

XIV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

MODELAGEM ESPACIAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E BALANÇO DE ENERGIA SUPERFICIAL EM PETROLINA E JUAZEIRO COM IMAGENS DO SATÉLITE SENTINEL-2

Cesar de Oliveira Ferreira Silva¹ ; Rodrigo Lilla Manzione² & Antônio Heriberto de Castro Teixeira³

RESUMO – Os algoritmos SAFER e o SUREAL foram aplicados em imagens do satélite Sentinel-2 para determinação da evapotranspiração atual (ET_a) e produção de biomassa (BIO), nos dias 13 de maio de 2016 e 22 de agosto de 2016, em áreas irrigadas da região de Petrolina/Juazeiro, Nordeste do Brasil. A temperatura de superfície foi obtida sem a utilização de banda termal, assim, todos os resultados foram obtidos com resolução espacial de 10 metros. Utilizou-se o modelo SUREAL para identificação das áreas irrigadas. A evapotranspiração real média para duas datas foi respectivamente de $0,09 \pm 0,10$ mm e $0,12 \pm 0,14$ mm (Caatinga) e $3,45 \pm 0,79$ mm e $3,59 \pm 0,58$ mm (Área Irrigada). A produção primária média para duas datas foi respectivamente de $1,65 \pm 3,27$ kg.ha⁻¹.dia⁻¹ e $1,70 \pm 5,25$ kg.ha⁻¹.dia⁻¹ (Caatinga) e $53,78 \pm 22,64$ kg.ha⁻¹.dia⁻¹ e $64,45 \pm 26,58$ kg.ha⁻¹.dia⁻¹ (Área Irrigada). As imagens Sentinel-2 foram adequadas à utilização dos algoritmos SAFER e SUREAL, produzindo resultados coerentes e sensíveis aos diferentes usos da terra da área de estudo.

ABSTRACT– The SAFER and SUREAL algorithms were applied to images of the Sentinel-2 satellite to determine the actual evapotranspiration (ET_a) and biomass production (BIO), on May 13, 2016 and August 22, 2016, in irrigated areas of the region of Petrolina/Juazeiro, Northeast of Brazil. The surface temperature was obtained without the use of thermal band, thus, all the results were obtained with spatial resolution of 10 meters. The SUREAL model was used to identify the irrigated areas. The average actual evapotranspiration for two dates was respectively 0.09 ± 0.10 mm and 0.12 ± 0.14 mm (Caatinga) and 3.45 ± 0.79 mm and 3.59 ± 0.58 mm (Area Irrigated). Average primary production for two dates was respectively 1.65 ± 3.27 kg.ha⁻¹.day⁻¹ and 1.70 ± 5.25 kg.ha⁻¹.day⁻¹ (Caatinga) and 53.78 ± 22.64 kg.ha⁻¹.day⁻¹, respectively. day and 64.45 ± 26.58 kg.ha⁻¹.day⁻¹ (Irrigated Area). The Sentinel-2 images were adequate to the use of the SAFER and SUREAL algorithms, producing coherent and sensitive results to the different land uses of the study area.

Palavras-Chave – evapotranspiração, produção primária de biomassa, irrigação

INTRODUÇÃO

A obtenção do balanço de energia na superfície é de suma importância na modelagem atmosférica e na estimativa da evapotranspiração (Oliveira et al., 2014), que por sua vez é

1) Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, SP, Brasil. Email: (cesaroliveira.f.silva@gmail.com).

2) Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências e Engenharia, Tupã, SP, Brasil. Email: (manzione@tupa.unesp.br).

3) Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, Sergipe, SE. Email: (heriberto.teixeira@embrapa.br)

essencial para o manejo dos recursos hídricos, com especial enfoque em áreas irrigadas e bacias hidrográficas.

O estudo da evapotranspiração atual (ET_A) das áreas agrícolas, assim como, da vegetação nativa, são pontos-chave no planejamento da gestão de bacias hidrográficas de regiões agrícolas, além de serem necessárias para as modelagens meteorológica e hidrológica, bem como diante do manejo da agricultura irrigada. Pela necessidade de dados condizentes com as condições locais, o sensoriamento remoto tem sido amplamente utilizada para modelagem e monitoramento espaço-temporal de parâmetros agroambientais, como a temperatura de superfície, índices de vegetação, como o NDVI, evapotranspiração e produção primária de biomassa em diferentes escalas temporais e espaciais (Teixeira et al., 2009, 2010, 2013, 2016, 2017).

O municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA) pertencem ao polo de irrigação do Vale do Rio São Francisco, tendo como principais produtos agrícolas as culturas permanentes (uva, goiaba, coco, mamão e pinha) e temporárias (melancia, milho e feijão) (Leivas, Teixeira e Silva, 2016). Nessa área, a vegetação predominante, assim como em toda a região semiárida da bacia do Submédio do rio São Francisco, é a Caatinga, a qual está sendo rapidamente substituída por fruteiras irrigadas. A produção de videiras e mangueiras sob irrigação altera os balanços de energia e de água se comparada às condições naturais, com tendência de aumento do consumo hídrico destas culturas, provocando redução do fluxo do rio à jusante.

Assim, avaliar alterações nos componentes do balanço de energia, tanto em áreas vegetadas nativas como agrícolas, são estudos importantes nos dias atuais, face às alterações climáticas em curso no nosso planeta (Silva et al., 2010). Nesse contexto, esta pesquisa objetivou determinar a evapotranspiração real em uma área de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA) através do algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*).

MATERIAL E MÉTODOS

Segundo a classificação climática de Koppen, o clima é BSh (semi-árido com curta estação chuvosa no verão) com temperatura média de 24,8°C e precipitação anual de 435 mm, sendo agosto o mês mais seco e o período chuvoso concentrado entre os meses de novembro e abril.

A evapotranspiração foi obtida através do modelo agrometeorológico espectral SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*) (Teixeira et al., 2013). O SAFER envolve parâmetros obtidos por sensoriamento remoto como albedo da superfície (α_0), a temperatura da superfície (T_0) e o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), assim como dados meteorológicos para cálculo da evapotranspiração de referência (ET_0).

Para estimativa da evapotranspiração foram utilizadas as bandas espectrais do visível e infravermelho próximo de imagens do satélite Sentinel-2 com resolução espacial de 10 m dos dias 13 de maio de 2016 (dia juliano 134) e 22 de agosto de 2016 (dia juliano 225) e sem nuvens. Dados de radiação solar global (R_G), temperatura do ar (T_a) e evapotranspiração de referência (ET_0) foram obtidos de estações agrometeorológicas automáticas indicadas no mapa da Figura 1 junto ao uso da terra da área de estudo com base no ano de 2016 de acordo com o mapeamento realizado por MapBiomas (2018).

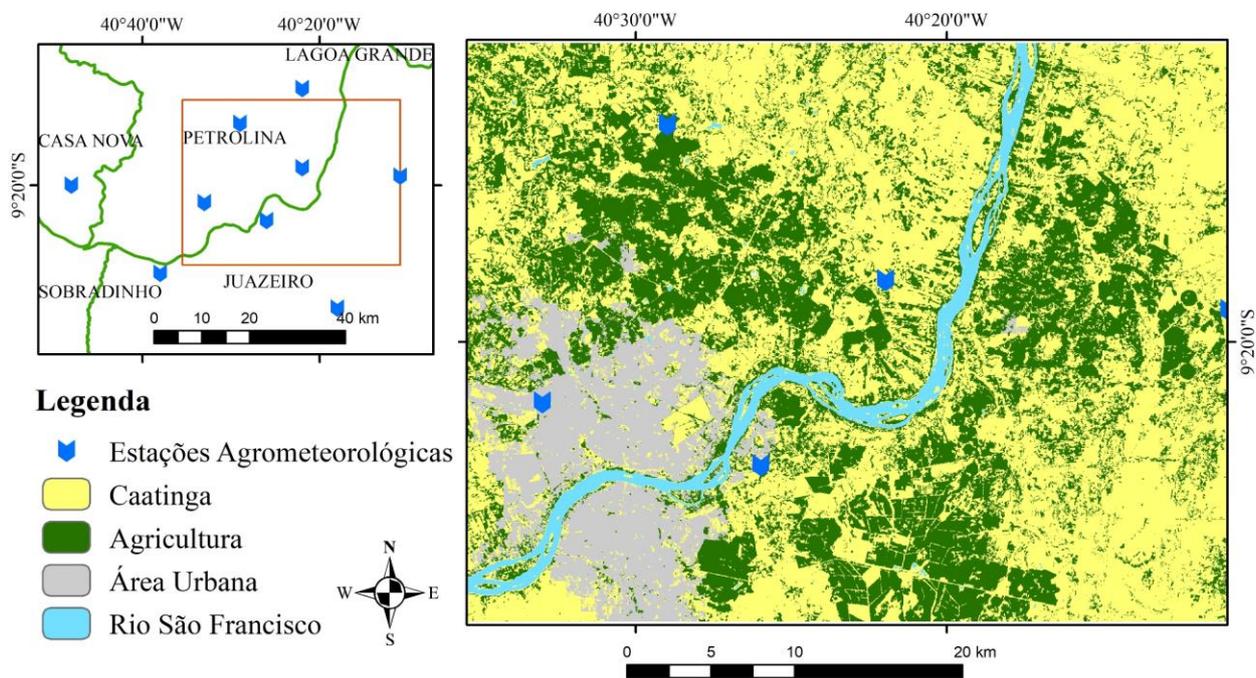


Figura 1 – Localização da área de estudo e estações agrometeorológicas com uso da terra base de 2016. Adaptado de MapBiomas (2018).

Segundo Teixeira et al. (2013, 2016, 2017), os parâmetros obtidos via sensoriamento remoto foram o albedo de superfície (α_0), componentes de energia, como o saldo de radiação (R_n), fluxo de calor latente (λE), o fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor no solo (G); Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI e a radiação de onda longa emitida pela atmosfera (RL_{atm}).

O R_n na escala diária foi obtido pelo saldo diário (24 h) de radiação de onda curta, por meio da equação de Slob (Teixeira et al., 2010), através da Equação 1.

$$R_n = (1 - \alpha_0)R_G - a_L \tau_{sw} \quad (1)$$

Onde α_0 é o albedo de superfície, α_L é o coeficiente de regressão do saldo de radiação de ondas longas e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica (Bruin, Stricker, 2000).

A temperatura de superfície foi obtida pelo método residual (Teixeira, Leivas e Silva, 2016), derivado da Equação de Planck, expressa na Equação 2.

$$T_0 = \sqrt[4]{\frac{R_G - \alpha_0 R_G + \varepsilon_A \sigma T_a^4 - R_n}{\varepsilon_S \sigma}} \quad (2)$$

Sendo ε_A e ε_S respectivamente as emissividades atmosférica e superficial e σ a constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

Quando o NDVI < 0, indicativo da presença de corpos hídricos, foi utilizado o conceito de evapotranspiração de equilíbrio (Raupach, 2001) transformando unidades de energia em $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ (Teixeira et al., 2017, 2016), pela Equação 3.

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma} \quad (3)$$

Onde Δ ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) é a curva de saturação de vapor de água, G ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) o fluxo de calor no solo e γ ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) a constante psicométrica. A densidade de fluxo de calor no solo (G) foi estimada a partir da sua relação com o saldo de radiação à superfície da cultura (Coaguila et al., 2017; Teixeira et al., 2017) expressa na Equação 4.

$$\frac{G}{R_n} = 3.98 \cdot \exp(-31.89 \cdot \alpha_0) \quad (4)$$

Calculou-se a relação $\frac{ET}{ET_0}$ diários seguindo a Equação 5.

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_0 \cdot NVDI} \right) \right] \quad (5)$$

Onde a e b são coeficientes de regressão calibrados para a região de estudo. Teixeira et al., 2009 utiliza, respectivamente, os valores de 1,8 e -0.008 para a região do semiárido nordestino.

O produto da razão obtida na Equação 5 pelo valor diário da evapotranspiração de referência é a evapotranspiração real (ET_A) diária.

$$ET_A = \frac{ET}{ET_0} ET_0 \quad (6)$$

Onde ET_0 é a evapotranspiração de referência, obtida por interpolação de dados das estações agrometeorológicas.

A identificação das áreas irrigadas foi realizada através do modelo SUREAL (Teixeira et al., 2017), de acordo com a Equação 7.

$$r_s = \left(c + d \left(\frac{T_0}{\alpha_0} \right) (1 - NDVI) \right) \quad (7)$$

Com $c = 2,72$ e $d = 0,04$. Considerou-se que pixels com $r_s < 600 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ e $NDVI > 0,2$ como áreas irrigadas.

A produção de biomassa ($\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) foi calculada usando o modelo de Monteith (Teixeira et al., 2015), de acordo com a equação 8.

$$BIO = \varepsilon_{max} \frac{ET}{ET_0} APAR \cdot 0.864 \quad (8)$$

Onde ε_{max} é a eficiência máxima no uso da radiação por parte da vegetação (Coaguila et al., 2017) e APAR a radiação fotosinteticamente ativa absorvida, que foi obtida através da relação com o NDVI e a radiação solar global (Teixeira et al., 2015), expressa na equação 9.

$$APAR = (1.26 \cdot NDVI - 0.26)(0.44 \cdot R_G) \quad (9)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se que com a metodologia proposta neste estudo, utilizando imagens de alta resolução espacial e dados de estações meteorológicas, foi possível discriminar o comportamento espectral entre as áreas irrigadas e vegetação natural, como demonstrado na Figura 3, que exhibe os resultados do modelo SUREAL para área de estudo.

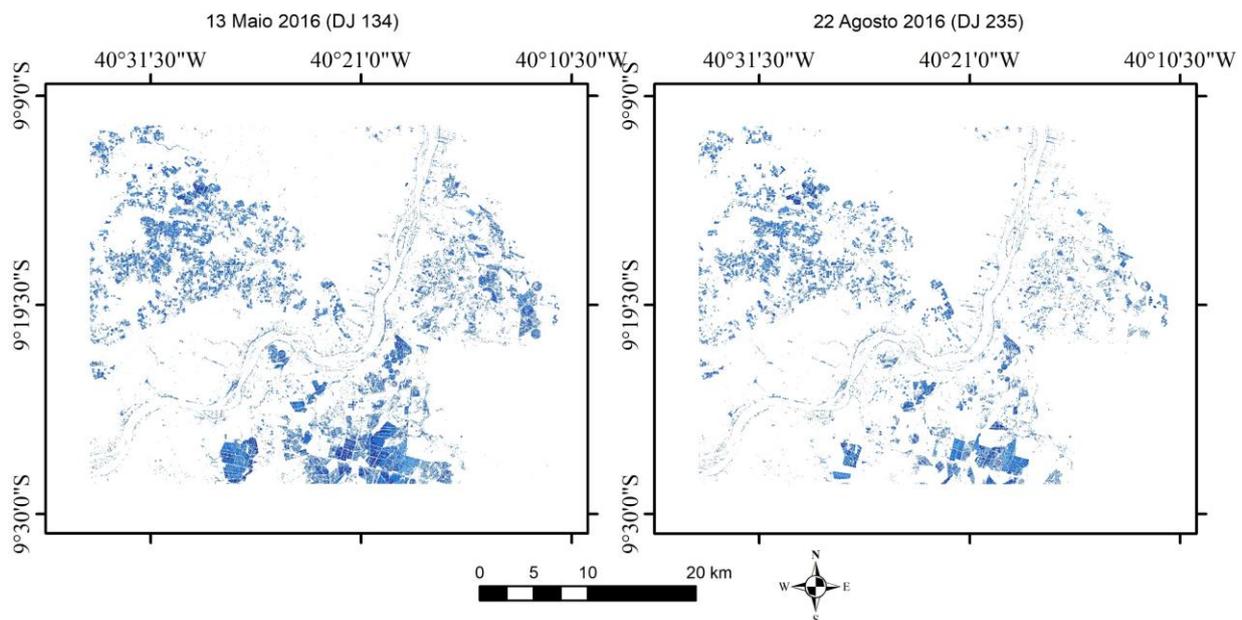


Figura 2 – Áreas irrigadas identificadas em Petrolina (PE) e Juazeiro (BA) nos dias julianos 134 e 235 de 2016.

Através do modelo SAFER, juntamente com dados de estações meteorológicas e imagens de alta resolução espacial, foram obtidos os valores médios dos parâmetros biofísicos como albedo (α_0), temperatura da superfície (T_0), NDVI, evapotranspiração real (ET_A) e produção primária de biomassa (BIO) em áreas irrigadas e de vegetação natural (caatinga), como visto na Figura 2.

Na Tabela 1, observa-se que os valores médios diários do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), nos dias julianos 134 e 235 foram $0,31 \pm 0,08$ e $0,21 \pm 0,08$ na Caatinga e $0,73 \pm 0,002$ e $0,74 \pm 0,0006$ na área irrigada, respectivamente. Nas áreas irrigadas, o NDVI alcançou valores superiores a 0,7, evidenciando a resposta da vegetação à irrigação. Em áreas com vegetação natural, o NDVI ficou em torno de 0,25 e valores negativos no Rio São Francisco. A evapotranspiração real média para duas datas foi respectivamente de $0,09 \pm 0,10$ mm e $0,12 \pm 0,14$ mm (Caatinga) e $3,45 \pm 0,79$ mm e $3,59 \pm 0,58$ mm (Área Irrigada). A produção primária média para duas datas foi respectivamente de $1,65 \pm 3,27$ kg.ha⁻¹.dia⁻¹ e $1,70 \pm 5,25$ kg.ha⁻¹.dia⁻¹ (Caatinga) e $53,78 \pm 22,64$ kg.ha⁻¹.dia⁻¹ e $64,45 \pm 26,58$ kg.ha⁻¹.dia⁻¹ (Área Irrigada).

Tabela 1 – Valores médios e desvio padrão dos parâmetros biofísicos em cada classe de uso da terra

	Dia Juliano	Caatinga	Agricultura Irrigada
NDVI	134	$0,31 \pm 0,08$	$0,73 \pm 0,002$
	235	$0,21 \pm 0,08$	$0,74 \pm 0,0006$
Temperatura Superficial (K)	134	$310,17 \pm 2,02$	$306,51 \pm 0,98$
	235	$312,83 \pm 2,17$	$305,54 \pm 0,68$
Evapotranspiração Real (mm)	134	$0,09 \pm 0,10$	$3,45 \pm 0,79$
	235	$0,12 \pm 0,14$	$3,59 \pm 0,58$
Saldo de Radiação (MJ)	134	$8,99 \pm 0,45$	$8,89 \pm 0,36$
	235	$10,58 \pm 0,43$	$10,25 \pm 0,14$
Produção de Biomassa (kg.ha ⁻¹ .dia ⁻¹)	134	$1,65 \pm 3,27$	$53,78 \pm 22,64$
	235	$1,70 \pm 5,25$	$64,45 \pm 26,58$

Nas áreas de vegetação natural (caatinga), foram observados os menores valores de evapotranspiração real (tons de vermelho), em torno de 0,3 mm, contrastando com as áreas irrigadas (tons de amarelo e azul). Pelo fato da energia disponível no sistema é utilizada para aquecimento do ar, enquanto que nas áreas irrigadas essa energia é gasta no processo evapotranspiratório, enquanto na época seca, a caatinga converte a maior parte da energia disponível em calor sensível (H), enquanto as culturas irrigadas apresentam maiores valores de evapotranspiração (Teixeira et al., 2008).

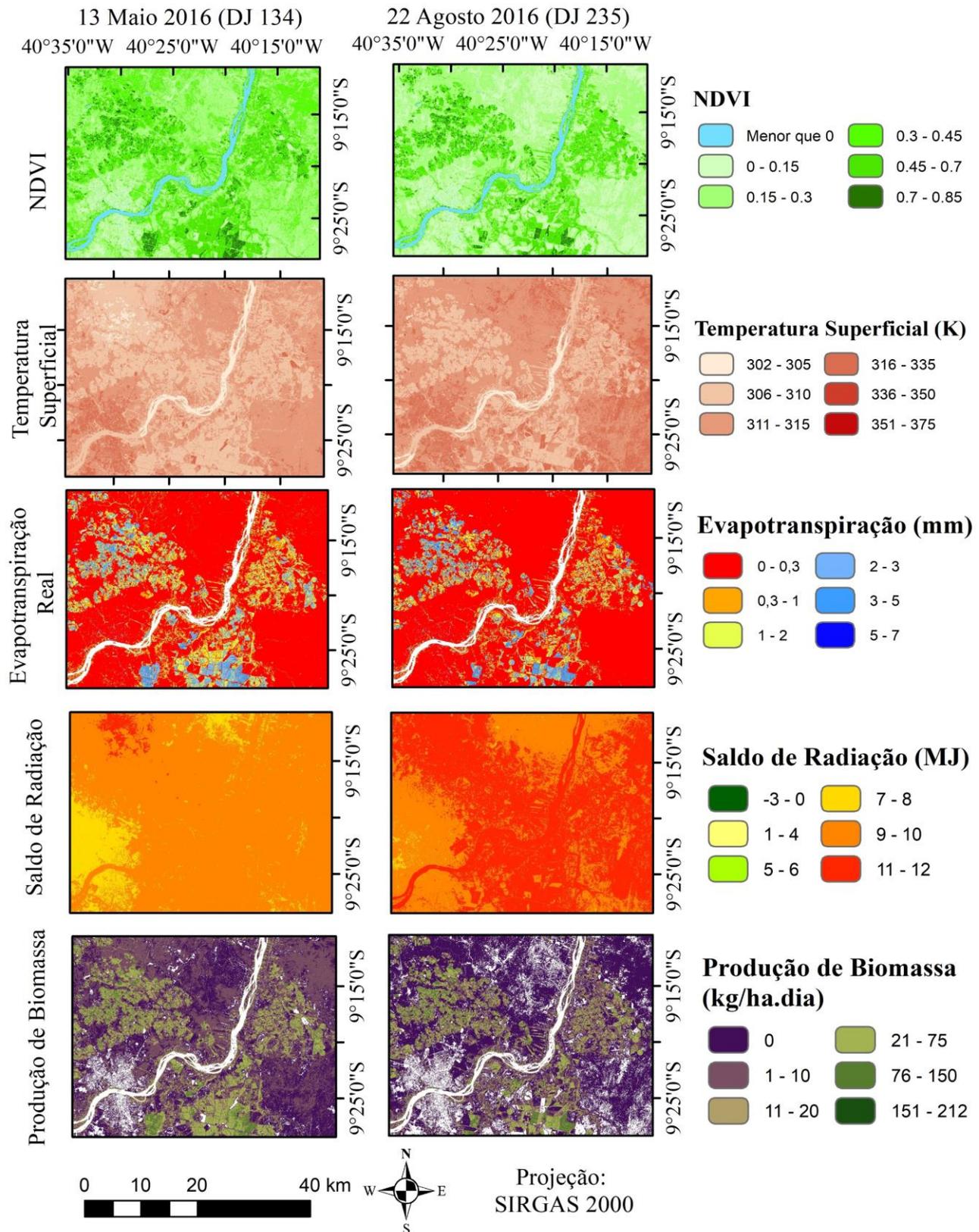


Figura 3 – Modelagens dos parâmetros biofísicos da área em Petrolina (PE) e Juazeiro (BA) nos dias julianos 134 e 235 de 2016.

Na Figura 3, observa-se a distribuição espacial da biomassa com destaque para as áreas irrigadas (verde escuro) atingindo $312 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$. Nas áreas de vegetação natural (em tons de violeta) foram encontrados os menores valores de biomassa, sendo inferiores a $10 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$. Conforme Teixeira (2009), os consumos hídricos das culturas irrigadas nas condições semiáridas brasileiras são maiores que dos das espécies da Caatinga durante o período naturalmente mais seco, promovendo um aumento na produção de biomassa (BIO) e nas taxas da evapotranspiração atual.

A partir dos resultados obtidos foi possível avaliar os indicadores biofísicos em áreas irrigadas e vegetação natural, utilizando imagens de alta resolução espacial (10 metros) no manejo dos recursos hídricos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas de sensoriamento remoto aliadas a uma rede de estações agrometeorológicas automáticas possibilitaram diagnosticar os parâmetros biofísicos em diferentes usos e ocupações da terra do município de Petrolina – PE e Juazeiro – BA. Os modelos foram sensíveis aos diferentes níveis de umidade do clima e do solo, mostrando-se confiáveis à aplicações no monitoramento das condições das culturas agrícolas em áreas com substituição da vegetação natural por culturas irrigadas. A utilização do satélite Sentinel-2 foi eficiente e obteve um resultado de alta resolução espacial (10 metros) e alta resolução espacial (5 dias). Recomenda-se a aplicação dos modelos à uma série temporal de imagens de satélite conjuntamente a dados meteorológicos históricos, tendo em vista o monitoramento de locais estratégicos da Bacia do São Francisco, contribuindo para o gerenciamento culturas irrigadas, diante de cenários de mudanças climáticas e consequentemente de impactos nos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

- LEIVAS, J. F.; TEIXEIRA, A. H. de C.; SILVA, G. B. Estimativa de Parâmetros Biofísicos em Áreas Irrigadas utilizando Imagens de Alta Resolução Espacial. In: XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2016, Aracaju. **Anais do XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Bento Gonçalves: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2016. p. 1-7.
- MAPBIOMAS. **Coleções MapBiomias**. Disponível em <http://mapbiomas.org/pages/database/mapbiomas_collection>. Acesso 23 jun. 2018.
- OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B.; ANTONINO, A. C. D.; MOURA, A. E. S. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do

SEBAL e produtos MODIS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.10, p.1039-1046, 2014.

TEIXEIRA, A. H. C. ; LEIVAS, J. F. ; HERNANDEZ, F. B. T. ; FRANCO, R. A. M. . Large-scale radiation and energy balances with Landsat 8 images and agrometeorological data in the Brazilian semiarid region. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 11, p. 016030-1-016030-15, 2017.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining Regional Actual Evapotranspiration of Irrigated Crops and Natural Vegetation in the São Francisco River Basin (Brazil) Using Remote Sensing and Penman-Monteith Equation. **Remote Sensing**, n. 2, v. 4, p. 1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. C., SCHERER-WARREN, M., HERNANDEZ, F. B. T., ANDRADE, R.G., LEIVAS, J.F. Large-Scale Water Productivity Assessments with MODIS Images in a Changing Semi-Arid Environment: A Brazilian Case Study. **Remote Sensing**, v. 5, p. 5783-5804, 2013.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, M.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part A: Calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 462–476, 2009.

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; RONQUIM, C. C.; VICTORIA, D. C. Sugarcane Water Productivity Assessments in the São Paulo state, Brazil. **International Journal of Remote Sensing Applications**, v. 6, p. 84-95, 2016.

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; SILVA, G. B.. Options for using Landsat and RapidEye satellite images aiming the water productivity assessments in mixed agro-ecosystems. **Proceedings of SPIE**, v. 9998, p. 99980A-1-99980A-11, 2016.

TEIXEIRA, A. H. de C., LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; HERNANDEZ, F. B. T. Water productivity assessments with landsat 8 images in the Nilo Coelho irrigation scheme. **Irriga**, Edição Especial, IRRIGA & INOVAGRI, p. 1-10, 2015.

TEIXEIRA, A. H. DE C. BASTIAANSSEN, W.G.M., AHMAD, M.D., MOURA, M.S.B., BOS, M.G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil, **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 362, p. 110-127, 2008.