

Revista Brasileira de Cartografia (2016), N° 68/10: 1975-1992
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

MAPEAMENTO DA VARIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DO BALANÇO DE RADIAÇÃO E ENERGIA EM DIFERENTES TIPOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

*Variation Spatial and Temporal Mapping of Radiation and Energy Balance in
Different Types of Use and Land Occupation*

**Renato Alberto Momesso Franco¹, Fernando Braz Tangerino Hernandez¹
& Antônio Heriberto de Castro Teixeira²**

¹ Universidade Estadual Paulista - UNESP
Departamento de Fitossanidade e Engenharia Rural e Solos
CP 34, CEP 15385-000, Ilha Solteira, SP - Brasil
bioramfranco@yahoo.com.br
fbhttang@agr.feis.unesp.br

² Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA
Embrapa Monitoramento por Satélite
CEP 13070-115, Campinas, SP - Brasil
heriberto.teixeira@embrapa.br

Recebido em 12 de Agosto, 2015/ Aceito em 18 de Junho, 2016
Received on August 12, 2015/ Accepted on June 18, 2016

RESUMO

O sensoriamento remoto possibilita a quantificação dos componentes do balanço de radiação e energia em larga escala, estimando os parâmetros biofísicos da superfície terrestre por meio de algoritmos que fornecem informações para a construção de modelos ambientais. O presente estudo teve como objetivo quantificar as variações espaciais e temporais do balanço de radiação e energia em larga escala, no noroeste do Estado de São Paulo, durante o período 1996 a 2010, com o uso de dados agrometeorológicos, imagens Landsat TM-5 e aplicação do modelo SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*). O albedo de superfície (α_0), temperatura da superfície (T_0) e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) foram os parâmetros de entrada obtidos por sensoriamento remoto. Os valores médios diários dos pixels de radiação solar global incidente, radiação solar de onda curta refletida, radiação solar de onda longa incidente e radiação solar de onda longa emitida foram $21,20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; $3,55 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; $32,04 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $39,47 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente. A fração de R_G transformada em saldo de radiação (R_n) apresentou valor máximo de 55% e mínimo de 37% com média de 46%. Os valores médios de fluxo de calor latente (λE) diários apresentaram um incremento de 153,2% no período, sendo as áreas irrigadas responsáveis por esse aumento. As médias da partição de energia em λE e no fluxo de calor sensível (H) foram de 35% e 68%, respectivamente.

Palavras chaves: SAFER, Balanço de Energia, Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

Remote sensing provides the quantification of components of the radiation balance and energy on a large-scale, estimating the biophysical parameters of the Earth's surface and application of algorithms which provide information to build

environmental models. This study aimed to quantify the spatial and temporal variations of the radiation balance and energy on a large scale in the northwest of São Paulo, during the period 1996-2010, with the use of agro-meteorological data, TM-5 and Landsat images implementation of the SAFER model. The surface albedo (α_0), surface temperature (T_0) and Difference Vegetation Index Normalized (NDVI) were the input parameters obtained by remote sensing. The average values of global solar radiation, short wave reflected solar radiation, solar radiation incident long wave and long-wave solar radiation emitted were 21.20 MJ m⁻² d⁻¹; 3.55 MJ m⁻² d⁻¹; 32.04 MJ m⁻² d⁻¹ and 39.47 MJ m⁻² d⁻¹, respectively. RG fraction net radiation transformed into the maximum value at 55% and minimum 37% average 46%. The average values of latent heat flux (λE) daily showed an increase of 153.2% in the period, and the irrigated areas responsible for this increase. The average energy partition in λE and sensible heat flux were 35% and 68%, respectively.

Keywords: Net Radiation, Latent Heat Flux, SAFER, Sensible Heat Flux.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, as mudanças climáticas podem provocar impactos no regime de precipitação e de temperatura do ar, alterando os balanços hídricos e de energia em diversas regiões do país (MARENGO, 2008). A quantificação dos componentes do balanço de radiação e energia em larga escala é crucial para elaboração de modelos ambientais, importantes para as decisões públicas sobre a gestão dos recursos naturais e nas avaliações dos impactos das ações antropogênicas (CARDOZO *et al.*, 2011). As mudanças de uso da terra e climáticas podem provocar uma reorganização das áreas e dos períodos de cultivos pelas diferentes culturas agrícolas e a possibilidade de modificação no zoneamento de aptidão de uma determinada região (ASSAD *et al.*, 2008), pois as condições agrometeorológicas determinam o desenvolvimento e a produtividade destas culturas.

A evapotranspiração (ET) é um processo de transferência de água para a atmosfera que ocorre na superfície terrestre na forma de vapor, que envolvem a evaporação da água no solo e a transpiração dos vegetais. Para obter ET adota-se diversos métodos que geralmente são limitados, pois estimam valores pontuais para um determinado local específico e não para uma escala de maior análise espacial. Por outro lado, outros métodos estão sendo utilizados para a obtenção da evapotranspiração em larga escala através do uso do sensoriamento remoto e com resultados satisfatórios.

O sensoriamento remoto possibilita a quantificação do balanço de energia em larga escala, estimando os parâmetros biofísicos da superfície terrestre por meio de algoritmos e alguns modelos tem sido desenvolvido e

aplicado em diversas regiões do globo terrestre (BASTIAANSSSEN *et al.*, 1998; ROERINK *et al.*, 2000; HEMAKUMARA *et al.*, 2003; JIA *et al.*, 2003; BRUNSELL & GILLIES, 2003; LIU *et al.*, 2003; BOEGH *et al.*, 2004; NAGLER *et al.*, 2005; LEUNING *et al.*, 2005; BATRA *et al.*, 2006; KUSTAS *et al.*, 2006; CLEUGH *et al.*, 2007; NAGLER *et al.*, 2007; TASUMI & ALLEN, 2007; ER-RAKI *et al.*, 2007; BASTIAANSSSEN *et al.*, 2008; TEIXEIRA *et al.*, 2009a,b; KIMURA *et al.*, 2007; AKBARI *et al.*, 2007).

A quantificação dos fluxos de energia na superfície terrestre utilizando dados de sensoriamento remoto e informações agrometeorológicas é possível identificar a ET em larga escala (TEIXEIRA *et al.*, 2013a; TEIXEIRA *et al.*, 2014a, b).

Experimentalmente a determinação do balanço de energia pode ser realizada por meio de métodos micrometeorológicos, como as técnicas das correlações turbulentas e o método da razão de Bowen (TEIXEIRA *et al.*, 2008a; TEIXEIRA, 2010). Entretanto, os resultados dos experimentos de campo fornecem medições pontuais e sendo difícil a extrapolação em larga escala, devido à diversidade de agroecossistemas presentes na paisagem regional.

Os procedimentos de validação destes modelos envolvem primariamente comparações dos componentes deste balanço obtidos por sensoriamento remoto com medições realizadas em campo, as quais fornecem um aumento da confiança na utilização de dados provenientes dos sensores a bordo de satélites.

No Brasil, o modelo *SEBAL* (*Surface Energy Balance for Land*) é um dos algoritmos mais utilizados para a determinação dos componentes do balanço de radiação e energia na

superfície terrestre, aplicável em diversos tipos de agro-ecossistemas (TEIXEIRA *et al.*, 2009a; SILVA *et al.*, 2005a; SILVA *et al.*, 2005b; SILVA & BEZERRA, 2006; BEZERRA *et al.*, 2008; ANDRADE *et al.*, 2012). Entretanto, a necessidade da determinação das condições hidrológicas extremas dificultando a sua aplicação em períodos chuvosos, quando a umidade do solo se apresenta homogênea nos diferentes ecossistemas.

Para a condição tropical brasileira, Teixeira (2010) desenvolveu e validou dois algoritmos com dados de campo em diferentes condições hidrológicas, envolvendo vegetação natural e agroecossistemas com diferentes tipos de culturas para a determinação da ET, baseado na equação de Penman-Monteith. O primeiro modelo utiliza medições agrometeorológicas e estimativas do saldo de radiação (R_n), do fluxo do calor no solo (G) e das resistências aerodinâmica (r_a) e da superfície (r_s) ao fluxo de vapor d'água associados aos dados obtidos por sensoriamento remoto. O segundo baseia-se em dados de albedo de superfície (α_0), temperatura de superfície (T_0) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Para ambos, utiliza-se dados de evapotranspiração de referência (ET_0) calculados com dados provenientes de estações agrometeorológicas para determinar os valores instantâneos da razão ET/ET_0 em conjunto com dados de satélites.

Recentemente o segundo modelo passou a ser denominado de *SAFER* (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*) e tem a vantagem de não utilizar informações de classificação das culturas e nem de condições extremas de seca (TEIXEIRA *et al.*, 2012), possibilitando o uso de dados agrometeorológicos diários obtidos de estações agrometeorológicas, tanto automáticas como convencionais, podendo-se ser feitas análises de tendências históricas dos componentes do balanço de radiação e energia.

O presente estudo teve como objetivo quantificar as variações espaciais e temporais do balanço de radiação e energia, no noroeste do Estado de São Paulo, durante o período 1996 a 2010, com o uso de dados agrometeorológicos, imagens Landsat TM-5 e aplicação do modelo *SAFER*. Aplicações do modelo, após algumas calibrações locais, podem subsidiar

o monitoramento dos recursos hídricos em diferentes condições agro-ecológicas, trazendo informações adicionais a serem incorporadas no processo de tomada de decisão e na gestão do uso da água em bacias hidrográficas, considerando-se a mudanças de uso da terra e climáticas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Na sequência a apresentação da área de estudo e suas características de uso e ocupação do solo, dados meteorológicos, informações de sensoriamento remoto obtidos por imagens de satélite e a modelagem do balanço de radiação e energia.

2.1 Área de estudo

A área de estudo abrange uma superfície que engloba três microbacias adjacentes e que são pertencentes a Bacia Hidrográfica do Baixo Tietê, localizadas nos municípios de Pereira Barreto e Sud Mennucci, na porção noroeste do Estado de São Paulo (Fig. 1). A área é ocupada por um grupo comercial que exercem diferentes atividades agropecuária.

Para a análise da variação espacial e temporal dos diferentes tipos de uso e ocupação do solo, entre os anos de 1996 a 2010 foram utilizados dados de levantamento de campo fornecida pela Fazenda Bonança (HERNANDEZ *et al.*, 2011) e identificada os diferentes tipos de alvos nas imagens do satélite Landsat 5 (*Thematic Mapper*) ao longo do período avaliado e armazenados em Sistema de Informação Geográfica.

Em 2010, a cana-de-açúcar ocupava uma área de 2896,95 ha (23,95%) nas microbacias e para pastagem em 1996 esta era de 8791,68 ha (72,34%), passando em 2010 para 5275,67 ha, com uma redução de 43,61% neste tipo de uso.

A área total mapeada é de 103,10 km² e estão ocupadas principalmente por pastagem e culturas irrigadas por sistema de pivô central (feijão, milho e sorgo) que intensificaram na região devido às condições favoráveis de plantio como disponibilidade de água, fertilidade do solo e relevo plano. Recentemente, as áreas com pastagem estão sendo substituídas gradativamente pela cultura da cana-de-açúcar que passou a ser destaque no cenário agrícola nacional para atender a demanda de etanol.

de julho de 2010 foram cana-de-açúcar, milho e feijão (HERNANDEZ *et al.*, 2011) (Fig. 1).

2.2 Dados agrometeorológicos

A classificação climática de Köppen para a região é de clima de savanas Aw, com inverno seco e ameno e verão quente e chuvoso.

Para o município de Ilha Solteira-SP, localizada a 47 Km da área de estudo, o balanço hídrico no período de 2000 a 2010 ficou com precipitação média anual de 1.354 mm e a evapotranspiração média anual de 1.506 mm e a região se caracterizou por apresentar sete meses com deficiência hídrica (abril a outubro) com o total anual de 442 mm e excedente hídrico de 296 mm nos meses de janeiro, fevereiro e março (UNESP, 2013).

Para o período avaliado entre 1996 a 2010 utilizaram-se dados de precipitação média mensal (P_m) e evapotranspiração de referência acumulada mensal (ET_0Am), calculado pelo método de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998), da estação agrometeorológica de Ilha Solteira-SP, operada pela Área de Hidráulica e Irrigação da UNESP (UNESP, 2014) e localizada nas coordenadas 20°25'24,4" S e 51°21'13,1" W (Fig.1).

Os dados diários de radiação solar global incidente (R_G) medido por piranômetro, temperatura do ar média (T_a) e evapotranspiração de referência (ET_0) foram usados em conjunto com os parâmetros de sensoriamento remoto para os cálculos do balanço de energia.

Para a verificação das condições hidrológicas nas imagens avaliadas, adotaram-se a ET_0 e a precipitação (P) acumulada, em 16 dias antes da passagem do satélite (resolução temporal do satélite), para cada cena no período avaliado.

2.3 Imagens Landsat 5 TM

As imagens utilizadas na pesquisa são com datas de passagem durante o período de deficiência hídrica na região, conforme o balanço hídrico citado anteriormente. Para cada ano escolheu uma imagem de passagem nesta condição climática, com destaque para os meses de junho, junho, agosto, setembro e outubro.

As imagens foram identificadas em anos e dias julianos (DJ), conforme descrito a seguir: 1996/218; 1997/237; 1998/208; 1999/211;

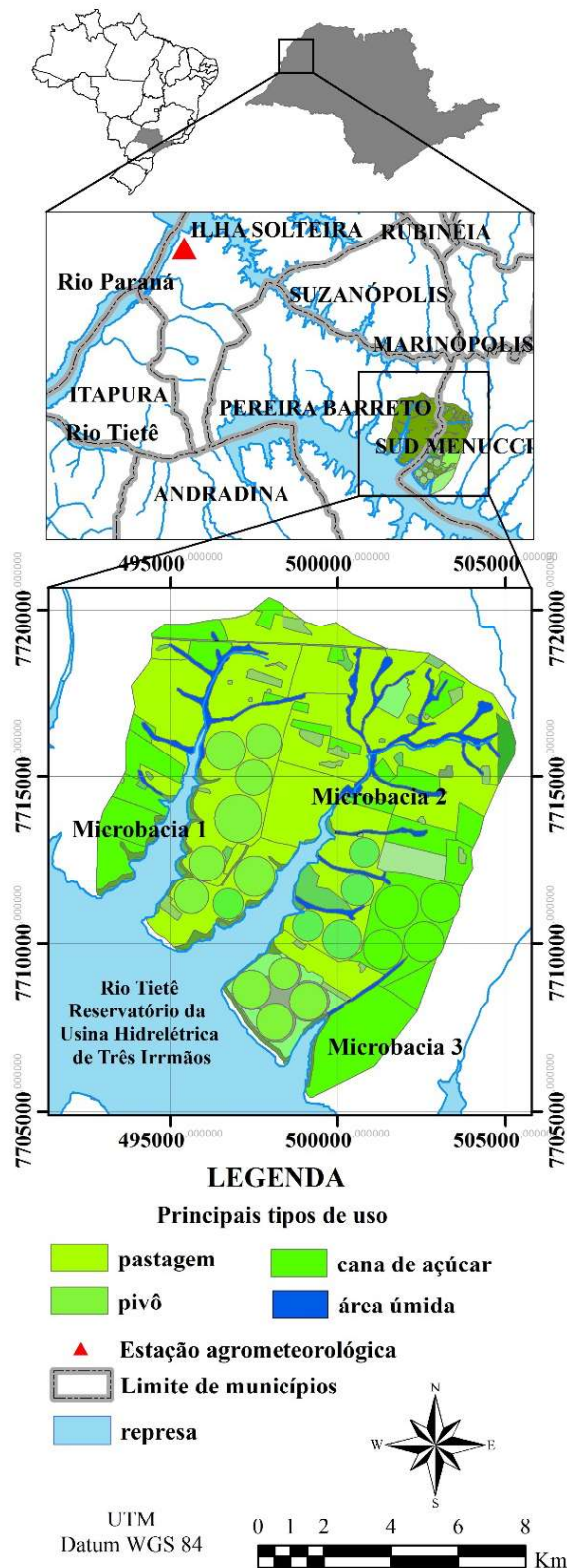


Fig. 1 - Mapa de localização da área de estudo e os principais tipos de uso e ocupação do solo no ano de 2010.

A área irrigada teve início em 1997 com apenas 2,90% (352,29 ha), passando, em 2010, a ocupar 12,03% (1456,0 ha) e com taxa de crescimento de 112 ha/ano. As principais culturas agrícolas instaladas nas áreas irrigadas em 12

2000/261; 2001/157; 2001/296; 2003/286; 2005/227; 2007/249; 2008/267; 2009/238 e 2010/177. Apenas a imagem do ano/DJ - 2004/80 não corresponde ao período com deficiência hídrica, foi escolhida por motivo de nuvens em outras imagens do período.

2.4 Metodologia para a obtenção da modelagem do balanço de energia e radiação

A radiação espectral de cada banda (L_b) será calculada como:

$$L_b = \left[\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{255 - 0} \right] * (DN - 0) + L_{MIN} \quad (1)$$

onde DN é o número digital; L_{MAX} e L_{MIN} são as constantes de calibração; 255 e 0 são respectivamente os mais altos e mais baixos valores das radiações re-escaladas em DN. A unidade de L_b é $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$. Para o Landsat TM-5 os valores de L_{max} e L_{min} devem ser obtidos em Chander & Markham (2003) que determinaram os coeficientes de calibração.

O albedo planetário (α_{pb}) é obtido a partir de cada banda espectral do Landsat, e calculado como:

$$\alpha_{pb} = \frac{L_b \pi d^2}{R_{ab} \cos \varphi} \quad (2)$$

onde d é a distância relativa Terra-Sol; R_{ab} é a radiação solar média no topo da atmosfera para cada banda do satélite ($W m^{-2} \mu m^{-1}$) e φ é o ângulo zenital solar.

$$\alpha_p = \sum w_b \alpha_{pb} \quad (3)$$

onde w_b representa o peso para cada banda, computado como a razão da radiação solar incidente em uma banda particular e a radiação solar incidente envolvendo todas as bandas. As bandas 1 a 5 e 7 do Landsat 5 -TM fornecem os dados nas faixas do visível e infravermelho próximo para o cálculo do albedo (CHANDER & MARKHAM, 2003).

A atmosfera terrestre interfere nos valores de reflectância que chega ao sensor do satélite

e parte da radiação de onda curta incidente é refletida de volta para o satélite antes da sua incidência na superfície da Terra. Para corrigir as perturbações atmosférica adotou-se uma combinação de medições de campo com cálculos de α_p por meio de medições pelo satélite Landsat 5 TM (TEIXEIRA *et al.*, 2008; TEIXEIRA *et al.*, 2009a, b; TEIXEIRA, 2010; TEIXEIRA *et al.*, 2013) que resultou na obtenção do albedo da superfície (α_0) conforme Equação 4:

$$\alpha_0 = a\alpha_p + b \quad (4)$$

onde a = 0,61 e b = 0,08 são os coeficientes de regressão para o momento da passagem do satélite e envolvendo diferentes condições termo hidrológicas para a região tropical brasileira (TEIXEIRA *et al.*, 2009a; TEIXEIRA *et al.*, 2013).

A radiação espectral na banda 6 (L6) do Landsat é convertida em temperatura radiométrica aplicável ao topo da atmosfera (T_{sat}) pela inversão da Lei de Plank na banda de faixa 10,4-12,5 μm ;

$$T_{sat} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_6 + 1}\right)} \quad (5)$$

onde L6 é a radiação térmica não corrigida da superfície e K_1 (607,76) e K_2 (1260,56) são coeficientes de conversão. O resultado da temperatura radiométrica foi corrigido para obtenção da temperatura aerodinâmica na superfície (T_0) seguindo Teixeira *et al.* (2009a).

A radiação termal medida pelos sensores a bordo dos satélites necessita de correção para ambas a emissão atmosférica e a diferença entre as temperaturas radiométrica e aerodinâmica. Para correção desses efeitos conjugados, os valores resultantes da Equação 5 foram usados para a obtenção de uma regressão linear entre T_0 ($T_0 = T_a + \Delta T$) e T_{sat} :

$$T_0 = aT_{sat} + b \quad (6)$$

onde os coeficientes a = 1,07 e b = - 20,17 ($R^2=0,93$) foram obtidos em Teixeira *et al.* (2009a).

O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*) foi obtido conforme equação abaixo:

$$NDVI = \frac{\alpha_{p(P)} - \alpha_{p(VER)}}{\alpha_{p(P)} + \alpha_{p(VER)}} \quad (7)$$

onde:

$\alpha_{p(IP)}$ e $\alpha_{p(VER)}$ representam o albedo planetário nas faixas no comprimento de onda do infravermelho próximo (IP) e do vermelho do espectro solar (VER), respectivamente.

Em seguida os parâmetros obtidos anteriormente foram incluídos na Equação 8 para a obtenção da evapotranspiração atual (TEIXEIRA, 2010), recentemente denominado de modelo SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*):

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \quad (8)$$

em que:

a e b são os coeficientes de regressão, com valores de 1,0 para a região noroeste paulista (TEIXEIRA et al., 2014) e - 0,008, respectivamente. Em seguida, os valores instantâneos da relação ET/ET₀ são então multiplicados pelos valores diários da ET₀ para obtenção dos valores de ET. No processo de evapotranspiração, parte da energia radiante é transformada em fluxo de calor latente (λE). (Evaporação de 1kg de água a 20°C requer 2,45 MJ; 1mm/dia = 2,45 MJ m⁻² d⁻¹).

Em seguida é computado o saldo de radiação (R_n), o fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor na superfície (G), conforme a Equação 9:

$$R_n - \lambda E - H - G = 0 \quad (9)$$

Os valores diários de (R_{n24}) foram calculados na mesma escala de tempo, através da equação Slop (Equação 10) (DE BRUIN & STRICKER, 2000; TEIXEIRA et al., 2009; TEIXEIRA, 2010; TEIXEIRA et al., 2014):

$$R_{n24} = (1 - \alpha_0) R_G - a_1 \tau_{sw} \quad (10)$$

sendo:

α_0 = albedo de superfície;

R_G = radiação solar global incidente obtida na estação agrometeorológica (Fig. 1);

τ_{sw} = transmissividade atmosférica de ondas curtas na escala diária determinada conforme a Equação 12.

a₁ = coeficiente obtido conforme a Equação 11 e foi definida por Teixeira et al. (2008b):

$$a_1 = dT_a - e \quad (11)$$

em que:

d e e são coeficientes de regressão e apresentam os seguintes valores, 7,0 e 39,93, respectivamente; T_a = temperatura do ar média (°C) obtida na estação agrometeorológica (Fig. 1).

A τ_{sw} foi obtida pela seguinte razão (TEIXEIRA et al., 2013):

$$\tau_{sw} = \frac{R_G}{R_a} \quad (12)$$

em que:

R_a é a radiação solar no topo da atmosfera e foi calculada conforme a Equação 13:

$$R_a = G_{sc} * \cos \theta * d_r \quad (13)$$

em que:

G_{sc} = constante solar, valor médio igual a 1367 W. m⁻²;

cos θ = cosseno do ângulo zenital solar, graus;

d_r = inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol;

A radiação solar de onda curta refletida (RS) foi obtida conforme a Equação 14:

$$RS = \alpha_{024} * R_G \quad (14)$$

Para a obtenção da radiação de onda longa emitida pela atmosfera (RL↓) foi calculada usando a Equação 15:

$$RL \downarrow = \epsilon_a \sigma T_a^4 \quad (15)$$

em que:

σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) e T_a é em K.

ϵ_a é a emissividade atmosférica modelada em função da transmissividade atmosférica (τ_s) para ondas curtas (TEIXEIRA, 2010), conforme a Equação 16:

$$\epsilon_a = f(-\ln \tau_s)^g \quad (16)$$

onde:

f e g correspondem aos coeficientes de regressão com os valores de 0,94 e 0,10 ($R^2= 0,75$), respectivamente.

O λE foi quantificado para o período de 24 horas e H foi obtido como resíduo da equação do balanço de energia (Equação 9) e determinado conforme a Equação 17:

$$H = R_n - \lambda E \quad (17)$$

O G foi determinado conforme a equação abaixo (TEIXEIRA, 2010):

$$G/R_n = h \exp(i\alpha_0) \quad (18)$$

onde:

$h = 3,98$ e $i = -25,47$ ($R^2=0,90$) são coeficiente de regressão.

As características de cada pixel dos alvos das imagens são analisadas por meio de estatística descritiva (mínima, máxima, média e desvio padrão) e para identificar a estimativa da variabilidade média dos alvos (pixels) nas imagens avaliadas adotou-se o desvio padrão (DP). A média do período analisado foi determinado através do somatório das imagens e em seguida a divisão das 14 imagens.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As condições meteorológicas são avaliadas em conjunto com os dados de sensoriamento remoto e são apresentados nos itens subsequentes.

3.1 Condições agrometeorológicas

Na Figura 2 a distribuição dos valores de Pm e ET_0 Am no período de 1996 a 2010. Os meses de janeiro, fevereiro, março, maio,

outubro, novembro e dezembro apresentaram Pm superior em relação aos valores de ET_0 Am. Os valores de ET_0 Am foram superiores nos meses de junho, julho, agosto e setembro em relação a Pm. Verifica-se que a condição de partição de energia disponível é dependente das condições termo hidrológicas, podendo influenciar nas características biofísicas dos alvos analisados, condições semelhantes foram observadas na região do semi-árido nordestino, município de Petrolina-PE (TEIXEIRA *et al.*, 2013) e na região noroeste do Estado de São Paulo (TEIXEIRA *et al.*, 2014; FRANCO *et al.*, 2015).

As condições de P e ET_0 acumulada no intervalo de 16 dias estão representados na Figura 3. Os maiores valores de P ocorreram nas imagens de DJ 261 (2000), 152 (2001) e 238 (2009). Nas demais imagens os valores de ET_0 acumulada foram superiores aos valores de P.

Na Figura 4 os valores médios diários de radiação global incidente para o período avaliado.

O valor médio de R_G das imagens avaliadas entre o período de 1996 a 2010 foi de $21,19 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ com desvio padrão (DP) de $\pm 4,00 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; sendo o mês de junho, com o menor valor ($15,50 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ - Ano/DJ: 2001/152) e o máximo valor foi de $29,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Ano/DJ: 2008/267, setembro). O baixo valor no mês de junho é devido ao período em torno do solstício de inverno no hemisfério sul e os maiores valores ocorreram em setembro, época em que o Sol apresenta-se na posição zenital e em condições de baixa nebulosidade na região de estudo.

O valor médio de R_G das imagens avaliadas entre o período de 1996 a 2010 foi de $21,19 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e DP de $\pm 4,00 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; sendo o mês de junho, com o menor valor ($15,50 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ - Ano/DJ: 2001/152) e o máximo valor foi de $29,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Ano/DJ: 2008/267, setembro). O baixo valor no mês de junho é devido ao período em torno do solstício de inverno no hemisfério sul e os maiores valores ocorreram em setembro, época em que o Sol apresenta-se na posição zenital e em condições de baixa nebulosidade na região de estudo.

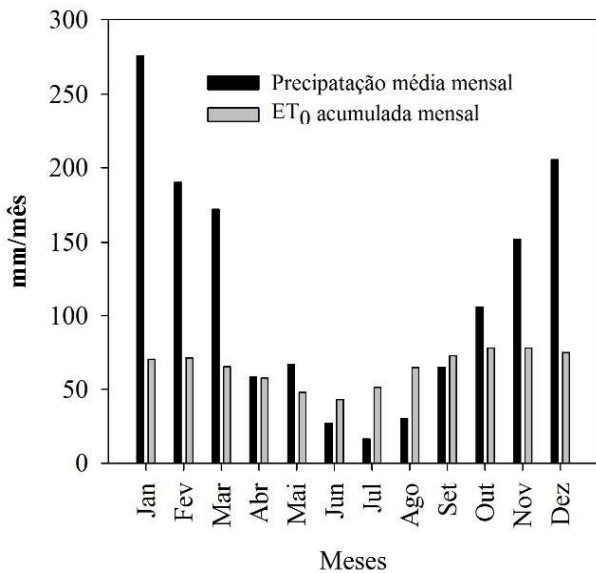


Fig. 2 - Precipitação média mensal e ET₀ acumulada no período de 1996 a 2010.

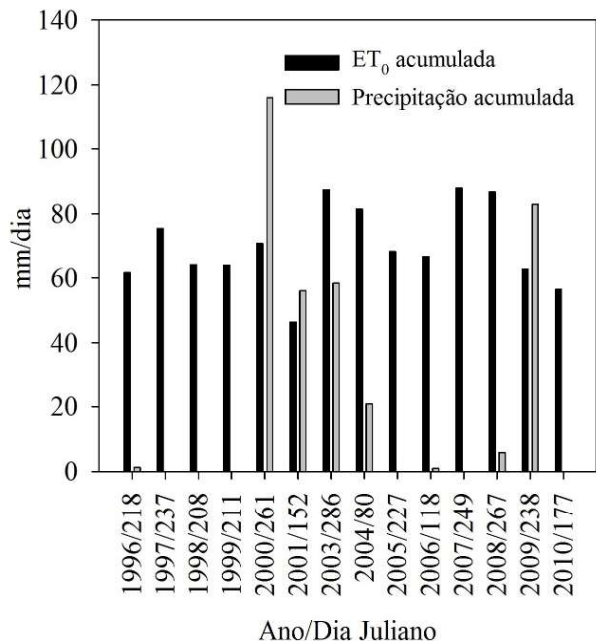


Fig. 3 - P e ET₀ acumulada em 16 dias antes da passagem do satélite para cada imagem do Landsat TM-5.

3.2 NDVI

O valor médio de NDVI em relação ao período analisado de 1996 a 2010 foi de 0,40 (DP: 0,06). O maior valor foi em 2001 (DJ: 152), com média de 0,53 (Fig. 5) e menor variação nos valores dos pixels. Evidencia-se que os valores de NDVI são dependentes das condições climáticas, principalmente a precipitação. Segundo Zhou *et al.* (2014) encontraram correlação entre os valores de NDVI e precipitação.

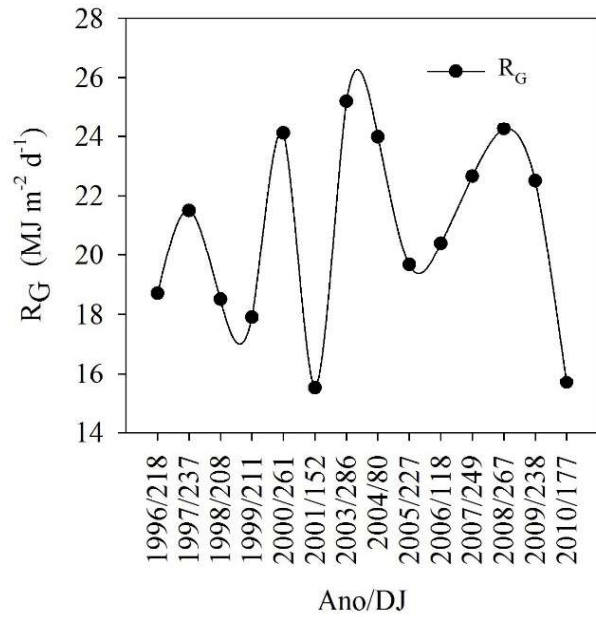


Fig. 4 - Valores médios diários de R_G para cada Ano e DJ.

Conforme a Figura 3, os valores de P foram superiores no DJ 152 em relação a ET₀ acumulada; nesta condição, o solo apresenta umidade na zona das raízes e um aumento nos valores são observados.

Na imagem do DJ 80 (2004) o segundo maior valor médio foi de 0,52 (DP: 0,17), o mês de março as condições de umidade no solo são favoráveis na região (Fig. 2) e influenciando o aumento nos valores dos pixels.

Os menores valores dos pixels de NDVI foram na imagem do DJ 267 (setembro-2008), com média de 0,31 (DP: ± 0,17), devido à deficiência hídrica que ocorreu entre 29 de junho a 01 de outubro de 2008, com 125 dias sem chuva acima de 10 mm (UNESP, 2013).

A mudança no uso da terra não influenciou nos valores elevados de NDVI no período avaliado. As classes de uso do solo que apresentaram os maiores valores médios de NDVI nas imagens avaliadas no período de 1996 a 2010 foram culturas irrigadas por pivôs, fragmento de mata, citros e pastagem com valores médios de 0,49, 0,46, 0,45 e 0,43, respectivamente.

Na imagem DJ 177 (2010) a área irrigada atingiu valor máximo de 0,81. Em área irrigada por pivô, no município de Bom Jesus da Lapa-BA, Borges *et al.* (2010) encontraram valores acima de 0,75 nos meses de abril e maio de 2007.

No perímetro irrigado Nilo Coelho, em Petrolina-PE, Teixeira *et al.* (2012) encontraram valor de 0,80 em algumas áreas irrigadas no período de 1992 a 2010.

3.3 Albedo

A média geral do α_0 para o período analisado foi de 0,16 (DP: $\pm 0,01$) e os maior valor médio ocorreu no dia juliano 267 (setembro/2008), devido à baixa condição de umidade no solo verificada, com 125 dias sem chuva entre 29/05 a 01/10 (UNESP, 2013) (Fig. 6), a situação semelhante foram identificadas nos DJ 286/2003, 227/2005 e 249/2007. Variações nos valores de α_0 em condição de baixa umidade foram verificados por diversos autores (LOBELL & ASNER, 2002; VAN DIJK *et al.*, 2004; LI *et al.*, 2006). Outro fator que influenciou no aumento dos valores são a variação na posição do Sol, proporcionado diferentes níveis de R_G .

Os menores valores ocorreram nos anos de 1996 (DJ: 218), 1997 (DJ:237), 1998 (DJ:208), 2000 (DJ:261) e 2001 (DJ:155) (Fig. 6).

Os valores de α_0 para os tipos de uso e ocupação do solo e DJ avaliados apresentaram baixa variabilidade nos dados observados, pois o valor de DP para o período analisado foi de 0,01. Os tipos de uso cana-de-açúcar, cultura

anual, pivôs em pousio, pastagem e pivôs ativos apresentaram valor médio de 0,17 e o uso várzea e fragmento de mata este foi de 0,16. Gomes *et al.* (2009) encontraram valores entre de albedo entre 0,16 a 0,22 para a cultura da cana-de-açúcar. Giongo *et al.* (2014) encontraram valores superiores de albedo para a pastagem em relação ao presente estudo, variando entre 0,25 e 0,34 na bacia do rio Corumbataí, na região centro-leste do Estado de São Paulo.

Quando as superfícies dos pivôs estão cobertas por culturas observa redução nos valores de α_0 (0,15), devido à irrigação. Com relação às áreas irrigadas estes foram semelhantes ao encontrado na mesma região por Franco *et al.* (2013). Em condição de maior disponibilidade hídrica os valores de albedo diminuem e aumenta em condição de seca (OLIVEIRA *et al.* 2014; QUERINO *et al.*, 2009; TATSCH, 2006; LI *et al.*, 2006; GIONGO *et al.*, 2014; FRANCO *et al.*, 2015).

Os menores valores de albedo entre 0,12 a 0,14 ocorreram no reservatório. Em outros estudos, Giongo *et al.* (2014) encontraram valores entre 0,6 a 0,11 nos corpos hídricos na bacia do rio Corumbataí e Silva *et al.* (2005b) encontraram valores entre 0,6 a 0,7 no rio São Francisco.

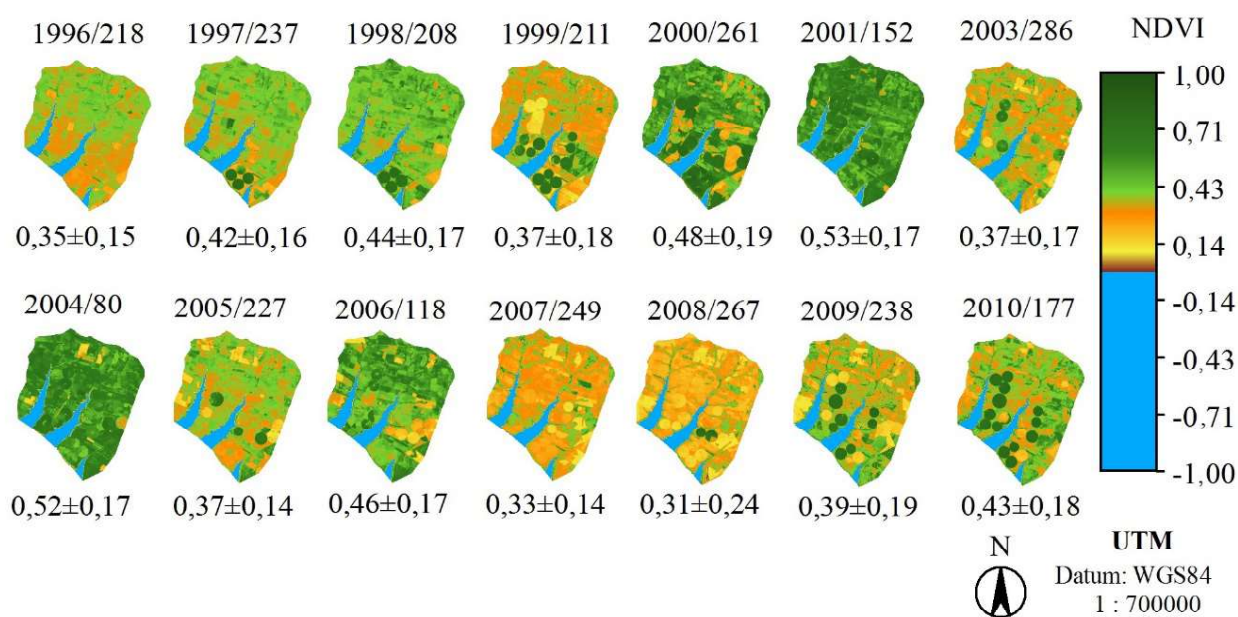


Fig. 5 - Distribuição espacial e temporal dos valores de NDVI para Ano e DJ com valores médios e DP.

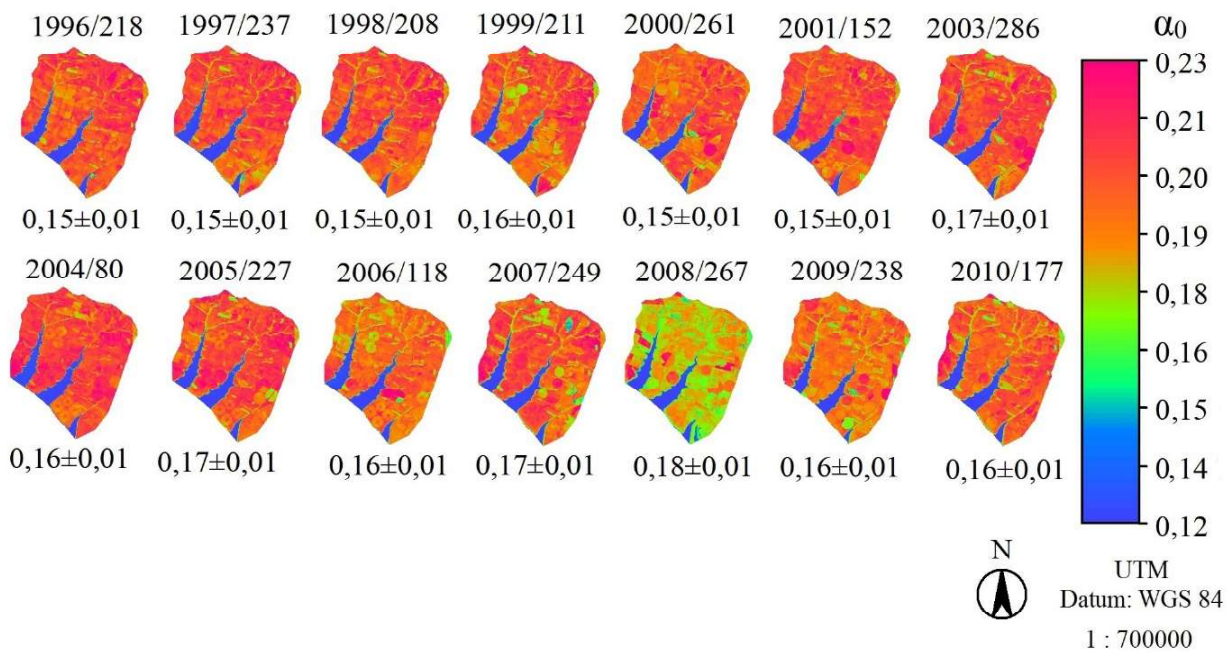


Fig. 6 - Distribuição espacial e temporal dos valores de albedo para Ano e DJ com valores médios e DP.

3.4 Temperatura de superfície

Os maiores valores médios de T_0 dos alvos avaliados na área de estudo ocorreram nos anos de 2000 (DJ: 261) e 2007 (DJ:249), com os seguintes valores de 309,1 K (35,9 °C) (DP:2,17 K) e 306,7 K (33,5 °C), respectivamente (Fig. 7).

Valores elevados de T_0 influenciaram na radiação de ondas longas emitida ($RL\uparrow$); e em geral, observa-se que ocorreram em período de maior R_G e a temperatura média do ar (T_a) para o ano de 2000 (DJ: 261) foi de 27,4 °C. O menor valor médio foi de 300,0 K (27 °C) e ocorreu no ano de 2009 (DJ: 238) (DP: ± 2,14 K) (Figura 7) e a T_a média registrada foi de 22,1 °C. A média dos valores de T_0 para o período analisado de 1996 a 2010 foi de 304,2 K (31,2 °C) (DP: ± 2,75 K).

Em relação ao uso e ocupação do solo no período avaliado entre 1996 a 2010, observa-se que a T_0 na cultura da cana-de-açúcar apresentou média de 304,6 K (31,64 °C) (DP: ± 2,78 K), mínimo de 300,1 K (27,17 °C) e máximo de 309,6 K (36,4 °C). A área irrigada ficou com média de 304,3 K (31,1 °C) (DP: ± 2,85 K), mínimo de 299,2 K (26,0 °C) e máximo de 309,1 K (35,9 °C); os menores valores observados ocorreram quando os pivôs estavam com cobertura vegetal e os maiores valores de T_0 ocorreram na fase de repouso, com solo exposto. Teixeira *et al.* (2013) encontraram redução nos valores de T_0 em áreas

irrigadas e aumento nos valores em condição de seca.

Os usos fragmento de mata e citros apresentaram os menores valores mínimos, com 298,9 K (25,7 °C) e 298,8 K (25,6 °C), respectivamente. A pastagem ficou com temperatura da superfície média de 303,9 K (30,7 °C) (DP: 2,74 K), mínimo de 299,8 K (26,6 °C) e máximo de 309,3 K (36,1 °C). A maior média ocorreu no uso solo exposto, com valor de 305,1 K (32,0 °C) e atingiu valor máximo de 308,7 K (35,6 °C).

3.5 Balanço de energia

A fração de R_G transformada em R_n ficaram com valores máximo de 55%, mínimo de 37% e média de 46% para o período avaliado. Estudos desenvolvidos na região tropical brasileira e em diferentes condições hidrológicas verificaram que a frações R_G/R_n apresentaram variações entre 42 a 50% e média de 46% (TEIXEIRA *et al.*, 2012). Em TEIXEIRA *et al.* (2008) relataram que valores próximos de 50% confirma as medições realísticas do balanço de radiação com informações obtidas tanto com dados de campo e sensoriamento remoto.

A RS apresentou o menor valor médio de 2,41 MJ m⁻² d⁻¹ na imagem do ano de 2001 (DJ: 152), e o máximo valor médio foi na imagem de 2008 (DJ: 267), com 5,33 MJ m⁻² d⁻¹, o valor

médio para o período analisado foi de 3,55 MJ m⁻² d⁻¹ (DP: ± 0,81 MJ m⁻² d⁻¹).

A RL↓ nas microbacias apresentou valor médio de 32,04 MJ m⁻² d⁻¹ (DP: ± 0,90 MJ m⁻² d⁻¹), o mínimo foi de 30,28 MJ m⁻² d⁻¹ no mês de agosto de 2009 (DJ: 238) e o máximo de 33,43 MJ m⁻² d⁻¹ foi no mês de setembro de 2000 (DJ: 261).

O valor médio de RL↑ para o período foi de 39,47 MJ m⁻² d⁻¹ (DP: ± 1,52 MJ m⁻² d⁻¹), o menor valor médio foi de 36,99 MJ m⁻² d⁻¹ e ocorreu na imagem do mês de agosto de 2008 (DJ: 267) e o maior valor médio foi de 42,64 MJ m⁻² d⁻¹ na imagem do mês de setembro de 2000 (DJ: 261). No perímetro irrigado Nilo Coelho, município de

Petrolina-PE, Teixeira *et al.* (2012) encontraram o maior valor médio de radiação de onda longa emitida no mês de setembro com valor de 45,0 MJ m⁻² d⁻¹ e outubro com valor de 43,0 MJ m⁻² d⁻¹.

Os valores de R_n avaliados estão diretamente relacionados com os valores de R_G (R²=0,83), pois este último componente é o de maior influência no balanço de radiação, isto também indica que R_n pode ser estimado a partir de R_G (Fig. 8) (TEIXEIRA *et al.*, 2008b). Os valores de R_n podem ser influenciados também pelos valores de α₀ e assim afetando a relação R_G e R_n e com variações sazonais nos valores de R_n (TEIXEIRA *et al.*, 2008b).

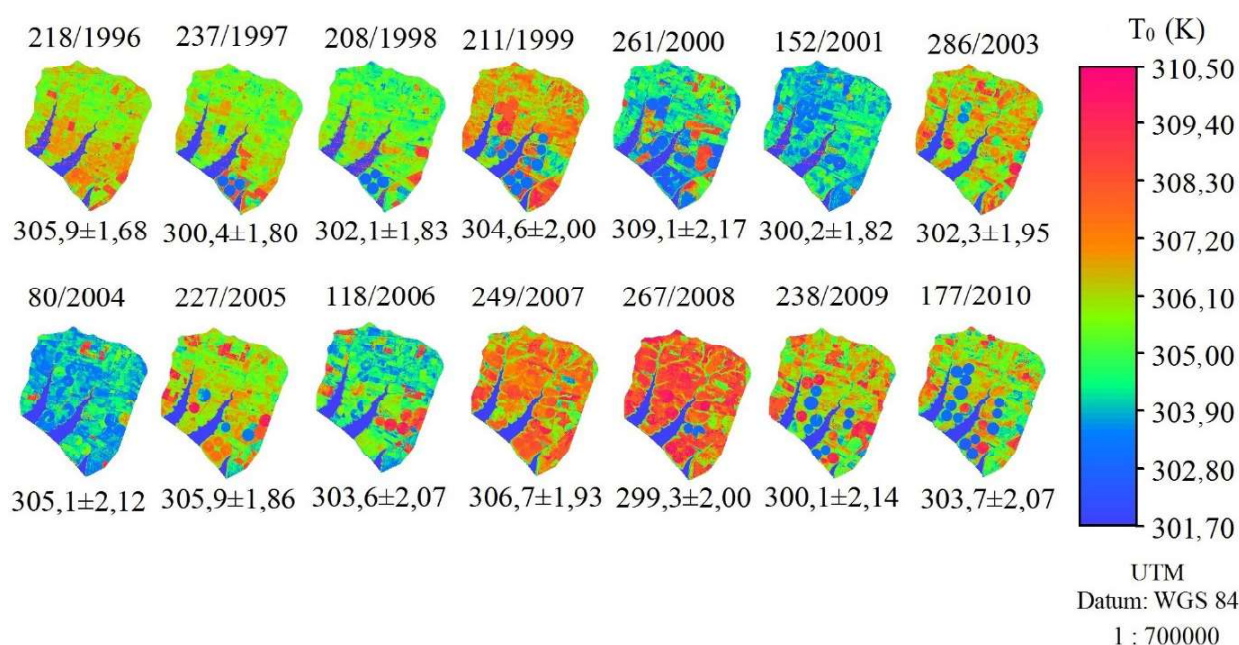


Fig. 7 - Distribuição espacial e temporal dos valores de T₀ para Ano e DJ com valores médios e DP.

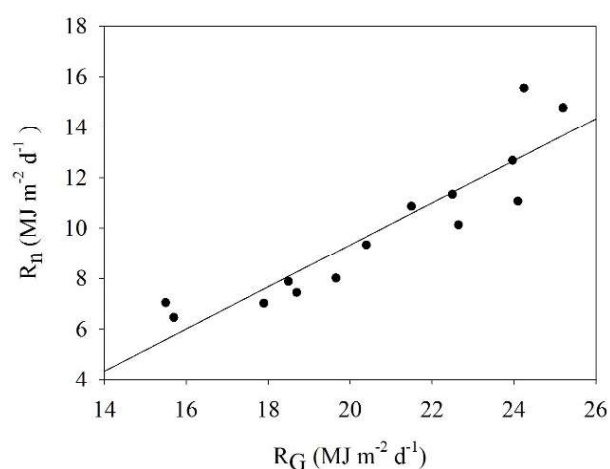


Fig. 8 - Relação entre o R_n obtida via sensoriamento remoto e a R_G.

Na Figura 9, os valores de R_n não ocorreram variações espaciais acentuadas nos diferentes tipos de usos do solo verificado nos valores de desvio padrão (DP); o menor valor médio foi de 6,49 MJ m⁻² d⁻¹ e DP de ± 0,30 MJ m⁻² d⁻¹ (Ano/DJ: 2010/177, junho) e o maior valor foi de 15,54 MJ m⁻² d⁻¹ (DP: ± 0,76 MJ m⁻² d⁻¹) (Ano/DJ: 2008/267, setembro).

Estudos verificaram que os valores de R_n são dependentes dos valores de R_G e com pequenas variações espaciais nos valores dos pixels, observada pelos baixos valores de desvio padrão nas imagens (TEIXEIRA *et al.*, 2012; TEIXEIRA *et al.*, 2013b; TEIXEIRA *et al.*, 2015).

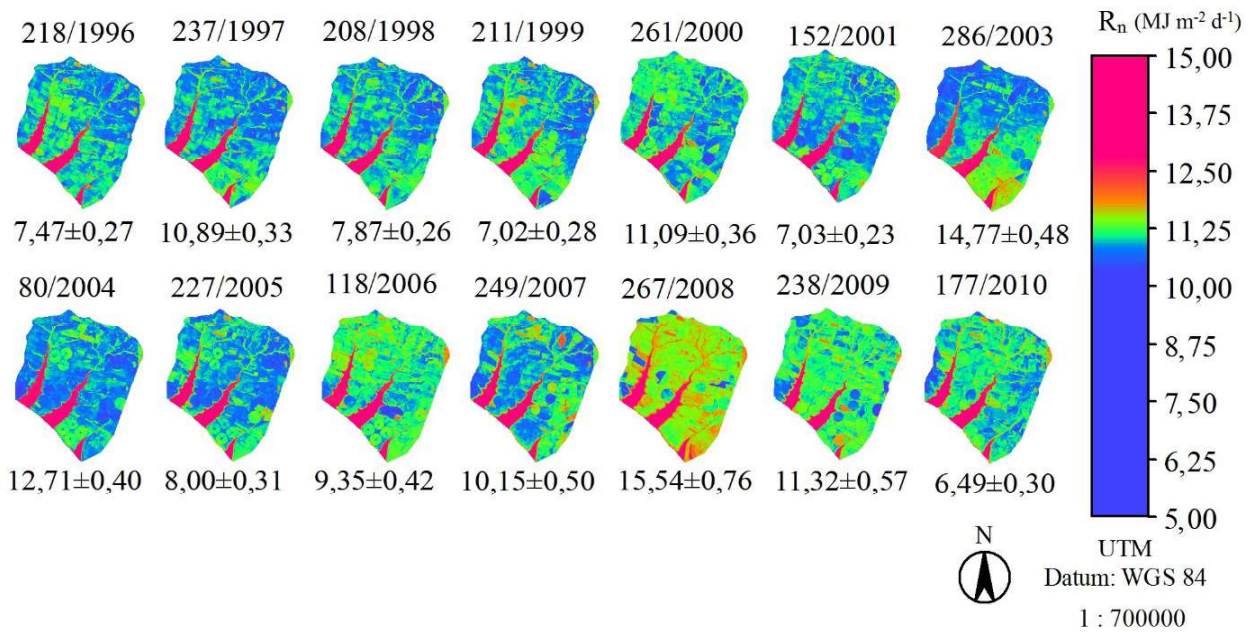


Fig. 9 - Distribuição espacial e temporal dos valores de R_n para Ano e DJ com valores médios e DP.

Na região noroeste paulista, Franco *et al.* (2013) encontraram valores baixos de R_n no mês de julho (2011) de $5,71 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $7,32 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $6,60 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para os usos cana de açúcar, área irrigada e fragmento de mata, respectivamente.

O maior valor médio de λE foi no ano de 2000 (DJ: 261, setembro), com $5,09 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($2,08 \text{ mm d}^{-1}$) e com DP de $\pm 3,09 \text{ MJ}^{-2} \text{ d}^{-1}$, sendo a classe de uso irrigação por pivô a que apresentou a maior média, com $6,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (DP: $\pm 3,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). A menor média ocorreu em 1996 (DJ:218) com valor de $1,77 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 0,72 \text{ mm d}^{-1}$) e DP de $\pm 1,24 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; nesta data, a classe de uso pastagem e fragmento de mata apresentaram os valores $2,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $1,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente (Fig. 10).

Em 1997 teve início da área irrigada por pivô central e foi a classe de uso que apresentou o maior valor médio de λE , com $4,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e em 1998 com valor médio de $5,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Os valores médios de λE diários apresentaram um incremento de 153,2% ao longo do período de 1997 a 2010, devido ao acréscimo das áreas irrigadas ao longo do tempo na região de estudo.

A média de $\lambda E/R_n$ para o período avaliado, entre o ano de 1996 a 2010 foi de 0,35 (35%). Sendo as maiores partições de energia nas imagens de 2000 (DJ: 261), 2005 (227) e 2010 (DJ: 177) com valores de 0,46, 0,48 e 0,55, respectivamente. A taxa da média de $\lambda E/R_n$ para a área irrigada de foi 0,70 (70%) para o ano de

1998 (DJ: 208); no ano de 1999 (DJ: 211) e 2000 (DJ: 261) o valor médio foi de 0,50 (50%); na imagem do ano de 2008 (DJ:267) a partição média foi de 0,40 (40%). Entretanto, em 2010 (DJ: 177) a $\lambda E/R_n$ na área irrigada foi de 1,00 (100%), isso significa que o solo apresentava em condições de disponibilidade de água, pois toda a energia disponível foi utilizada na conversão de λE , o que representa 100% da R_n foi utilizado no processo de evapotranspiração e a consequente redução de H/R_n .

Na Figura 11, estão os valores médios de H . A maior média ocorreu no ano de 2008 (DJ: 267, setembro), com valor de $11,56 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (DP: $\pm 4,07 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e a classe de uso irrigação com pivôs apresentou o menor valor médio de $6,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (DP: $\pm 5,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Os maiores valores ocorreram na classe de uso cana de açúcar e fragmento de mata, com valores médios de $12,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $12,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente. Os elevados valores de H para a imagem de 2008 ocorreram no período seco, que ficou com 125 dias sem chuva na região (UNESP, 2013), a superfície nesta condição de deficiência hídrica restringe λE e a fração de R_n para λE diminui e aumentando a fração de R_n para H e G .

Os menores valores médios de H ocorreram no ano de 2010 (DJ: 177), em 2001 (DJ: 152, junho) e em 2005 (DJ: 227) com $2,67 \text{ MJ}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (DP: $\pm 2,23 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), $4,33 \text{ MJ}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (DP: $\pm 1,61 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e $4,41 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($2,54 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), respectivamente.

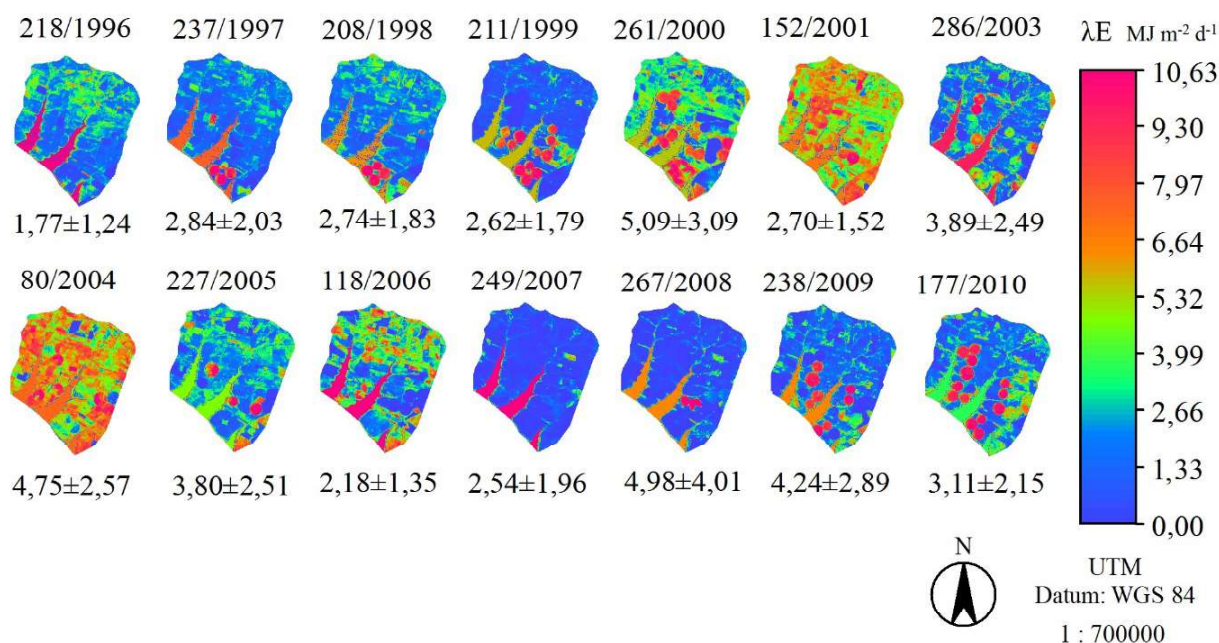


Fig. 10 - Distribuição espacial e temporal dos valores de ET para Ano e DJ com valores médios e DP.

No ano de 2010 houve redução nos valores de H devido a área irrigada por pivô central que a irrigação é diária e os valores variaram entre -3,0 MJ m⁻² d⁻¹ a 5,4 MJ m⁻² d⁻¹, com média de 1,0 MJ m⁻² d⁻¹ e DP de 2,4 MJ m⁻² d⁻¹; nesta condição, houve advecção de calor sensível (ar mais quente chegando nas vizinhanças dos pivôs), o que contribui para aumentar a fração de R_n utilizada como λE. Em áreas irrigadas no semi-árido, Teixeira *et al.* (2012) e Teixeira *et al.* (2014) encontraram valores de H inferiores a 1,0 e em determinado período com valores negativos, devido advecção de calor sensível.

O valor médio de H/R_n entre o período de 1996 a 2010 foi de 0,68 (68%), sendo os maiores nos anos de 2007 (DJ: 249), 2008 (DJ: 249), 1996 (DJ: 218), 2003 (DJ: 286) e 1997 com valores de 0,82 (82%), 0,74 (74%), 0,80 (80%), 0,77 (77%) e 0,75 (75%), respectivamente. Isso demonstra que a energia disponível de R_n foi convertida em calor sensível que resulta no processo de aquecimento do ar, com elevação da temperatura. O menor valor médio de H/R_n foi na imagem do ano de 2010 (177), de 0,49 (49%), essa redução na taxa de H/R_n foi devido a área irrigada.

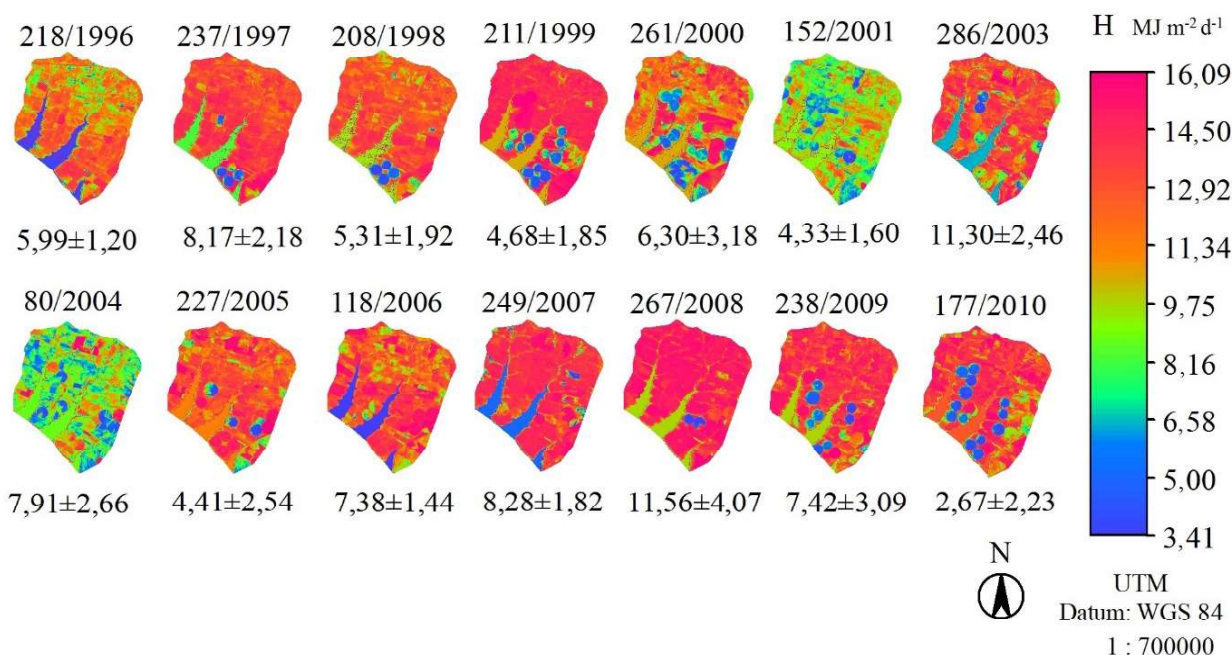


Fig. 11 - Distribuição espacial e temporal de H para Ano e DJ com valores médios e DP.

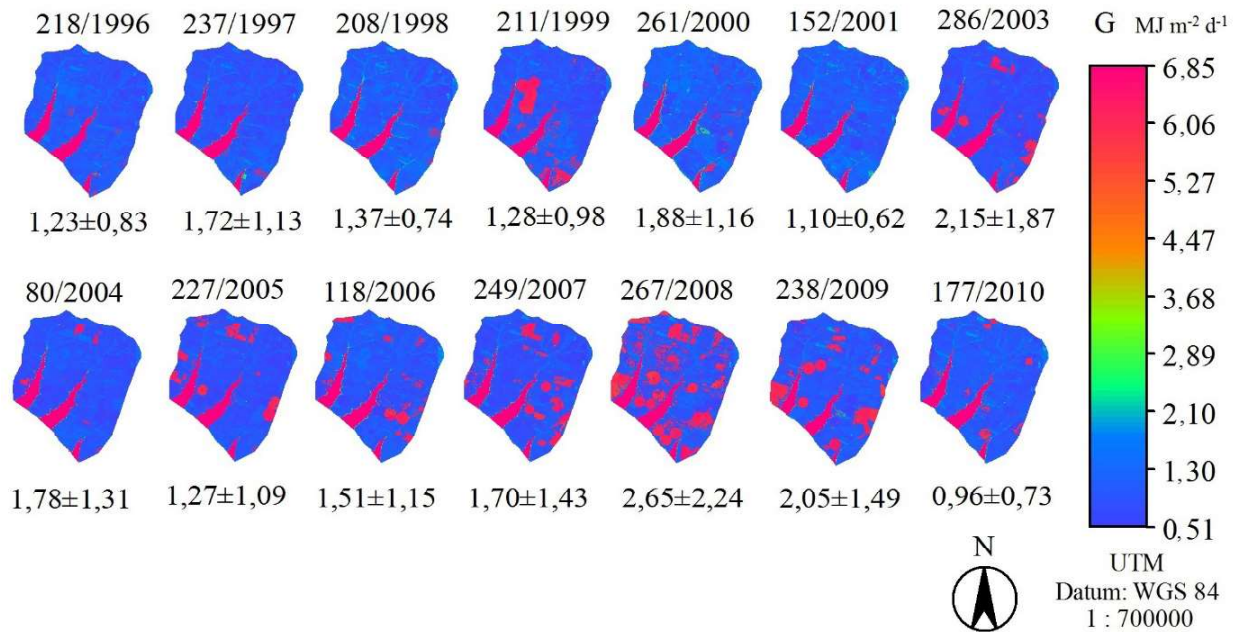


Fig. 12 - Distribuição espacial e temporal de H para Ano e DJ com valores médios e DP.

O maior valor médio de fluxo de calor na superfície (G) ocorreu no ano de 2008 (DJ: 249), de $2,65 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (DP: $\pm 2,24 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), o qual pode ser explicado pelos valores elevados de α_0 que influenciaram nos valores de G (Fig. 12). Nesta data, as classes de uso irrigação por pivô, fragmento de mata, pastagem e cana de açúcar apresentaram os seguintes valores médios: $2,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (DP: $\pm 2,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), $2,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (DP: $\pm 1,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), $3,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (DP: $\pm 2,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e $3,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (DP: $\pm 2,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), respectivamente.

O menor valor de G ocorreu no DJ 177 (2010) com valor médio de $0,96$ (DP: $0,73$). Teixeira *et al.* (2014) encontrou baixo valor de G no mês de junho (2010) e aumento dos valores nos meses de fevereiro e março.

A vantagem de utilizar o modelo SAFER na modelagem do balanço de energia está na sua metodologia que permite a obtenção do valor de λE antes da determinação dos valores de H e G, conforme a Equação 9. A razão ET/ET_0 é relacionada aos parâmetros biofísicos de α_0 , T_0 e $NDVI$ obtidos por sensoriamento remoto e que envolvem os seguintes fatores ambientais: solo-água-vegetação e atmosfera. Desta maneira, o modelo permite a junção de informações agrometeorológicas e espectrais para a estimativa da evapotranspiração em larga escala de modo eficaz e menos complexo que o modelo *SEBAL*.

A complexidade do modelo *SEBAL* está no processo iterativo que determina os valores de H e a utilização dos pixels âncoras para a obtenção da variação da temperatura e da resistência aerodinâmica ao transporte de calor em todos os pixels de uma área. Sendo estimado com base na velocidade do vento e temperatura da superfície que utiliza uma calibração interna da diferença da temperatura próxima à superfície entre os dois níveis da superfície, conforme Bastiaanssen *et al.* (1998). Esta etapa da metodologia é complexa e utiliza uma solução denominada de Calibração Interna que necessitam de conhecimentos específicos de radiação e identificação de condição hidrológica extrema.

4. CONCLUSÕES

A utilização de sensoriamento remoto associado a dados de estações agrometeorológicas e a aplicação do algoritmo *SAFER* permitiram a determinação da ET em diferentes condições hidrológicas e a análise do balanço de energia e água, visto que os resultados obtidos estão coerentes com outros valores reportados pela literatura.

Confere-se que os valores de $NDVI$ são influenciados pelas condições termo-hidrológicas.

Os valores de albedo nos diferentes tipos de usos do solo apresentam baixa variação espacial.

O saldo de radiação é mais dependente da radiação global incidente e menos influenciado pelas condições de uso e ocupação do solo.

Os valores médios de λE diários apresentaram um incremento de 153,2% ao longo do período avaliado, sendo as áreas irrigadas responsáveis por esse aumento nos valores de fluxo de calor latente na área de estudo.

A taxa de H/R_n foi superior em relação a $\lambda E/R_n$ devido as condições de deficiência hídrica nos meses avaliados no estudo.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem a FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro para a instalação da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKBARI, M., TOOMANIAN, N., DROOGERS, P., BASTIAANSEN, W.G.M., GIESKE, A. Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran, using NOAA satellite imagery. **Agricultural Water Management**, v. 88, p. 99-109, 2007.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56.

ANDRADE, R. G.; SEDIYAMA, G. C.; PAZ, A.R.; LIMA, E. P.; FACCO, A. G. Geotecnologias aplicadas à avaliação de parâmetros biofísicos do Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.9, p.1227-1234, 2012.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO, JR J.; MARIN, F.; PELLEGRINO, G. Mudanças climáticas e a produção de grãos no Brasil: Avaliação dos possíveis impactos. **Plenarium**, v.5, p.96-117, 2008.

BASTIAANSEN, W.G.M.; PELGRUM, H.; SOPPE, R.W.O.; ALLEN, R. G.; THORESON, B.P.; TEIXEIRA, A.H. C. Thermal infrared technology for local and regional scale irrigation analysis in horticultural systems. **ISHS Acta Horticulturae**, v. 792, Proc. Vth IS on Irrigation of Horticultural Crops, 2008.

BASTIAANSEN, W. G. M., MENENTI, M., FEDDES, R. A., ROERINK, G. J.; HOLTSLAG,

A. A. M. "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation," **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p.198-212, 1998.

BATRA, N., ISLAM, S., VENTURINI, V., BISHT, G., JIANG, L. Estimation and comparison of evapotranspiration from MODIS and AVHRR sensors for clear sky days over the Southern Great Plains. **Remote Sensing of the Environment**, v. 103, p. 1-15, 2006.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.23, n. 3, p. 305-317, 2008.

BOEGH, E., THORSEN, M., BUTTS, M.B., HANSENA, S., CHRISTIANSEN, J.S., ABRAHAMSEN, P., HASAGER, C.B., JENSEN, N.O., VAN DER KEUR, P., REFSGAARD, J.C., SCHELDE, K., SOEGAARD, H., THOMSEN, A. Incorporating remote sensing data in physically based distributed agro-hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, v. 287, p. 279-299, 2004.

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

BRUNSELL, N.A., GILLIES, R.R. Scale issues in land-atmosphere interactions: implications for remote sensing of the surface energy balance. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 117, p. 203-221, 2003.

CARDOZO, F. S.; SHIMABUKURO, Y. E.; PEREIRA, G.; SILVA, F. B. Using Remote Sensing Products for Environmental Analysis in South America. **Remote Sensing**, v.10, p.2110-2127, 2011.

CHANDER, G., & MARKHAM, B. L. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures, and post-calibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 41, 2674-2677, 2003.

CLEUGH, H.A., LEUNING, R., MU, Q., RUNNING, S.W. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data.

- Remote Sensing of Environment**, v. 106, p. 285-304, 2007.
- DE BRUIN, H. A. R.; STRICKER, J. N. M. Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions. **Hydrological Sciences**, v. 45, p. 391–406, 2000.
- ER-RAKI, S., CHEHBOUNI, A., GUEMOURIA, N., DUCHEMIN, B., EZZAHAR, J., HADRIA, R. Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. **Agricultural Water Management**, v. 87, p. 41 - 54, 2007.
- FRANCO, R. A. M.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C. Aplicação do algoritmo SAFER na determinação da evapotranspiração em condições de sazonalidade climática no noroeste paulista. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 17, 2015, João Pessoa-PB. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p.3189-3196.
- FRANCO, R. A. M.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C.; FEITOSA, D. G. Avaliação do balanço de energia em diferentes tipos de uso e cobertura da terra na região noroeste do Estado de São Paulo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p.6909-6916.
- GIONGO, P. R.; CARLOS A. VETTORAZZI, C. A. Albedo da superfície por meio de imagens TM-Landsat 5 e modelo numérico do terreno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.8, p.833-838, 2014.
- GOMES, H. B. **Balances de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no Estado de São Paulo mediante imagens orbitais**. 2009. 108p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- HEMAKUMARA, H. M., CHANDRAPALA, L.; MOENE, A.F. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer. **Agricultural Water Management**, v. 58, p. 109-122, 2003.
- HERNANDEZ, F. B. T.; NEALE, C. M. U.; TAGHVAEIAN, S.; TEIXEIRA, A. H. C. Avaliação preliminar do modelo SEBAL para a estimativa da distribuição espacial da evapotranspiração em áreas irrigadas no noroeste paulista. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011, Curitiba-PR. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p.5209-5216.
- JIA, L., SU, Z., DEN HURK, B.; MENENTI, M., MOENE, A., DE BRUIN, H. A. R., YRIASSY, J. J. B. Y., IBANEZ, M., CUESTA, A. Estimation of sensible heat flux using Surface Energy Balance System (SEBS) and ATSR measurements. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 28, p. 75-88, 2003.
- KIMURA, R., BAI, L., FAN, J., TAKAYAMA, N., HINOKIDANI, O. Evapotranspiration estimation over the river basin of the Loess Plateau of China base don remote sensing. **Journal of Arid Environments**, v. 68, p. 53-65, 2007.
- KUSTAS, W.P.; ANDERSON, M.C., FRENCH, A.N., VICKERS, D. Using a remote sensing field experiment to investigate flux-footprint relations and flux sampling distributions for tower and aircraft-based observations. **Advances in Water Resources**, v. 29, p. 355-368, 2006.
- LEUNING, R., CLEUGH, H.A., ZEGELIN, S.J., HUGHES, D. Carbon and water fluxes over a temperate Eucalyptus forest and a tropical wet/dry savannah in Australia: measurements and comparison with MODIS remote sensing estimates. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 129, p. 151-173, 2005.
- LI, S. G.; EUGSTER, W.; ASANUMA, J.; KOTANI, A.; DAVAA, G.; OYUNBAATAR, D.; SUGITA, M. Energy partitioning and its biophysical controls above a grazing steppe in central Mongolia. **Agriculture Forest Meteorology**. v. 137, p. 89–106, 2006.
- LIU, J., CHEN, J.M., CIHLAR, J. Mapping evapotranspiration based on remote sensing: An application to Canada's landmass. **Water Resources Research**, v. 39, n. 7, p. 1189, 2003.
- LOBELL, D.B.; ASNER, G.P. Moisture effects on soil reflectance. **Soil Science Society of America journal**, v. 66, p. 722–727, 2002.
- MARENCO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v.63, p.83-96, 2008.

- NAGLER, P.L., JETTON, A., FLEMING, J., DIDAN, K., GLENN, E., ERKER, J., MORINO, K., MILLIKEN, J., GLOSS, S. Evapotranspiration in a cottonwood (*Populus fremontii*) restoration plantation estimated by sap flow and remote sensing methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 144, p. 95- 110, 2007.
- NAGLER, P.L., SCOTT, R.L., WESTENBURG, C., CLEVERLY, J.R., GLENN, E.P., HUETE, A.R. Evapotranspiration on western U. S. rivers estimated using the Enhanced Vegetation Index from MODIS and data from eddy covariance and Bowen ratio flux towers. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, p. 337 - 351, 2005.
- OLIVEIRA, G; MORAES, E. C.; RUDORFF, B.F.T. Balanço de radiação em áreas de expansão da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo com uso de dados orbitais MODIS/AQUA. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, p. 419-431, 2014.
- QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.;
- ROERINK, G.J., SU, Z., MENENTI, M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 25, p. 147-157, 2000.
- SILVA, B. B.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, v. 14, n. 2, p. 174-186, 2006.
- SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v.20, n.2, p. 243-252, 2005a.
- SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. 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.
- TASUMI, M., ALLEN, R.G. Satellite-based ET mapping to assess variation in ET with timing of crop development. **Agricultural Water Management**, v. 88, p. 54 - 62, 2007.
- TATSCH, J. D. **Uma análise dos fluxos de superfície e do microclima sobre Cerrado, Cana-de-açúcar e Eucalipto, com implicações para mudanças climáticas regionais**. 2006, 132p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing an Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**. v.2, p.1287-1319, 2010.
- TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J.F.; ANDRADE, R. G.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R.A.M. Modelling radiation and energy balances with Landsat 8 images under different thermohydrological conditions in the Brazilian semi-arid region. In: *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVII*, Neale, C. M. U.; Maltese, A. (ed.). **SPIE Proceedings..** Toulouse, France: SPIE, v. 9637, 2015.p.1-9. doi:10.1117/12.2195044.
- TEIXEIRA, A. H.C.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J.F.; BOLFE, E. L. Energy balance with Landsat images in irrigated central pivots. In: *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVI*, (ed.) Neale, C. M. U.; Maltese, A. **SPIE Proceedings..**, Amsterdam, Netherlands. ,Vol. 9239, 2014a.
- TEIXEIRA, A.H. de C.; HERNANDEZ, F.B.T.; LOPES, H.L.; SCHERER-WARREN, M.; BASSOI, L.H. A Comparative Study of Techniques for Modeling the Spatiotemporal Distribution of Heat and Moisture Fluxes in Different Agroecosystems in Brazil. In: GEORGE G. PETROPOULOS. (Org.). **Remote Sensing of Energy Fluxes and Soil Moisture Content**. 1ed. Boca Raton, Florida: CRC Group, Taylor and Francis, 2014b, p. 169-191.
- TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SCHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. **Modelagem espaçotemporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013a. 32p.
- TEIXEIRA, A. H.C.; WARREN-SCHERER, M.; LOPES, H. L.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; NEALEE, C. M. U.

- Application of MODIS images for modelling the energy balance components in the semi-arid conditions of Brazil. In: Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XV, (ed.) Neale, C. M. U.; Maltese, A. **SPIE Proceedings...**, Dresden, Germany: SPIE, Sep, Vol. 8887, 2013b.
- TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L. Application of Landsat images for quantifying the energy balance under conditions of land use changes in the semi-arid region of Brazil. In: Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIV, (ed.) Neale, C. M. U.; Maltese, A. **SPIE Proceedings...** Edinburgh, United Kingdom: SPIE, v.8531, 2012a. p.1-9.
- TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; 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, 2009a.
- TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part B: Application to the large scale. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p.477-490, 2009b.
- TEIXEIRA, A. H.C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; MOURA, M. S. B.; SOARES, J. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees, Northeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, p.1524-1537, 2008.
- UNESP - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Departamento de Fitossanidade e Engenharia Rural e Solos. Área de Hidráulica e Irrigação - AHI. **Acesso à base diária:** Ilha Solteira. <<http://clima.feis.unesp.br>>. 15 Jun. 2013.
- VAN DIJK, A.I.J.M.; BRUIJNZEEL, L.A.; SCHELLEKENS, J. Micrometeorology and water use of mixed crops in upland West Java, Indonesia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, p. 31-49, 2004.
- ZHOU, C.; SHI, R.; ZHANG, C.; LIU, C; GAO, W. Spatio-temporal distribution of NDVI and its correlation with climatic factors in eastern China during 1998-2008. In: Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability XI, (ed.) Gao, W.; Chang, N. B.; Wang, J. **SPIE Proceedings...**, San Diego, California, United States, vol. 9221. doi:10.1117/12.2060768.