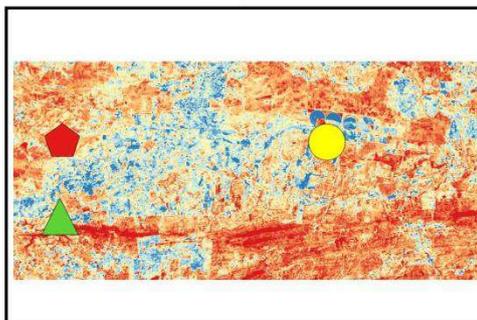
■ 0.143  
■ 0.186  
■ 0.23  
■ 0.273  
■ 0.316

21/11/2015



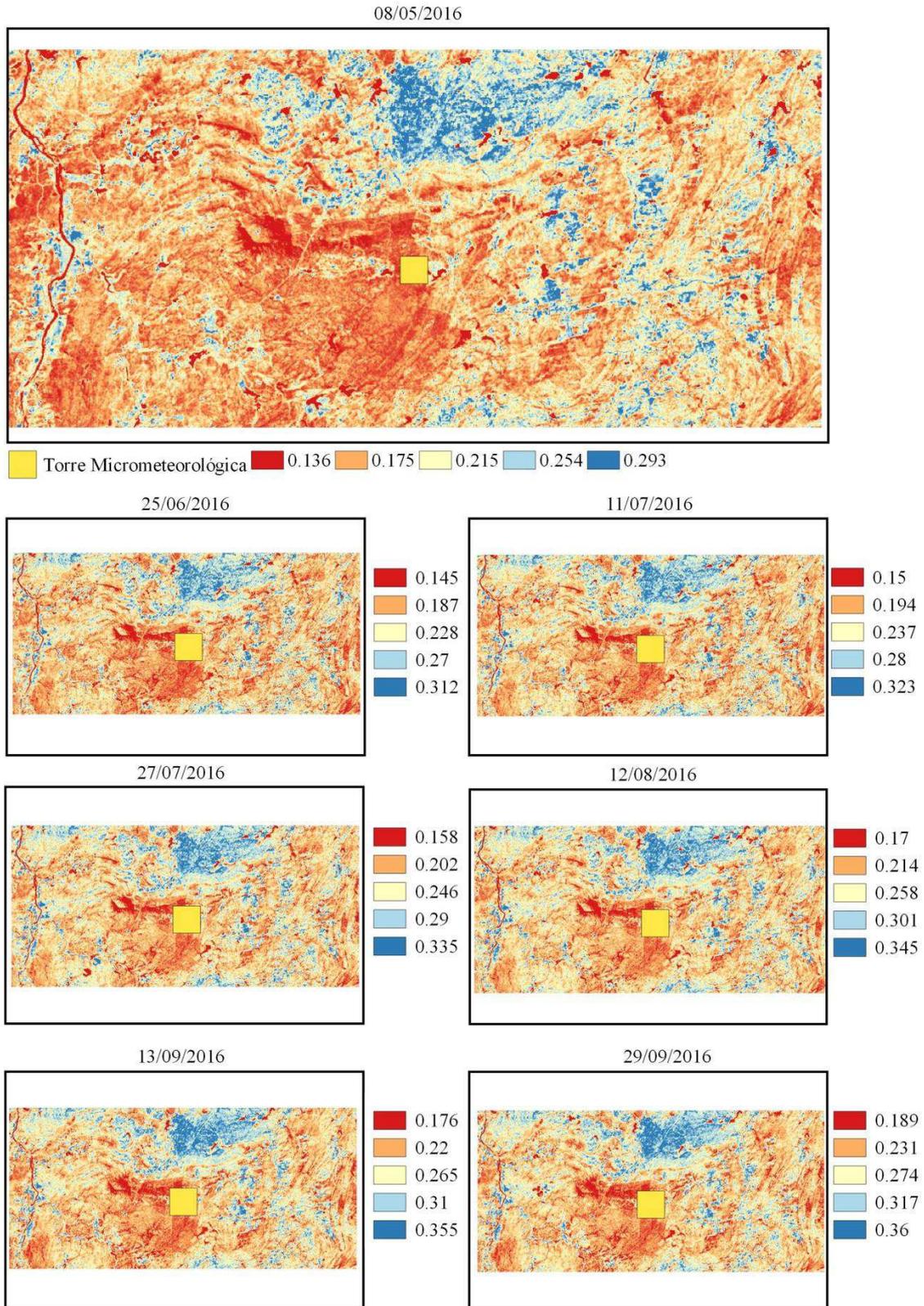
■ 0.157  
■ 0.199  
■ 0.241  
■ 0.284  
■ 0.326

07/12/2015

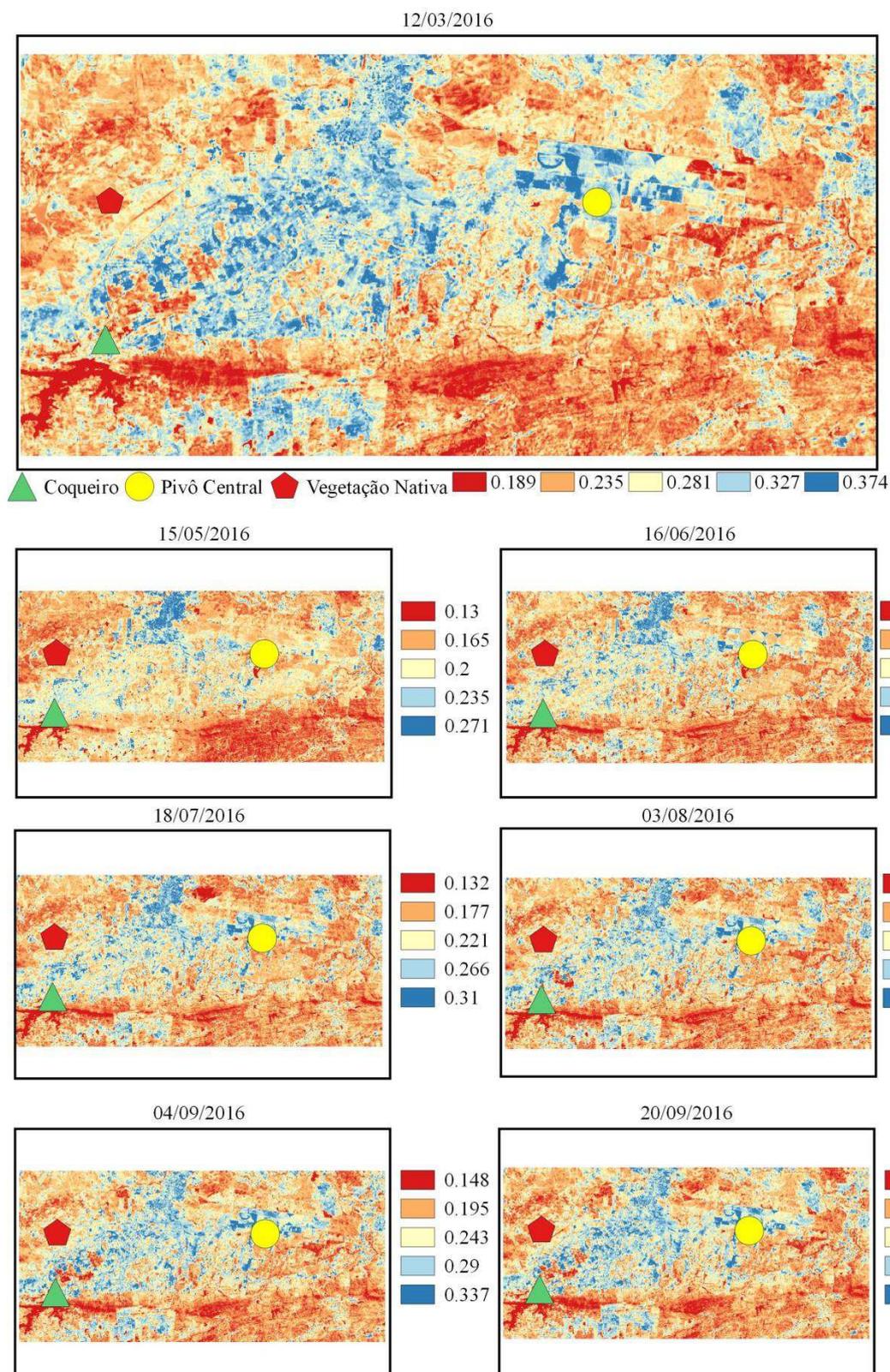


■ 0.146  
■ 0.192  
■ 0.238  
■ 0.284  
■ 0.33

**Figura 12.** Mapas temáticos do albedo de superfície obtidos com imagens OLI-Landsat 8 no Perímetro Irrigado de São Gonçalo referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2015 (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).



**Figura 13.** Mapas temáticos do albedo de superfície obtidos com imagens OLI-Landsat 8 na Torre Micrometeorológica referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2016 (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).



**Figura 14.** Mapas temáticos do albedo de superfície obtidos com imagens OLI-Landsat 8 no Perímetro Irrigado de São Gonçalo referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2016 (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).

Na Tabela 7 estão representados os valores dos erros EMA e EMP e a REQM associados com os valores de albedo obtidos com imagens OLI-Landsat 8 e com MODIS–Terra, confrontados com os dados da Torre Micrometeorológica. O método que apresentou maior concordância com os dados da torre foi o que utilizou dos dados do MOD09GA com resolução de 250 m nos anos de 2015 e 2016, o que resultou em valores de EMA = 0,02, EMP = 12,08 % e REQM = 0,02 para o ano de 2015, e EMA = 0,02, EMP = 9,26 % e REQM = 0,02 no ano de 2016. Já os valores dos dados do Landsat 8 apresentaram EMA = 0,06, EMP = 33,07 % e REQM = 0,07, no ano de 2015, e EMA = 0,07, EMP = 45,05 % e REQM = 0,08 no ano de 2016. Esses resultados demonstram que o produto de albedo do MOD09GA com resolução de 250 m proporcionou um resultado mais satisfatório do que o albedo calculado pelos produtos Landsat 8.

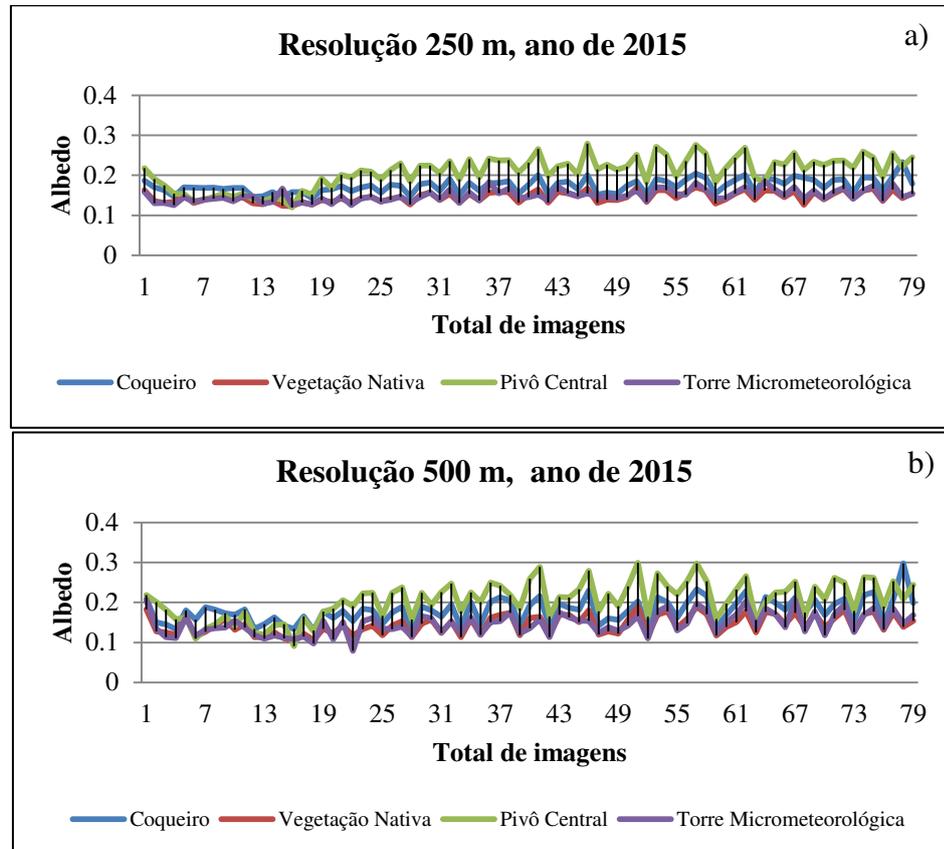
**Tabela 7.** Erro Médio Absoluto – EMA, Erro Médio Percentual - EMP, Raiz do Erro Quadrático Médio - REQM relacionados aos valores medidos e estimados do albedo para os produtos Landsat 8 e MODIS com resolução de 250 m e 500 m nos anos de 2015 e 2016.

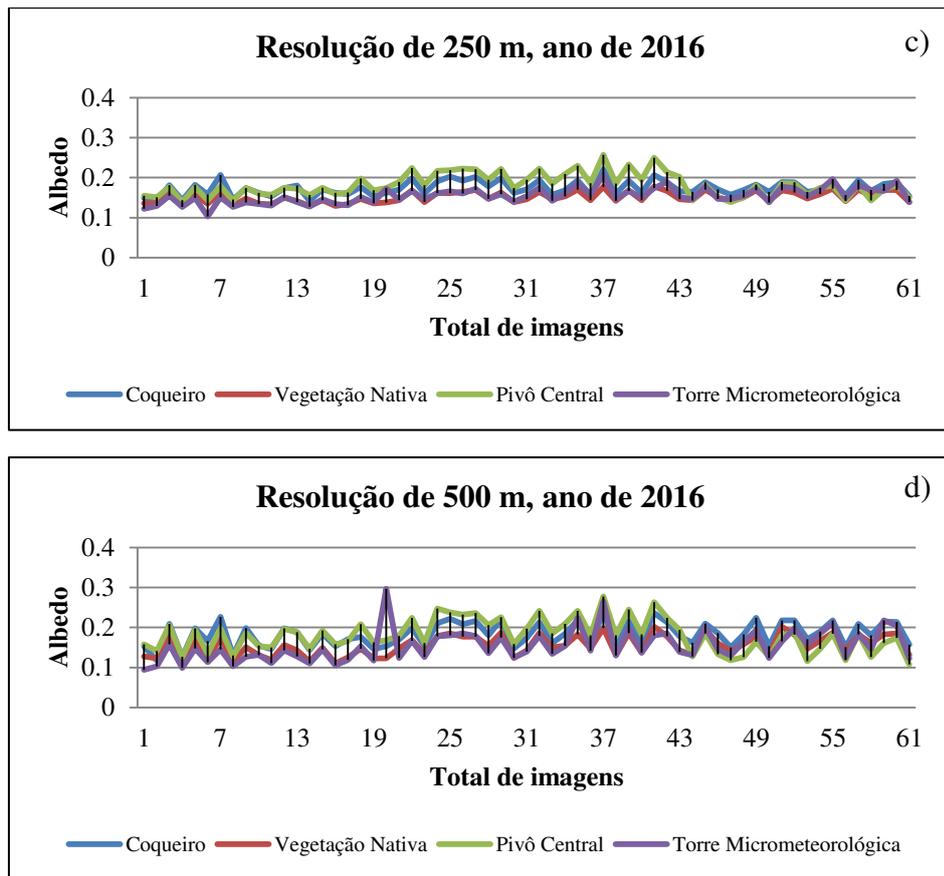
	EMA	EMP (%)	REQM
Landsat 8 (2015)	0.06	33.07	0.07
<b>Resolução 250 m (2015)</b>	<b>0.02</b>	<b>12.80</b>	<b>0.02</b>
Resolução 500 m (2015)	0.02	15.21	0.03
Landsat 8 (2016)	0.07	45.05	0.08
<b>Resolução 250 m (2016)</b>	<b>0.02</b>	<b>9.26</b>	<b>0.02</b>
Resolução 500 m (2016)	0.03	17.09	0.04

Os quatro alvos escolhidos para validação dos resultados no Perímetro Irrigado de São Gonçalo e na localização da Torre Micrometeorológica dos produtos MODIS demonstraram que os valores do albedo ( $\alpha$ ) foram em média, no plantio de coco, vegetação nativa, pivô central e torre micrometeorológica, respectivamente iguais a 17%, 15%, 21% e 15%, na resolução de 250 m (Figura 15a), e de 18%, 14%, 20% e 15% na resolução de 500 m (Figura 15b), para o ano de 2015. No ano de 2016, observa-se que os valores médios do albedo ( $\alpha$ ) para os mesmos alvos foram iguais a 17%, 15% 18% e 15% na resolução de 250 m (Figura 15c) e de 18%, 15%, 18% e 15% na resolução de 500 m (Figura 15d). Estes resultados concordam com Braga (2014), que encontraram valores de albedo no intervalo de 18% a 21% em áreas agrícolas irrigadas, bem como de 18% a 20% em vegetação nativa.

Os valores do albedo para o alvo de pivô central subestimaram todos os demais alvos nas resoluções de 250 m nos anos de 2015 e 2016 com valores de 0,28 e 0,26, respectivamente. Na resolução de 500 m no ano de 2015 os alvos pivô central e torre

obtiveram os mesmos valores, quais sejam, de 0,30 para albedo. O alvo torre no ano de 2016 resultou em um valor de albedo 0,30 para a resolução de 500 m.





**Figura 15.** Comportamento do albedo de superfície dos produtos MODIS referente aos dias e alvos selecionados para a pesquisa: a) resolução de 250 m ano de 2015; b) resolução de 500 m ano de 2015; c) resolução de 250 m ano de 2016; d) resolução de 500 m ano de 2016.

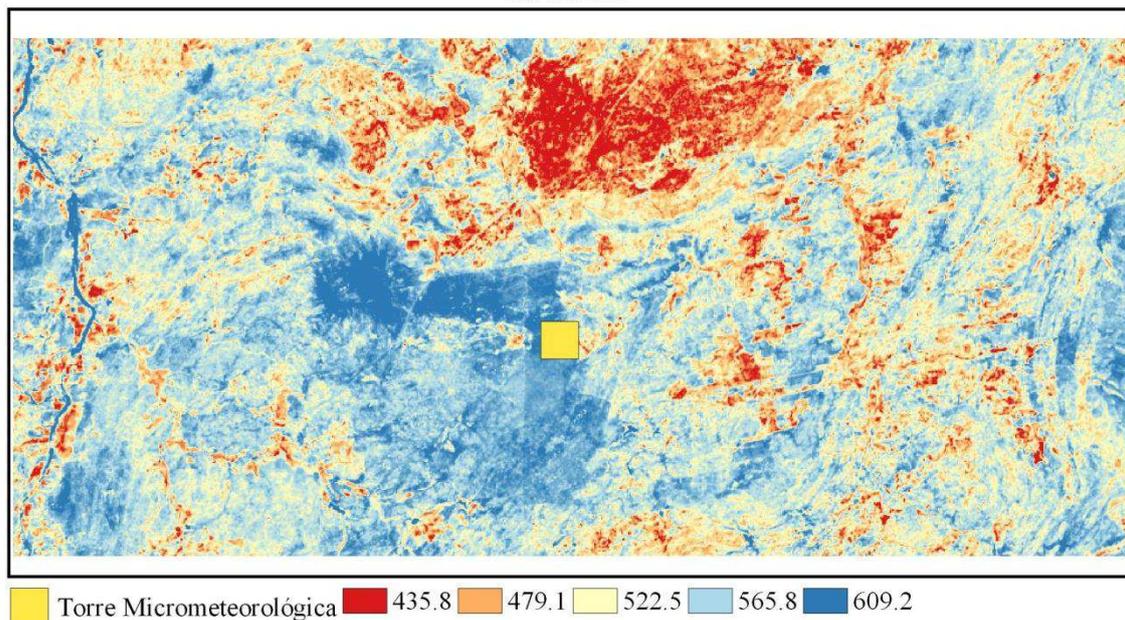
### 4.3 Mapas temáticos do saldo de radiação

As imagens do saldo de radiação ( $R_n$ ) estão representados nas Figuras 16, 17, 18 e 19 para o produto Landsat 8 na região de estudo nos anos de 2015 e 2016. Observa-se que as áreas com tons de azul escuro representadas nas imagens indicam um valor mais alto do  $R_n$ , que se situam vão de 503,00 a 773,00  $Wm^{-2}$ . Observa-se uma semelhança na espacialização dessas variáveis na localização da Torre Micrometeorológica nas quatro imagens estudadas do ano de 2015 (Figura 16) e nas sete imagens do ano de 2016 (Figura 18). Na área em azul claro (centro da imagem) representa a localização da Torre Micrometeorológica onde resultou um  $R_n$  de 465,8 a 575,7  $Wm^{-2}$ .

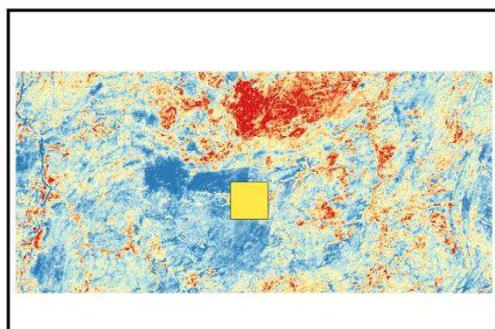
Nas Figuras 17 e 19, que representam o recorte do Perímetro Irrigado de São Gonçalo, as áreas com  $R_n$  variando de 500 a 700  $Wm^{-2}$  representem os corpos d'água do Açude Coremas/Mãe D'água. Esses valores do  $R_n$  foram elevados em decorrência do seu albedo ter sido baixo. Silva e Bezerra (2006) encontraram valores de  $R_n$  de

aproximadamente  $705 \text{ Wm}^{-2}$  (2000) e  $712 \text{ Wm}^{-2}$  (2006) sobre o lago de Sobradinho. As áreas em amarelo claro correspondem principalmente à vegetação nativa, e verifica-se que os valores de  $R_n$  variaram de  $447,2$  a  $581,6 \text{ Wm}^{-2}$ . As áreas em vermelho destacam o cultivo irrigado e a região serrana do recorte, onde o  $R_n$  variou de  $377$  a  $482,3 \text{ Wm}^{-2}$  no ano de 2015 e de  $452,6$  a  $361 \text{ Wm}^{-2}$  no ano de 2016. Os valores encontrados corroboram com os de Braga (2014) que para o PISG obtiveram valores superiores de  $700 \text{ Wm}^{-2}$  para o leito do açude, enquanto na vegetação nativa os valores de  $R_n$  foram de  $550$  a  $800 \text{ Wm}^{-2}$ . As áreas de solo exposto apresentaram valores de  $500$  a  $600 \text{ Wm}^{-2}$  e nas áreas irrigadas o  $R_n$  variou entre  $600$  a  $780 \text{ Wm}^{-2}$ , nos anos de 2008 e 2013.

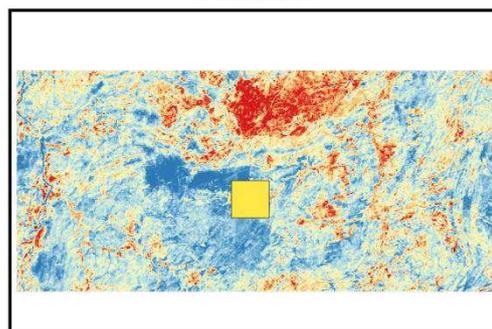
27/09/2015



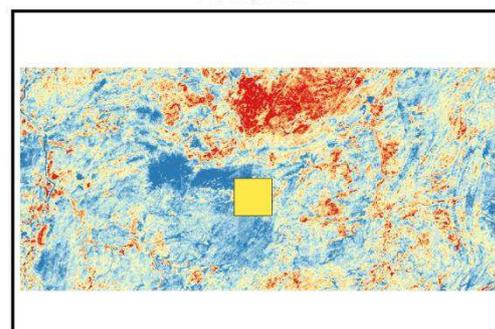
29/10/2015



14/11/2015

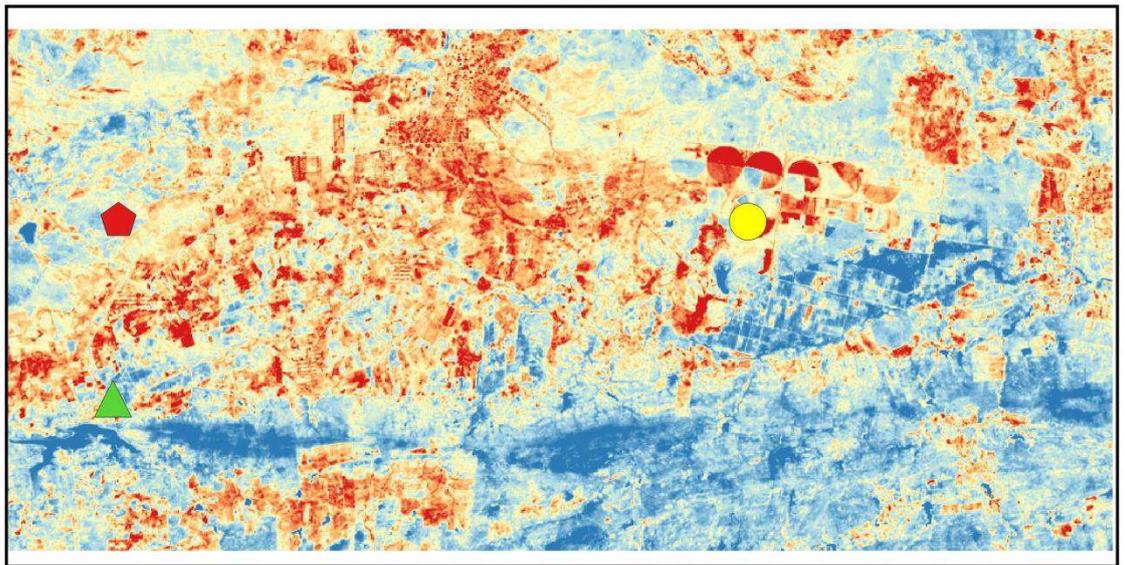


30/11/2015



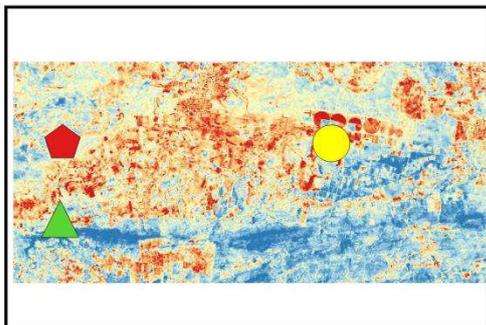
**Figura 16.** Mapas temáticos do saldo de radiação instantâneo obtidos com o OLI/TIRS Landsat 8 na Torre Micrometeorológica referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2015 (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).

04/10/2015



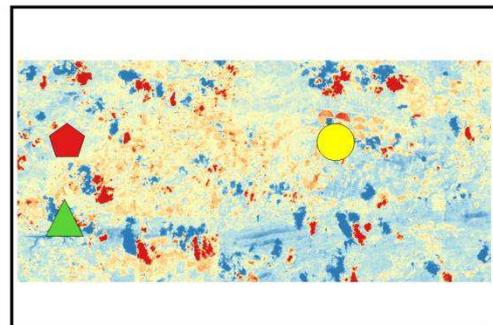
▲ Coqueiro ● Pivô Central ⬠ Vegetação Nativa ■ 444.1 ■ 495.4 ■ 546.7 ■ 598 ■ 649.3

05/11/2015



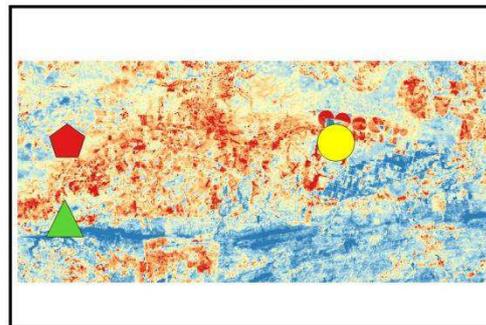
■ 482.3  
■ 531.9  
■ 581.6  
■ 631.2  
■ 680.8

21/11/2015



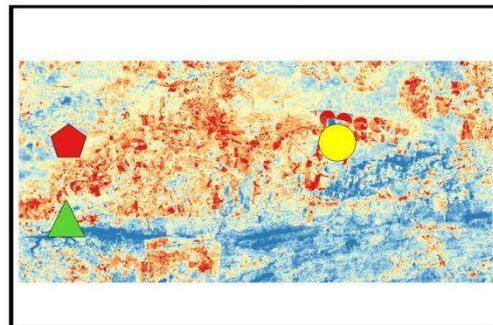
■ 475.2  
■ 523.2  
■ 571.2  
■ 619.2  
■ 667.2

07/12/2015



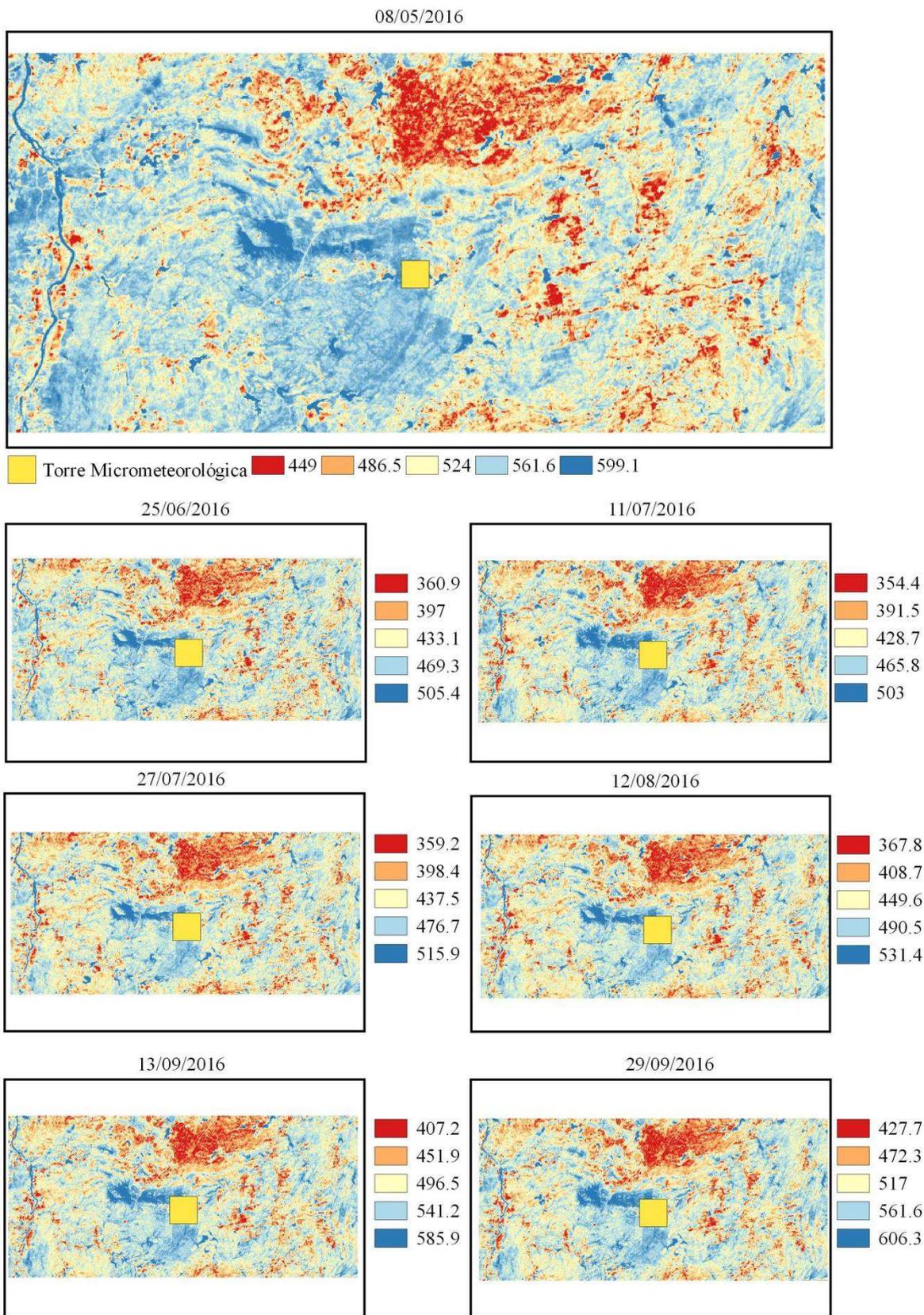
■ 436  
■ 488  
■ 540  
■ 592  
■ 644

23/12/2015

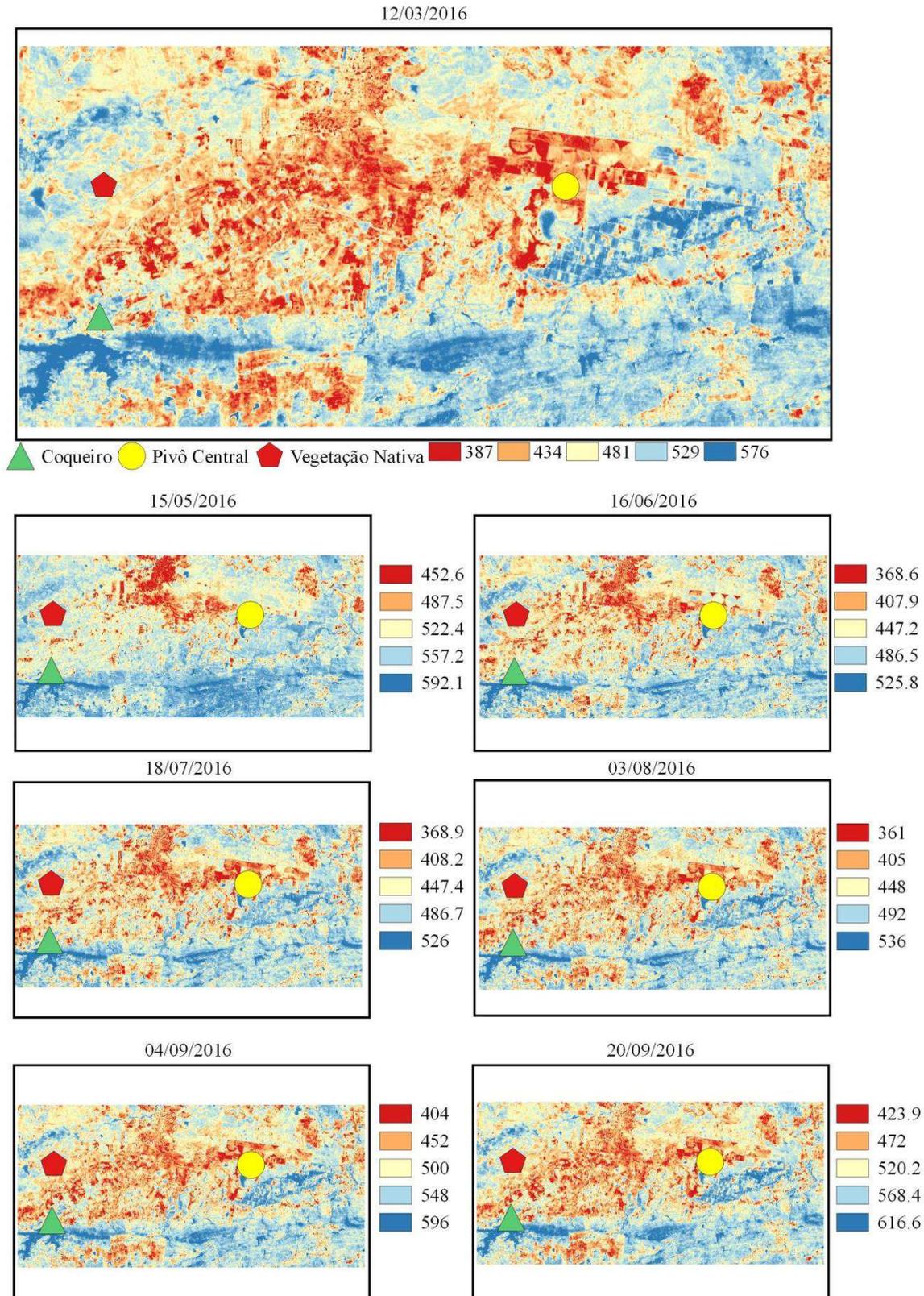


■ 377  
■ 476  
■ 575  
■ 674  
■ 773

**Figura 17.** Mapas temáticos do saldo de radiação instantâneo obtidos com o OLI/TIRS Landsat 8 no Perímetro Irrigado de São Gonçalo referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2015 (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).



**Figura 18.** Mapas temáticos do saldo de radiação instantâneo ( $\text{Wm}^{-2}$ ) dos produtos do OLI/TIRS Landsat 8 na Torre Micrometeorológica referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2016 (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).



**Figura 19.** Mapas temáticos do saldo de radiação instantâneo ( $Wm^{-2}$ ) dos produtos do OLI/TIRS Landsat 8 no Perímetro Irrigado de São Gonçalo referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2016 (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).

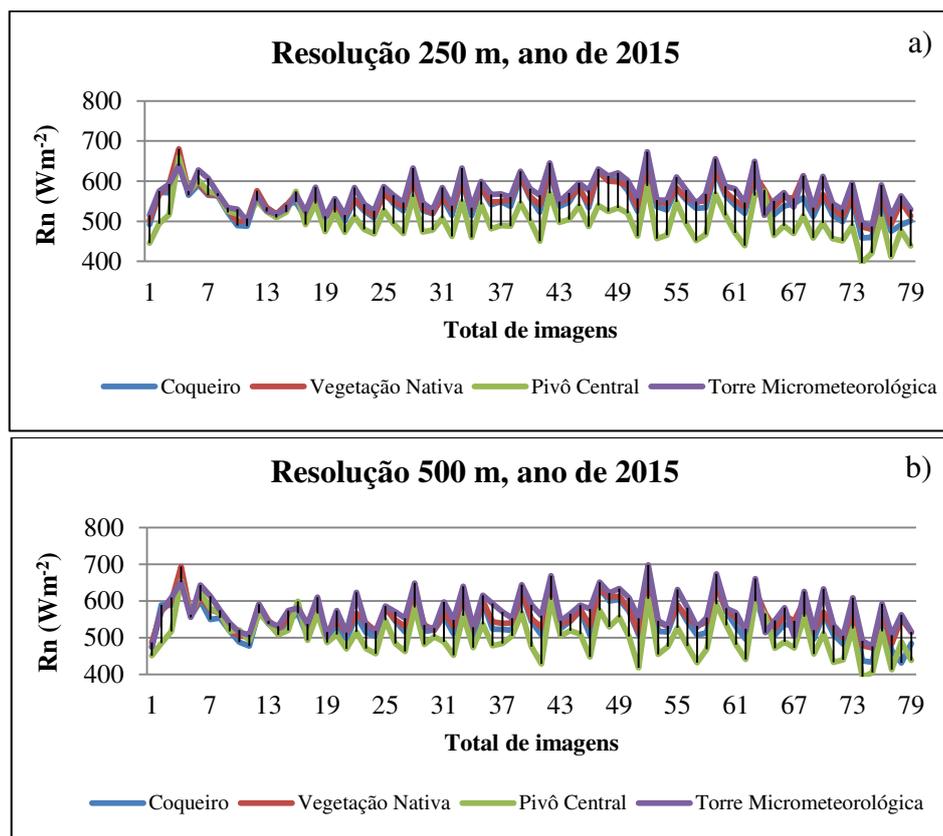
Na Tabela 8 estão representados os valores de EMA, EMP e REQM associados com os valores do saldo de radiação instantâneo obtidos com imagens OLI/TIRS Landsat 8 e com o MODIS, em comparação com os dados da torre micrometeorológica. O método que apresentou maior concordância com os dados da torre foi o que utilizou dos dados do MOD09GA, com resolução de 250 m, nos anos de 2015 e 2016, o que resultou em valores de EMA de 40,25  $\text{Wm}^{-2}$ , EMP de 7,15 % e REQM de 46,25  $\text{Wm}^{-2}$  no ano de 2015, e EMA de 49,95  $\text{Wm}^{-2}$ , EMP 8,83 % e REQM de 56,53  $\text{Wm}^{-2}$  no ano de 2016. Já os valores obtidos com o OLI/TIRS Landsat 8 apresentaram EMA de 71,77  $\text{Wm}^{-2}$ , EMP de 12,77 % e REQM de 85,35  $\text{Wm}^{-2}$ , no ano de 2015, e EMA de 83,96  $\text{Wm}^{-2}$ , EMP de 14,30 % e REQM de 91,09  $\text{Wm}^{-2}$ , no ano de 2016. Esses resultados demonstram que saldo de radiação instantâneo obtido com o MOD09GA, com resolução de 250 m, proporcionou um resultado mais satisfatório do que o saldo de radiação instantâneo calculado pelos produtos Landsat 8.

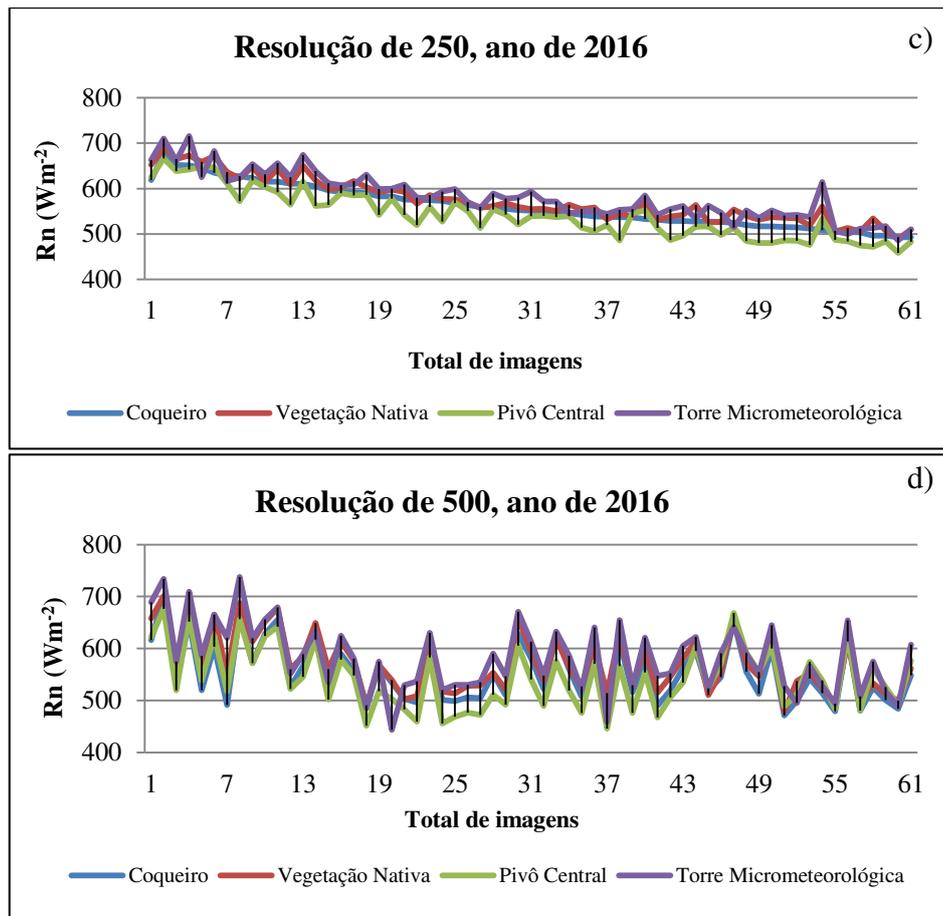
**Tabela 8.** Erro Médio Absoluto - EMA ( $\text{Wm}^{-2}$ ), Erro Médio Percentual - EMP, Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) relacionados aos valores medidos e estimados do saldo de radiação instantâneo para os produtos OLI/TIRS Landsat 8 e MODIS com resolução de 250 m e 500 m nos anos de 2015 e 2016.

	EMA ( $\text{Wm}^{-2}$ )	EMP (%)	REQM ( $\text{Wm}^{-2}$ )
Landsat 8 (2015)	71.77	12.77	85.35
<b>Resolução 250 m (2015)</b>	<b>39.69</b>	<b>7.04</b>	<b>46.25</b>
Resolução 500 m (2015)	45.77	8.05	54.41
Landsat 8 (2016)	83.96	14.3	91.09
<b>Resolução 250 m (2016)</b>	<b>49.95</b>	<b>8.83</b>	<b>56.53</b>
Resolução 500 m (2016)	56.49	9.92	65.83

Os quatro alvos escolhidos para validação dos resultados no Perímetro Irrigado de São Gonçalo e na localização da Torre Micrometeorológica dos produtos MODIS demonstraram que os valores do saldo de radiação instantâneo ( $R_n$ ) foram em média, no plantio de coco, vegetação nativa, pivô central e torre micrometeorológica, respectivamente iguais a 546,82  $\text{Wm}^{-2}$ , 556,72  $\text{Wm}^{-2}$ , 504,23  $\text{Wm}^{-2}$  e 568,41  $\text{Wm}^{-2}$  na resolução de 250 m (Figura 20a), e de 542,57  $\text{Wm}^{-2}$ , 557,59  $\text{Wm}^{-2}$ , 506,54  $\text{Wm}^{-2}$  e 571,48  $\text{Wm}^{-2}$  na resolução de 500 m (Figura 20b), para o ano de 2015. No ano de 2016, observa-se que os valores médios do  $R_n$  para os mesmos alvos foram iguais a 560,99  $\text{Wm}^{-2}$ , 573,89  $\text{Wm}^{-2}$ , 541,62  $\text{Wm}^{-2}$  e 582,33  $\text{Wm}^{-2}$  na resolução de 250 m (Figura 20c) e de 552,72  $\text{Wm}^{-2}$ , 571,03  $\text{Wm}^{-2}$ , 543,09  $\text{Wm}^{-2}$  e 582,60  $\text{Wm}^{-2}$  na resolução de 500 m (Figura 20d).

Os valores do  $R_n$  para o alvo de pivô central subestimaram todos os demais alvos nas resoluções de 250 m nos anos de 2015 e 2016 com valores de  $698,53 \text{ Wm}^{-2}$  e  $737,68 \text{ Wm}^{-2}$  respectivamente. Na resolução de 500 m no ano de 2015 os alvos que apresentaram maiores valores de  $R_n$  foram a vegetação nativa e a torre micrometeorológica. Já na resolução de 500 m no ano de 2016 os alvos coqueiro e vegetação nativa obtiveram os mesmos valores, quais sejam, de  $700 \text{ Wm}^{-2}$  para o  $R_n$ . Braga (2009), encontrou  $R_n$  acima de  $650 \text{ Wm}^{-2}$  para áreas do Perímetro Irrigado de São Gonçalo, esses valores vem a corresponder as áreas de plantio de coqueiro anão e bananeiras, solo exposto, áreas com grandes cultivos de solos, ou solo preparado para o plantio. Já Bezerra (2006) e Paiva (2005) encontraram para superfícies vegetadas  $600 \text{ Wm}^{-2}$  no lago de Sobradinho na Bahia. Silva (2016) encontrou valores de saldo de radiação instantâneo para áreas vegetadas (caatinga arbustiva densa) no valor de  $608,12 \text{ Wm}^{-2}$ , solo exposto no valor de  $335,73 \text{ Wm}^{-2}$ , áreas irrigadas de  $413,16 \text{ Wm}^{-2}$  e urbana de  $212,80 \text{ Wm}^{-2}$ .



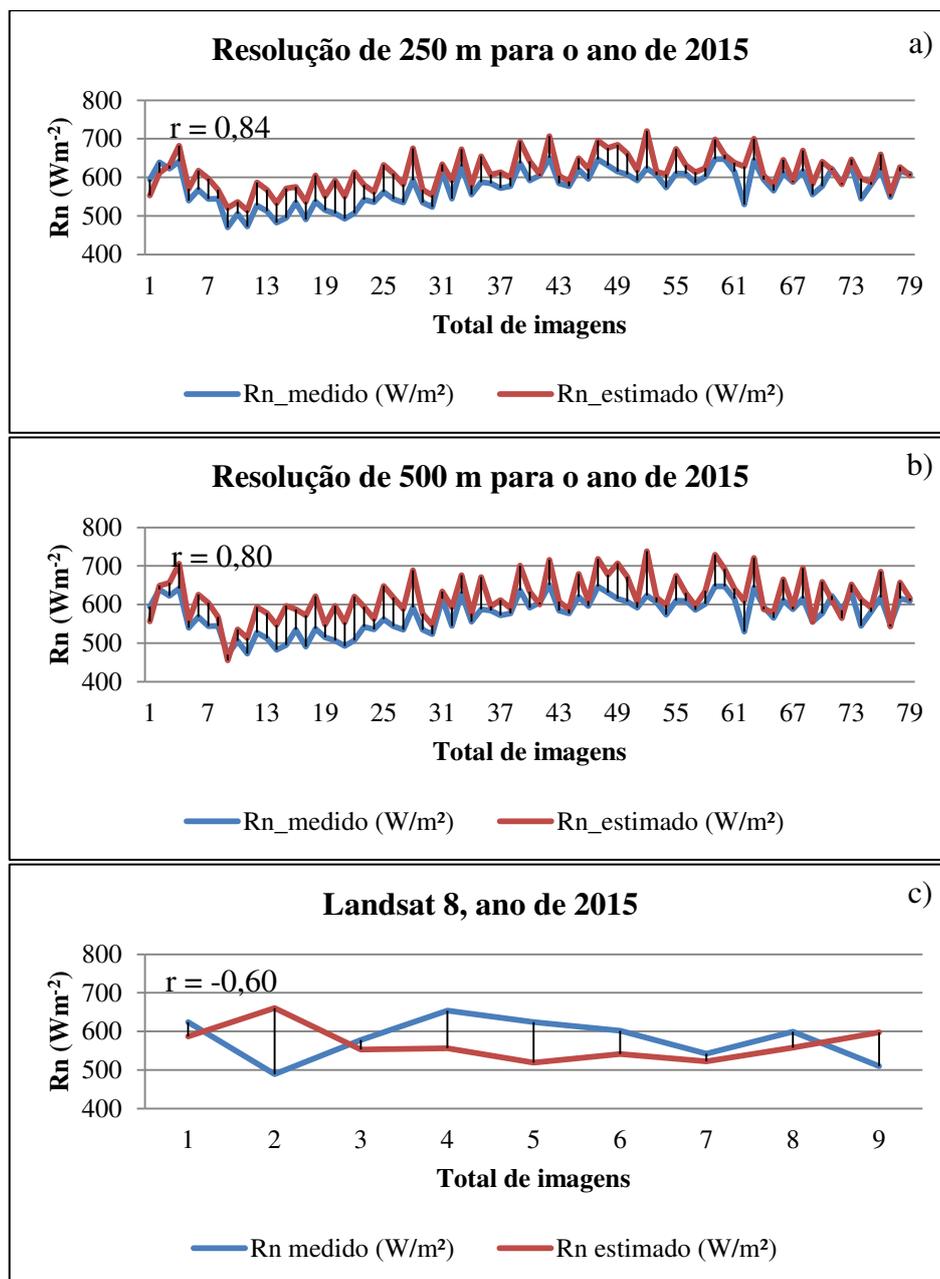


**Figura 20.** Comportamento do saldo de de radiação instantâneo ( $\text{Wm}^{-2}$ ) obtido dos produtos MODIS referentes aos dias e alvos selecionados para a pesquisa: a) resolução de 250 m ano de 2015; b) resolução de 500 m ano de 2015; c) resolução de 250 m ano de 2016; d) resolução de 500 m ano de 2016.

#### 4.4 Validação do saldo de radiação instantâneo

Os valores do saldo de radiação computados para o MODIS/TERRA com resoluções de 250 m e 500 m e Landsat 8 no instante da passagem do satélite, para a Torre Micrometeorológica experimental, situada em área de caatinga preservada, localizada na região de Serra Negra do Norte na ESEC, variam conforme representação das Figuras 21 e 22. Os resultados obtidos para a resolução de 250 m variam entre  $513,89 \text{ Wm}^{-2}$  e  $720,15 \text{ Wm}^{-2}$  para os dias 03/06/15 e 22/10/15; os resultados com resolução de 500 m variam entre  $455,34 \text{ Wm}^{-2}$  e  $738,59 \text{ Wm}^{-2}$  para os dias 11/05/15 e 22/10/15; os resultados obtidos para o OLI/TIRS Landsat 8 se situaram entre  $519,40 \text{ Wm}^{-2}$  e  $660,80 \text{ Wm}^{-2}$ , para os dias 14/11/15 e 04/10/15. No entanto, os valores máximos e mínimos medidos no período estudado foram na resolução de 250 m e 500 m entre  $446,63 \text{ Wm}^{-2}$  e  $650,48 \text{ Wm}^{-2}$  para os dias 20/03/15 e 29/09/15; para o OLI/TIRS Landsat 8 esses valores foram iguais a  $488,89 \text{ Wm}^{-2}$  e  $654,29 \text{ Wm}^{-2}$  para os dias 04/10/15 e 05/11/15 (Figura 21). Os valores dos

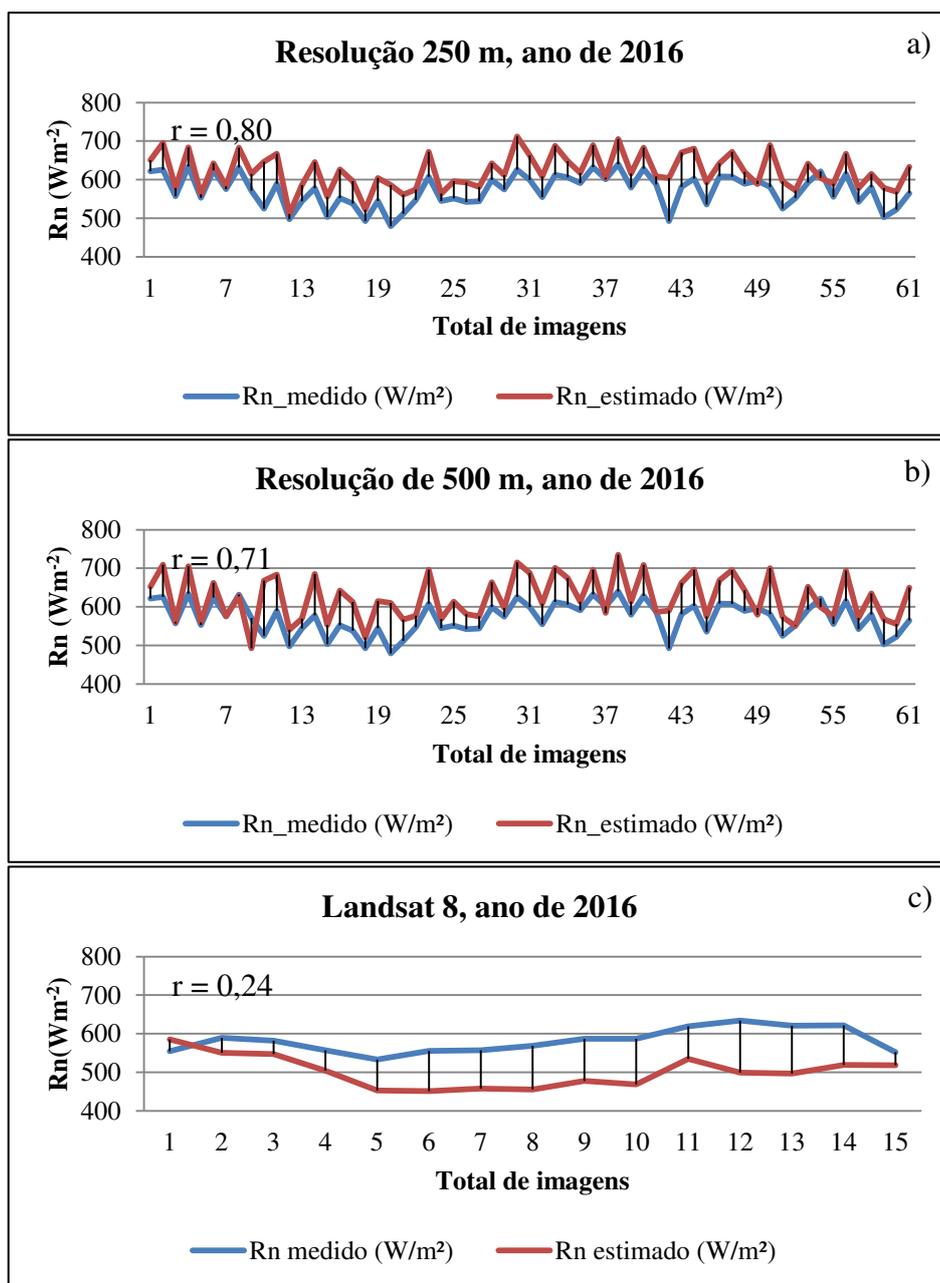
coeficientes de Pearson foram de 0,84, 0,80 e -0,60 para as resoluções de 250 m e 500 m e Landsat 8 no ano de 2015.



**Figura 21.** Representação gráfica dos valores de  $R_n$  estimado e medido para os dias em estudo no ano de 2015 para os produtos: a) MODIS, resolução de 250 m; b) MODIS, resolução de 500 m e c) OLI/TIRS Landsat 8.

Já para o ano de 2016 houve variação da seguinte maneira (Figura 22): os resultados obtidos para a resolução de 250 m variam entre  $510,70 Wm^{-2}$  e  $711,785 Wm^{-2}$  para os dias 27/04/16 e 22/09/16; os resultados com resolução de 500 m variam entre e  $492,75 Wm^{-2}$  e  $734,88 Wm^{-2}$  para os dias 29/03/16 e 17/10/16; os resultados obtidos para o

OLI/TIRS Landsat 8 foram entre  $451,30 \text{ Wm}^{-2}$  e  $585,40 \text{ Wm}^{-2}$  para os dias 11/07/16 e 12/03/16. No entanto, os valores máximos e mínimos medidos no período estudado foram na resolução de 250 m e 500 m entre  $479,65 \text{ Wm}^{-2}$  e  $640,11 \text{ Wm}^{-2}$  para os dias 27/07/2016 e 17/10/2016; para o OLI/TIRS Landsat 8 esses valores foram  $532,89 \text{ Wm}^{-2}$  e  $634,13 \text{ Wm}^{-2}$  para os dias 25/06/16 e 13/09/2016. Os valores dos coeficientes de Pearson foram de 0,80, 0,71 e 0,24 para as resoluções de 250 m e 500 m e Landsat 8 no ano de 2016.



**Figura 22.** Representação gráfica dos valores de  $R_n$  instantâneo estimado e medido para os dias em estudo no ano de 2016 para os produtos: a) MODIS, resolução de 250 m; b) MODIS, resolução de 500 m e c) OLI/TIRS Landsat 8.

#### 4.5 Mapas temáticos do saldo de radiação diário

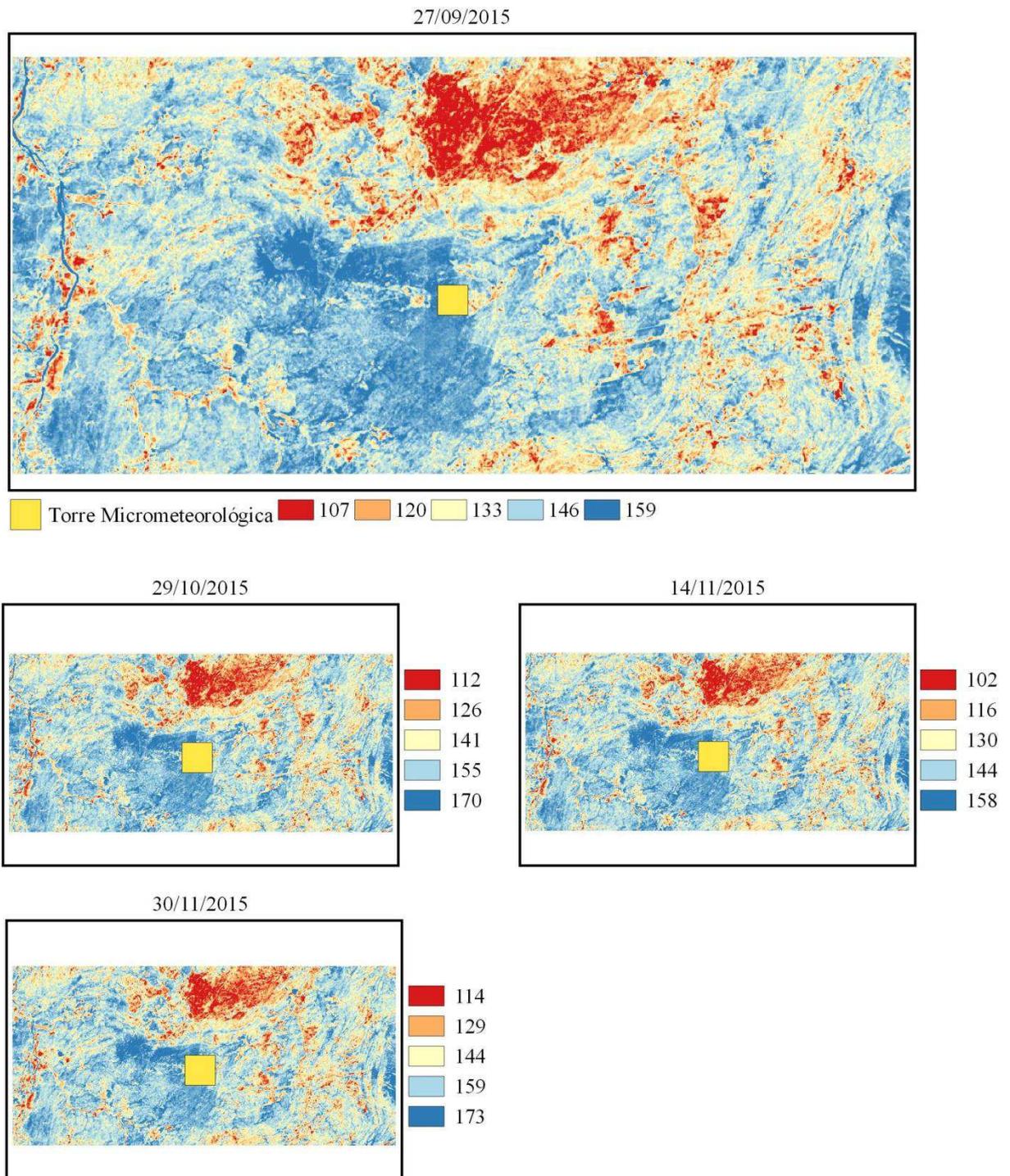
As Figuras 23, 24, 25 e 26 representam o saldo de radiação diário para o produto Landsat 8 nos anos de 2015 e 2016, que abrange o Perímetro Irrigado de São Gonçalo e a área de localização da Torre Micrometeorológica. No ano de 2015 o saldo de radiação diário na torre atingiu valores entre 158 a 173  $\text{Wm}^{-2}$ , como mostra a Figura 23. Na pesquisa do ano de 2016 os valores do saldo de radiação diário para a área da torre foram entre 89,1  $\text{Wm}^{-2}$  a 168  $\text{Wm}^{-2}$  (Figura 25). Já para o ano de 2015 no Perímetro Irrigado de São Gonçalo os saldos de radiação diários para os alvos em estudo coqueiro, vegetação nativa e pivô central foram: 144 a 167,3  $\text{Wm}^{-2}$ , 107 a 127,1  $\text{Wm}^{-2}$ , 119 a 140,5  $\text{Wm}^{-2}$  respectivamente (Figura 24). No ano de 2016 os valores foram entre 125 a 152  $\text{Wm}^{-2}$ , 91,7 a 115  $\text{Wm}^{-2}$  e 103 a 123  $\text{Wm}^{-2}$ , para os mesmos alvos em estudo, respectivamente (Figura 26). Lima et al. (2012) encontraram para o saldo de radiação diário médio os valores na ordem de 95,99 a 168,07  $\text{W m}^{-2}$ . Já Oliveira et al. (2015), diante da estimativa do saldo de radiação diário observaram valores de 95,4 a 157,5  $\text{W m}^{-2}$ , com média de 125,4  $\text{W m}^{-2}$ . Os valores encontrados corroboram com Silva et al. (2011) que no ano de 2008 encontraram o saldo de radiação diário no valor de 173,38 a 196,64  $\text{W m}^{-2}$  na água, sobre áreas irrigadas foi entre 146,87 a 164,70  $\text{W m}^{-2}$ , em área de solo exposto foi na ordem de 146,87 a 164,69  $\text{W m}^{-2}$ .

Na Tabela 9 estão representados os valores de EMA, EMP e REQM associados com os valores do saldo de radiação diário obtidos com imagens OLI/TIRS Landsat 8 e com o MODIS, em comparação com os dados da Torre Micrometeorológica. O método que apresentou maior concordância com os dados da torre foi o que utilizou dos dados do OLI/TIRS Landsat-8, nos anos de 2015 e 2016, o que resultou em valores de EMA = 34,33  $\text{Wm}^{-2}$ , EMP = 18,77 % e REQM = 37,56  $\text{Wm}^{-2}$  no ano de 2015, e EMA = 53,91  $\text{Wm}^{-2}$ , EMP = 32,10 % e REQM = 59,23  $\text{Wm}^{-2}$  no ano de 2016. Já os valores obtidos com o MODIS apresentaram EMA = 63,46  $\text{Wm}^{-2}$ , EMP = 35,27 % e REQM = 63,64 com resolução de 250 m, EMA = 62,13  $\text{Wm}^{-2}$ , EMP = 34,54% e REQM = 62,52 com resolução de 500 m nos anos de 2015. No ano de 2016 os valores obtidos na resolução de 250 m foram EMA = 62,95  $\text{Wm}^{-2}$ , EMP = 34,20 % e REQM = 63,33  $\text{Wm}^{-2}$ , na resolução de 500 m os valores foram EMA = 62,30  $\text{Wm}^{-2}$ , EMP = 33,82 % e REQM = 63,09. Esses resultados evidenciam que o saldo de radiação diário obtido com o OLI/TIRS Landsat 8 nos anos de 2015 e 2016, proporcionou um resultado satisfatório comparado com os

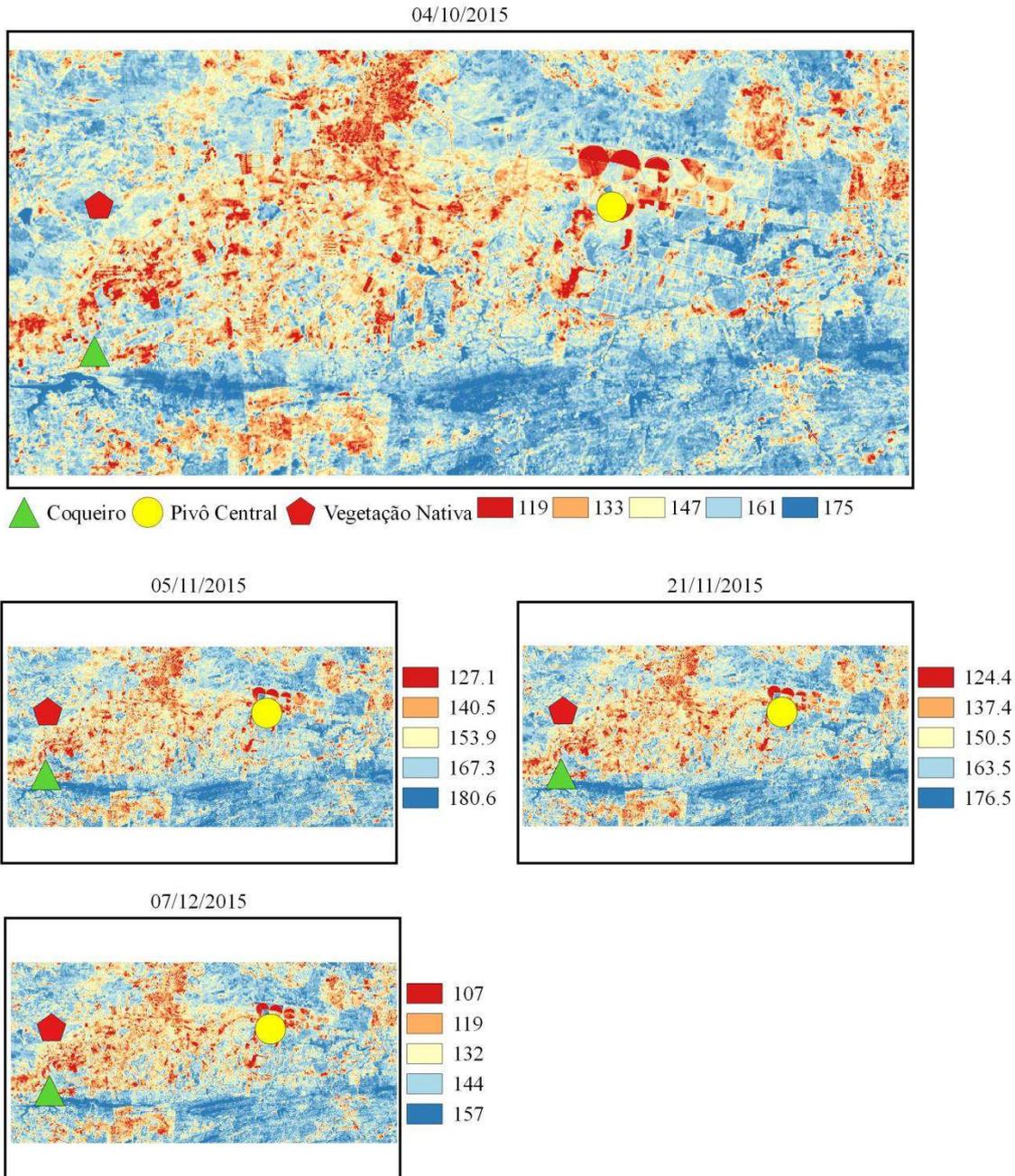
resultados obtidos pelo MODIS com resoluções de 250 m e 500 m, nos referidos anos de estudos.

**Tabela 9.** Erro Médio Absoluto - EMA ( $Wm^{-2}$ ), Erro Médio Percentual - EMP, Raiz do Erro Quadrático Médio – REQM ( $Wm^{-2}$ ) relacionados aos valores medidos e estimados do saldo de radiação instantâneo diário para os produtos OLI/TIRS Landsat 8 e MODIS com resolução de 250 m e 500 m nos anos de 2015 e 2016.

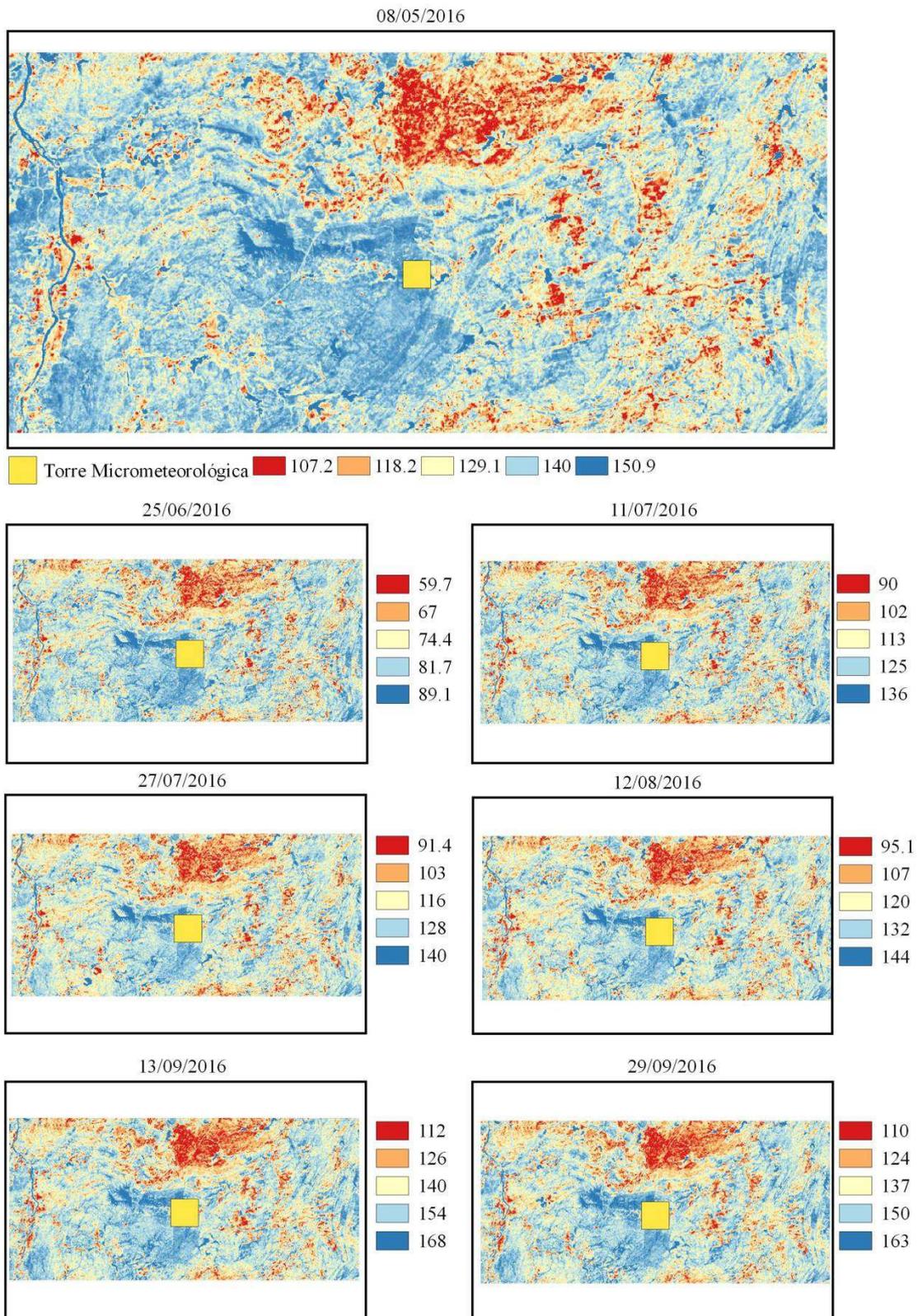
	EMA ( $Wm^{-2}$ )	EMP (%)	REQM ( $Wm^{-2}$ )
<b>Landsat 8 (2015)</b>	<b>34.33</b>	<b>18.77</b>	<b>37.56</b>
Resolução 250 m (2015)	63.46	35.27	63.64
Resolução 500 m (2015)	62.13	34.54	62.52
<b>Landsat 8 (2016)</b>	<b>53.91</b>	<b>32.10</b>	<b>59.23</b>
Resolução 250 m (2016)	62.95	34.20	63.33
Resolução 500 m (2016)	62.30	33.82	63.09



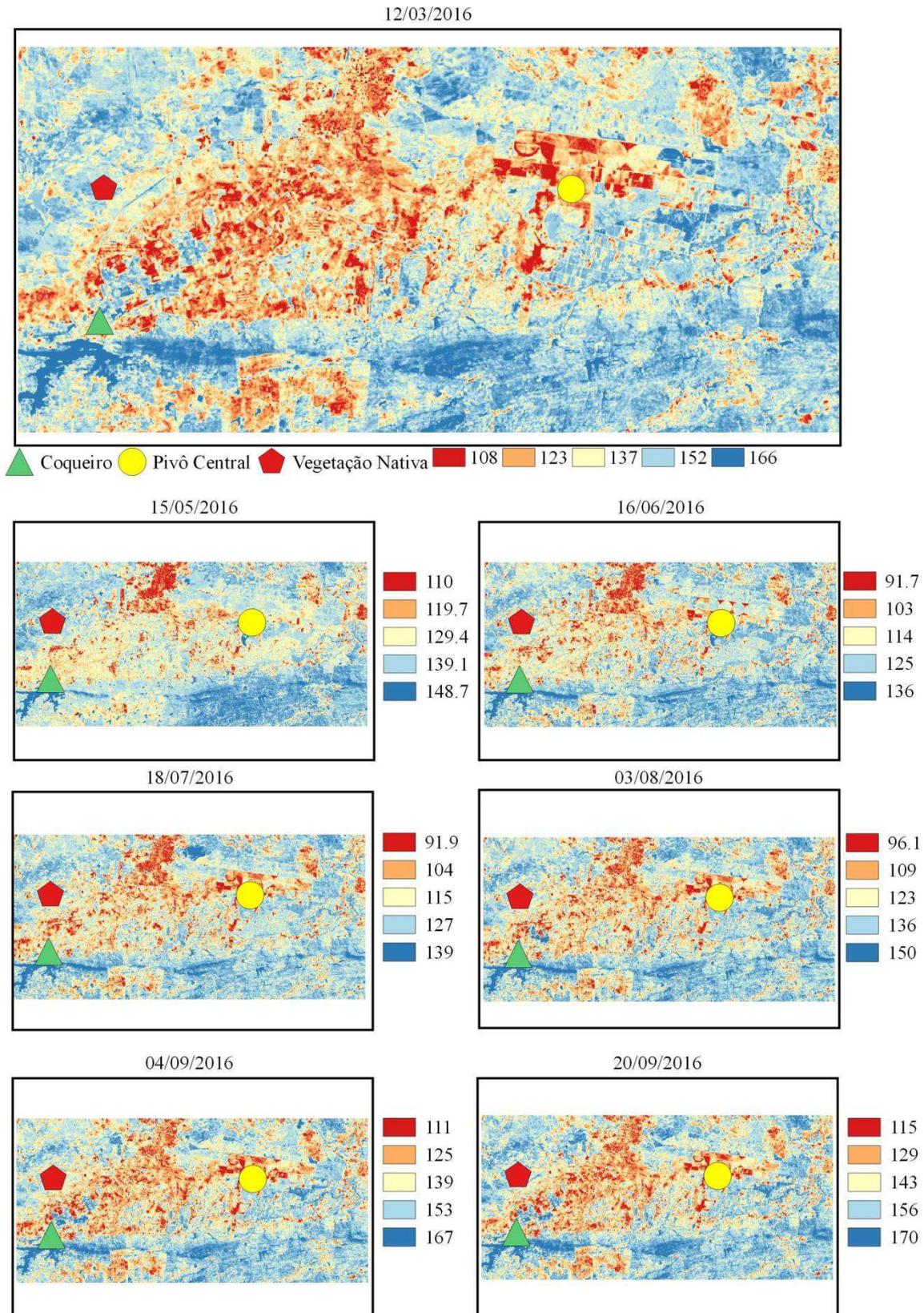
**Figura 23.** Mapas temáticos do saldo de radiação diário ( $Wm^{-2}$ ) dos produtos do OLI/TIRS Landsat 8 na Torre Micrometeorológica referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2015 (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).



**Figura 24.** Mapas temáticos do saldo de radiação diário ( $Wm^{-2}$ ) dos produtos do OLI/TIRS Landsat 8 no Perímetro Irrigado de São Gonçalo referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2015 (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).

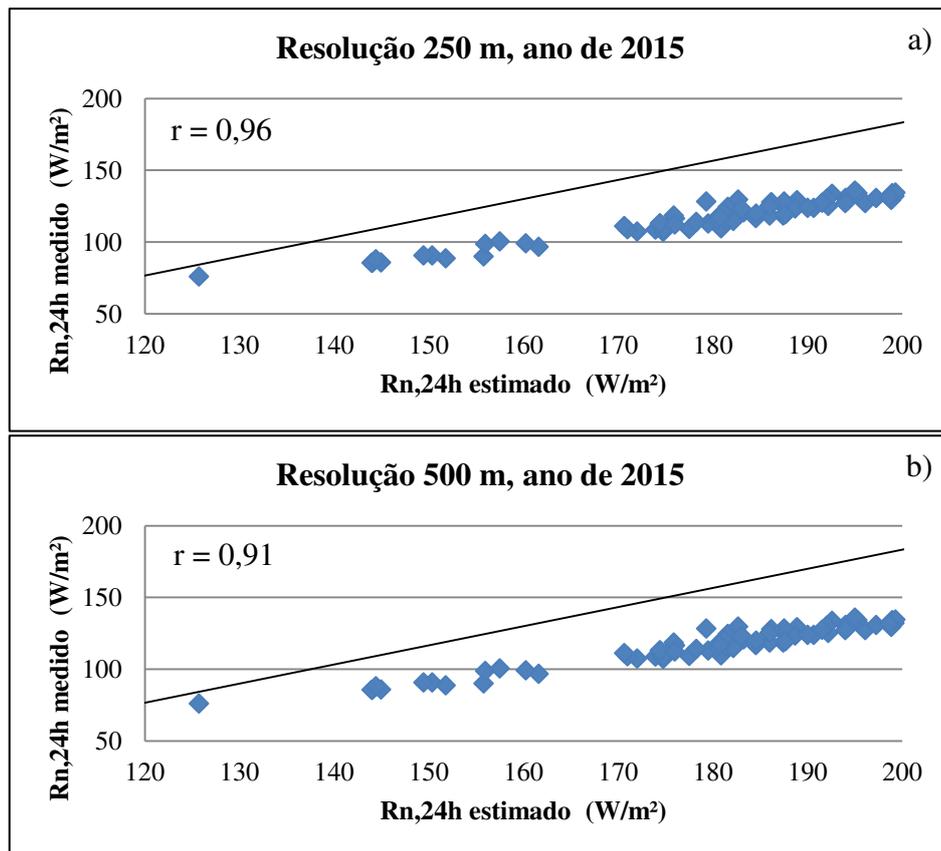


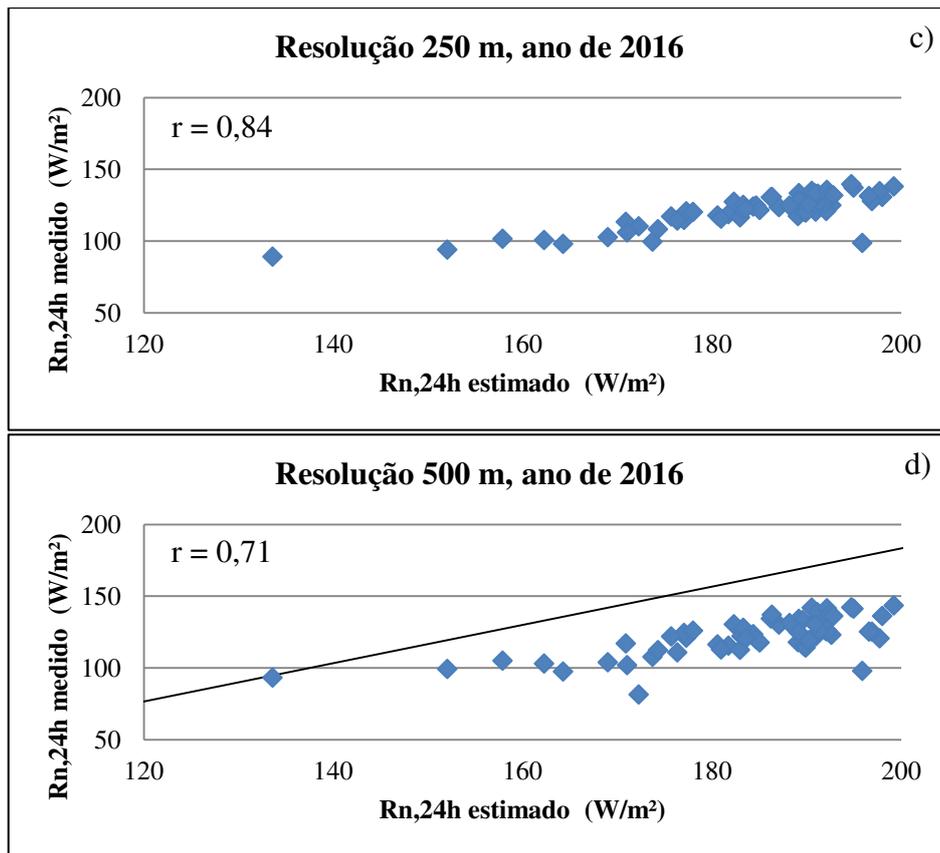
**Figura 25.** Mapas temáticos do saldo de radiação diário ( $Wm^{-2}$ ) dos produtos do OLI/TIRS Landsat 8 na Torre Micrometeorológica referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2016 (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).



**Figura 26.** Mapas temáticos do saldo de radiação diário ( $Wm^{-2}$ ) dos produtos do OLI/TIRS Landsat 8 no Perímetro Irrigado de São Gonçalo referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2016 (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).

A Figura 27 representa os valores calculados para o saldo de radiação diário com resoluções de 250 m e 500 m para os anos de pesquisa 2015 e 2016, observa-se que os valores do  $R_{n,24h}$  estimados foram menores dos que foram computados pela torre micrometeorológica. Os valores dos coeficientes de Pearson foram à resolução de 250 m e 500 m no ano de 2015, 0,96 e 0,91, respectivamente. No ano de 2016 esses valores foram 0,84 e 0,71, para as resoluções de 250 m e 500 m, respectivamente.





**Figura 27.** Representação gráfica do saldo de radiação diária ( $Wm^{-2}$ ): a) produto MODIS resolução de 250 m para o ano de 2015; b) produto MODIS resolução de 500 m para o ano de 2015; c) produto MODIS resolução de 250 m para o ano de 2016; d) produto MODIS resolução de 500 m para o ano de 2016.

## 5. CONCLUSÕES

- Os valores máximos de Ta na estação da primavera (outubro a dezembro), valor mínimo na estação de inverno (julho a setembro), para valores de UR o máximo foi na estação do outono (abril a junho), o mínimo na estação da primavera, no ano de 2015.

- No ano de 2016 os valores máximos de Ta e UR foram à estação do verão (janeiro a março) o mínimo nas estações de inverno (julho a setembro), e estação da primavera (setembro a dezembro).

- O albedo estimado para produtos MODIS com resolução de 250 m proporcionou um resultado mais preciso do que o albedo estimado por imagens OLI-Landsat 8 nos anos de 2015 e 2016;

- O alvo do pivô central apresentou albedo superior aos demais alvos nas resoluções de 250 m nos anos de estudo 2015 e 2016. Para resolução de 500 m o alvo que apresentou maior albedo maior resultado foi pivô central e a torre para o ano de 2015. Já os valores de albedo na torre meteorológica subestimaram os demais valores na resolução de 500 m para o ano de 2016;

- O saldo de radiação instantâneo que apresentou maior concordância com os valores medidos pela torre foram os dados apresentados por imagens MODIS com resolução de 250 m para os anos de 2015 e 2016;

- O saldo de radiação diário apresentou melhor resultado com imagens OLI/TIRS Landsat 8 comparados com os obtidos pelo MODIS nas resoluções de 250 m e 500 m, para ambos os anos.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, L. J. D. O.; PACHÊCO, A.; COSTA, T. C.; LOPES, O. F.; OLIVEIRA, M. A. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/Landsat. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, p.492-498, 2002.

AHLERT, S.; SIMÕES, J. C. Padrões morfológicos da ilha Brabant, Antártica. **Pesquisas em Geociências**. Porto Alegre, v. 36, n. 1, p. 05-10, 2009.

ALBHAISI, M.; BRENDONCK, L.; BATELAAN, O. Predicted impacts of land use change on groundwater recharge of the upper Berg catchment, South Africa. **Water SA**, v. 39, n. 2, p. 211-220, 2013.

ALLEN, R., TASUMI, M., TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, n.4, p.380-394, 2007.

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

ARAÚJO, T. L.; DI PACE, F. T. Valores instantâneos da temperatura da superfície terrestre na cidade de Maceió – AL utilizando imagens do satélite TM/Landsat 5. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.3, n.2, p.104-111, 2010.

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

ASCE-EWRI - American Society of Civil Engineers - Environmental and Water Resources Institute. ASCE-EWRI Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Report, ASCE, 2005.

AZEVEDO, P. V., SILVA, B. B. da, SILVA, V. P. R. da. Water requirements of irrigated mango or orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v.58, p.241-254, 2003.

BARBOSA, K. M. do N. Monitoramento espacial de biomassa e carbono orgânico da vegetação herbácea de várzea na Amazônia Central. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, **Tese de Doutorado**, 131 p., 2006.

BASTIAANSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain.** A remote sensing approach under clear skies Mediterranean climates. Ph. D. Thesis, Wageningen Agricultural University, 273 p., 1995.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL – Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v.229, p.87-100, 2000.

BASTIAANSEN, W. G. M., MENENTI, M., FEDDES, R.A., HOLSLAG, A. A. M. A. Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) – Formulation. **Journal of Hydrology**, v.212-213, p.198-212, 1998a.

BASTIAANSEN, W. G. M., PELGRUM, H., WANG, J., MA, Y., MORENO, J. F. algorithm for land (SEBAL) – Validation. **Journal of Hydrology**, v.212–213, p.213-229, 1998b.

BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y.; Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar, **EMBRAPA**, Brasília, 2014.

BEZERRA, J. M. Estimativa da evapotranspiração real para área de caatinga utilizando SEBAL. 77 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola), Recife, 2013.

BEZERRA, J. M.; MOURA, G. B. A.; SILVA, B. B.; LOPES, P. M. O.; SILVA, E. F. F. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.1, p.73-84, 2014.

BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, n. 2, p. 174-186, 2006.

BISHT, G.; BRAS, R. L. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: Southern Great Plains case study. **Remote Sensing of Environment**, v.114, n.7, p.1522-1534, 2010.

BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; THOMSEN, A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. **Remote Sensing of Environment**, v.79, n.2, p.329-343, 2002.

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

BRAGA, A. C.; Evapotranspiração e produtividade primária bruta em áreas agrícolas utilizando técnicas de sensoriamento remoto. **Tese** (Doutorado em Meteorologia), Campina Grande, 2014.

BRAGA, A. C.; Mapeamento da Evapotranspiração do Perímetro Irrigado de São Gonçalo – PB por meio de sensoriamento remoto orbital. **Dissertação** (Mestrado em Meteorologia), Campina Grande, 2009.

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

COSTA FILHO, J. F. Avaliação dos componentes do balance de energia e evapotranspiração em uma região semi-árida usando imagens orbitais Landsat 5 - TM e Terra MODIS. 159p. **Tese** (Doutorado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

CUNHA, J. E. B. L.; RUFINO, I. A.; SILVA, B. B.; CHAVES, I. D. 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, n.5, p.539-548, 2012.

Di PACE, F. T. Estimativa do balanço de radiação á superfície terrestre utilizando imagens TM Landsat-5 e Modelo Digital de Elevação. Campina Grande, **Tese** (Doutorado), p.140p, 2004.

Di PACE, F. T.; SILVA, B. B.da; SILVA, V. P. R.; SILVA, S. T. A. Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.385-392, 2008.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed, Brasília: Embrapa Produção de Informação. Rio de Janeiro, p. 306, 2006.

EPIPHANIO, J. C. N.; GLERIANI, J. M.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 6, p. 445-454, 1996.

FLORENZANO, T. G. “Iniciação em Sensoriamento Remoto”. São Paulo: Oficina de Textos, 3.ed, p. 128, 2011.

FUJACO, M. A. G.; LEITE, M. G. P.; MESSIAS, M. C. T. B. Análise multitemporal das mudanças no uso e ocupação do Parque Estadual do Itacolomi (MG) através de técnicas de geoprocessamento. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v.63, p.695-701, 2010.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; PEREIRA, A. B. Balanço de radiação e fluxo de calor no solo em ambiente natural e protegido cultivado com pepineiro. *Bragantia*, v. 60(2),139-147, 2001.

GARRISON, J. D.; ADLER, G. P. Estimation of precipitable water over the United State for application to the division of solar radiation into its direct and difuse coponents. **Solar Energy**, v.44, n.4, p.225-241, 1990.

GIONGO, P. R.; VETTORAZZI, C. A.; Albedo da superfície por meio de imagens TM-Landsat 5 e modelo numérico do terreno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 8, 2014.

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

GUSMÃO, A. C. V. L.; SILVA, B. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; GALVINCIO, J. D. Determinação do saldo radiativo na Ilha do Bananal, TO, com imagens orbitais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.10, p.1107-1114, 2012.

HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; PATTEY E.; ZARCOTEJADA, P. J.; STRACHAN, I. B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 3, p.337-352, 2004.

HE, T.; LIANG, S.; WANG, D.; WU, H.; YU, Y.; WANG, J. Estimation of surface albedo and directional reflectance from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) observations. **Remote Sensing of Environment**. v. 119, p. 286–300, 2012.

HUETE, A.; JUSTINE, C.; LIU, H. Development of Vegetation and Soil Indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing of Environment**, v.49, n.3, p.224-234, 1994.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. London: Academic Press., p. 390, 1983.

JOAQUIM, G; VIEIRA, R.; ROSA, K. K.; SIMÕES, J. C. Mapeamento das geleiras de rocha com o uso de imagens satelitais e geoprocessamento, Cordilheira Tres Cruces, Bolívia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 4194-4201, 2011.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D. P.; MORISETTE, J. T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**. 83: p. 3 –15, 2002.

KALAF, R.; BRASILEIRO, R.; CARDOSO, P. V.; CRUZ, C.B.M. Landsat 8: Avanços para mapeamento em mesoescala. In. 4º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, Rio de Janeiro, 2013.

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

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. Remote Sensing and Image Interpretation. 4<sup>th</sup> Edition. John, Wiley & Sons, Inc. New York, p.73, 1993.

LIMA, E.de P.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, B. B. da; GLERIANI, J.M.; SOARES, V. P. seasonality of net radiation in two sub-basins of Paracatu by the use of MODIS sensor products. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.32, n.6, p.1184-1196, 2012.

LIMA, F. V. Pivas: das gavetas viciadas dos altos escalões administrativos à política pública de desenvolvimento rural. **Revista OKARA: Geografia em debate**, v.8, n.1, p.126-139, 2014.

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

no litoral sul de Pernambuco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.1, p. 55-67, 2014.

MARCUSSI, A. B.; BUENO, C. R. P.; MIQUELONI, D. P.; ARRAES, C. L. Utilização de índices de vegetação para os sistemas de informação geográfica. **Revista Caminho da Geografia**, v.11, n.35, 2010. ISSN: 1678-6343.

MATTAR, B. F.; SOBRINO, J. A.; CORBARI, C.; JIMÉNEZ-MUNOZ, J. C.; OLIVEIRAGUERRA, L.; SKOKOVIC, D.; SÓRIA, G.; OLTRA-CARRIÒ, R.; JUKIEN, Y.; MANCINI, M. Impacts of the broadband albedo on actual evapotranspiration estimated by S-SEBI model over an agricultural area. **Remote Sensing of Environment**. v. 147, p. 23–42, 2014.

MELO, S. T. S.; RIBEIRO, F. A.; ARAÚJO, C. F.; MOREIRA, E. A luta pela Terra e águas nas várzeas de Sousa. In: XVI Encontro Nacional dos Geógrafos, Porto Alegre. **Anais...**: ISBN:2010. 978-85-99907-02-3, 2010.

MENDONÇA, J. C. **Estimativa da evapotranspiração regional utilizando imagens digitais orbitais na região Norte Fluminense**. Tese (Doutorado em Produção Vegetal), Rio de Janeiro, 145 p., 2007.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. Principles of environmental physics. 2.ed. **London: Edward Arnold**, p.291, 1990.

NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Disponível online em:<[landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-5/](http://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-5/)>. Acessado em: 15 de outubro de 2017a.

NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Disponível online em:<[landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview](http://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview)>. Acessado em: 15 outubro de 2017b.

NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Disponível online em:<<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>> Acessado em: 15 de outubro de 2017c.

NASCIMENTO, R. L. Análise comparativa dos componentes do saldo de radiação em áreas de pastagem e floresta na Amazônia. **Dissertação** (Mestrado em Meteorologia). Campina Grande, 2012.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard, 2010.

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

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B. da.; MOURA, A. E. S. S. Balanço de radiação por sensoriamento remoto em bacia hidrográfica da zona da mata nordestina. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, p. 16-28, 2015.

PAIVA, C. M. Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 235p. **Tese Doutorado**, 2005.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba – RS: Liv. e Ed. Agropecuária, 478 p., 2002.

PEREIRA, A. R.; NOVA, N. A. V.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FAELQ, 1997.

PEREIRA, B. A. S.; VENTUROLI, F.; CARVAHO, F. A. Florestas estacionais no Cerrado: uma visão geral. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.41, n.3, p.446-455, 2011.

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.

PHUA, M. H.; TSUYUKI, S.; FURUYA N.; LEE, JS. Detecting deforestation with a spectral change detection approach using multitemporal Landsat data: a case study of Kinabalu Park, Sabah, Malaysia. **Journal of Environmental Management**, v. 88, n. 4, p.784-795, 2008.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2010.

PRADO, R. B.; NOVO, E. M. L. M. Avaliação espaço-temporal da relação entre o estado trófico do reservatório de Barra Bonita (SP) e o potencial poluidor de sua bacia hidrográfica. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v.19, n. 2, p. 5-18, 2007.

ROCHA, C. F. D.; BERGALLO, HG.; VAN SLUYS, M.; ALVES, MAS.; JAMEL, CE The remnants of restinga habitats in the brazilian Atlantic Forest of Rio de Janeiro state, Brazil: habitat loss and risk of disappearance. **Brazilian Journey of Biology**. Rio de Janeiro, v. 67, n. 2, p. 263-273, 2007.

RODRIGUES, J. D.; ANDRADE, E. D.; TEIXEIRA, A. D. S.; SILVA, B. D. Sazonalidade de variáveis biofísicas em regiões semiáridas pelo emprego do sensoriamento remoto. **Engenharia Agrícola**, v.29, n.3, p.452-465, 2009.

ROENRINK, G. J. VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance stress index and water-use efficiency for melon (cucumis melo l.) on different irrigation regimes. **Agricultural Journal**, v.2, p.31-37, 2007.

ROSENDO, J. dos S.; ROSA, R. Exemplo de aplicação do Produto MOD13Q1 disponibilizado pelo sensor MODIS/Terra. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p. 3285-3292.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **Third ERTS Symposium**, v. 1, p.309-317. 1973.

RUDORFF, F. M.; GHERARDI, D. F. M. Coral reef detection using SAR/RADARSAT- 1 images at Costa dos Corais, PE/AL, Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**. São José dos Campos, v.56, n.2, p.85-96, 2008.

SALOMONSON, V. V.; TOLL, D. L. Execution phase (C/D) spectral band characteristics of the EOS moderate resolution imaging spectrometer-nadir (MODISN) facility instrument. **Advances in Space Research**, v.11(3), p.231-236, 1991.

SANTOS, J.B; AMORIM, R.F.C; GOMES, H.B; GERMANO, A.S. Análise temporal da sensação térmica nas cidades de Patos e São Gonçalo (Sousa), Paraíba, Brasil. II Workshop Internacional Sobre Águas no Semiárido Brasileiro. Anais, 2015.

SILVA, A. P. N.; ALBUQUERQUE MOURA, G. B.; GIONGO, P. R.; SILVA, B. B. Albedo de superfície estimado a partir de imagens Landsat 5–TM no semiárido brasileiro. **Revista de Geografia**, v.27, n.1, p.154-168, jan./mar., 2010.

SILVA, B. B. D.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M.; MONTENEGRO, S. M.; BARBOSA JUNIOR, B. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.1, p.3-8, 2016.

SILVA, B. B. da., FERREIRA, J. A., RAO, T. V. R., SILVA, V. P. R. da. Crop water stress index and water-use efficiency for melon (*Cucumis melo L.*) on different irrigation regimes. **Agriculture Journal**, 2007.

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**, v.14, n.2, p.174-186, 2006.

SILVA, B. B. da; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. de. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens LANDSAT 5-TM. **Revista brasileira de agrometeorologia**. v.13, n.2, p.201-211, 2005b.

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

SILVA, B. B.; GALVÍNCIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MACHADO, C. C. C.; OLIVEIRA, L. M. M.; MOURA, M. S. B. Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo - PB . **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.1, p.57-64, 2013.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.2, p.243-252, 2005a.

SILVA, B. D.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. D.; GALVÍNCIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.9, p.1218-1226, 2012.

SILVA, J. L. B. Monitoramento espaço-temporal da cobertura vegetal do bioma Caatinga no Ceará mediante imagens orbitais. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola) Recife, 2016.

SILVA, S.N.; LOPES, F.G.; ANDRADE, F.E.; FERREIRA, C.B.; DANTAS, M.C.A.M.; SIQUEIRA, E.C. Efeitos da escassez hídrica na economia do perímetro irrigado de São Gonçalo, Paraíba. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.12, nº 1, p. 132-137, 2017.

SOUZA, J. F. Análise das mudanças do uso e ocupação do solo, variabilidade da temperatura e do saldo de radiação em João Pessoa – PB. 130 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, 2014.

SOUZA, J. F.; SILVA, R. M.; SILVA, A. M. Influência do uso e ocupação do solo na temperatura da superfície: o estudo de caso de João Pessoa – PB. **Ambiente Construído**, v.16, n.1, p.21-37, jan./mar., 2016.

SOUZA, M. C. G. Avaliação da influência atmosférica em componentes do balanço de radiação na chapada do Apodi com imagens TM - Landsat 5. **Dissertação** (Mestrado em Meteorologia), Campina Grande, 2007.

STARKS, P.J., NORMAN, J.M., BLAD, B.L., WALTER-SHEA, E.A., Walthall, C.L. Estimation of shortwave hemispherical reflectance albedo from bi-directionally reflected radiance data. **Remote Sensing of Environment**, v. 38, p. 123–134, 1991.

TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 362, p. 110–127, 2008.

TREZZA, R.; ALLEN, R.; TASUMI, M. Estimation of Actual Evapotranspiration along the Middle Rio Grande of New Mexico Using MODIS and Landsat Imagery with the METRIC Model. **Remote Sensing**, 2013.

USGS (*United State Geological Survey*). Disponível online em: < [www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-satellite-missions](http://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-satellite-missions)>. Acessado em: 6 de setembro de 2018.

VIEIRA, R. M. S. P.; CUNHA, A. P. M. do.; ALVALÁ, R. C. S.; CARVALHO, V. C.; NETO, S. F.; SESTINI, M. F. Land use and land cover map of a semiarid region of Brazil

for meteorological and climatic models. **Revista Brasileira de Meteorologia**. São José dos Campos, v. 28, n. 2, p. 129-138, 2013.

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

ZHANG, B.; KANG, S.; LI, F.; ZHANG, L. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 10, p.1629-1640, 2008.

ZHANG, Y.; ODEH, I.O.A.; HAN, C. Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a subpixel image analysis. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.11, n.4, p.256-264, 2009.