

ORGANIZADOR:
Bernardo Barbosa da Silva

**APLICAÇÕES AMBIENTAIS BRASILEIRAS
COM GEOPROCESSAMENTO E
SENSORIAMENTO REMOTO**

CAMPINA GRANDE – PB
Novembro de 2013

Capítulo 3

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DIÁRIA EM SUB-BACIAS DO PARACATU UTILIZANDO PRODUTOS DO SENSOR MODIS

Evaldo de Paiva Lima

1. INTRODUÇÃO

A estimativa da evapotranspiração é essencial em sistemas de irrigação, perdas de água em reservatórios, cálculo do balanço hídrico, modelagens hidrológicas e climáticas. O manejo da água de irrigação é importante em locais onde a produção agrícola irrigada representa grande percentagem da economia regional e, principalmente, onde também se verifica conflitos pelo uso da água. A estimativa mais acurada da demanda de água pelas culturas e da programação dos intervalos de irrigação e a melhora da aplicação dos métodos de estimativa do consumo de água pelas culturas promovem maior eficiência no uso dos recursos hídricos (Medina et al., 1998).

O sensoriamento remoto aplicado à agricultura oferece vantagens, como a obtenção de informações que possibilitam a geração de séries temporais da região em estudo. Também proporciona ampla cobertura espacial, que favorece a análise de uma região por inteiro. Essas informações geralmente revelam aspectos importantes para o planejamento agrícola das áreas irrigadas. Assim, este capítulo tem o objetivo de determinar a evapotranspiração real diária, com a utilização de produtos do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*) a bordo do satélite Terra, nas sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Para Bastiaanssen (2000), a agricultura irrigada é o maior consumidor hídrico em bacias hidrográficas. Os impactos dessa atividade também poderiam ser avaliados por meio de modelos hidrológicos, inclusive os que propõem interação com a atmosfera, uma vez que procuram explicar os processos do ciclo hidrológico, mas, em geral, esses modelos requerem alto número de medições de campo para que suas calibrações sejam realizadas de maneira satisfatória (Hemakumara et al., 2003).

Em razão disso, o uso dos dados de sensoriamento remoto tem-se tornado ferramenta potencial para a determinação de fluxos de superfície e da evapotranspiração. Além das dificuldades de obtenção da evapotranspiração que, na maioria das vezes, está relacionada à escassez de dados necessários para a implementação de alguns dos métodos, outro fator importante a ser considerado é a distribuição espacial da evapotranspiração.

Os métodos de estimativa da evapotranspiração, em geral, permitem a sua obtenção em escala local. No entanto, regiões marcadas por heterogeneidade da superfície, como tipo de solo e vegetação, apresentam taxas de evapotranspiração bastante diferentes, que podem não ser percebidas nas formas tradicionais de estimativas. Diferentemente disso, o sensoriamento remoto permite à estimativa da evapotranspiração em grandes áreas como função das características biofísicas encontradas em cada pixel. Outra grande vantagem do emprego de imagens de satélites na estimativa da evapotranspiração, em escala regional, reside no fato de que a água utilizada no processo de evapotranspiração pode ser obtida diretamente sem a necessidade de quantificar outros parâmetros hidrológicos, como a umidade do solo.

A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto permite a determinação espacial da evapotranspiração, ou seja, a energia necessária para esse processo pode ser obtida como um termo residual do balanço de energia à superfície. O balanço de energia descreve as interações físicas entre a superfície e a atmosfera. Resolver a equação do balanço de energia envolve a subdivisão da energia líquida disponível em fluxos utilizados em diferentes processos na superfície terrestre, como fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível e fluxo de calor no solo (Timmermans & Meijerink, 1999).

Nesse contexto, o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) é um algoritmo que possibilita a estimativa dos fluxos de energia que ocorrem na interface solo-vegetação-atmosfera com os dados obtidos por meio de sensoriamento remoto. O SEBAL estima o fluxo de calor latente como resíduo da equação clássica do balanço de energia. No entanto, o saldo de radiação, o fluxo de calor no solo e o fluxo de calor sensível precisam ser estimados.

Segundo Latuf (2007), as bacias hidrográficas do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto, afluentes do rio Paracatu, drenam uma área de aproximadamente 14.149km², dos quais 74,87% (10.621km²) encontram-se no Estado de Minas Gerais, 15,71% (2.212km²) no Estado de Goiás e 9,42% (1.316km²) no Distrito Federal. Rodriguez (2004) cita que, como consequência da grande expansão da agricultura irrigada, sérios conflitos tem surgido em várias partes da bacia do rio Paracatu, principalmente nas sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto.

Dessa forma, estudos que busquem avaliar os padrões de distribuição espacial, quer seja do balanço de energia à superfície ou da evapotranspiração, favoreceriam o conhecimento adequado da dinâmica espacial e temporal, dessas variáveis e de suas inter-relações, para uma melhoria tanto nas modelagens de enfoque hidrológico como atmosférico. Essas melhorias viabilizariam medidas mais eficazes de tomada de decisões em gestão hídrica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A bacia do rio Paracatu é uma importante sub-bacia do rio São Francisco. Localizada no Médio São Francisco drena uma área de aproximadamente 45.600 km², que representa cerca de 7% da área de drenagem da bacia do São Francisco (Brasil, 1996).

As sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto, localizadas na região do Alto Paracatu, abrangem parte do Distrito Federal e dos Estados de Goiás e Minas Gerais (Figura 1). Segundo Latuf (2007), as sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto drenam uma área de aproximadamente 14.149 km², dos quais 74,87% (10.621 km²) encontram-se no Estado de Minas Gerais, 15,71% (2.212 km²) no Estado de Goiás e 9,42% (1.316 km²) no Distrito Federal.

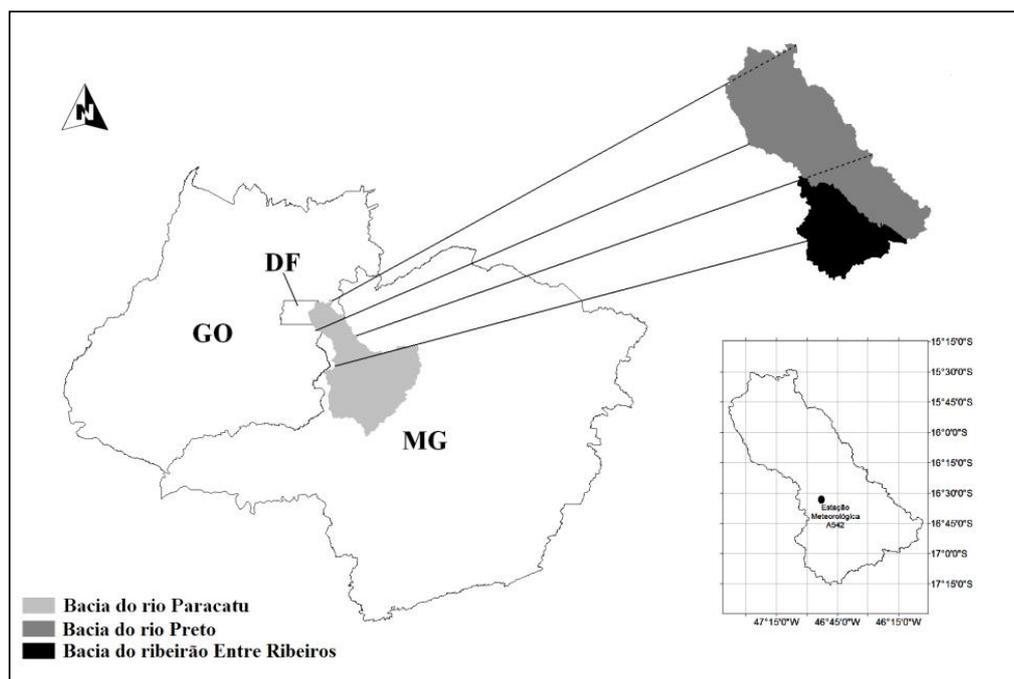


Figura 1. Localização da área de estudo. No primeiro plano, em cinza "claro", localiza-se a bacia do Paracatu e no segundo, as sub-bacias em estudo.

O clima da bacia do Paracatu é predominantemente tropical chuvoso, havendo concentrações das chuvas no período de outubro a abril, com destaque

para o trimestre novembro, dezembro e janeiro como o mais chuvoso. A precipitação média anual na bacia é de 1.338 mm, enquanto a evapotranspiração média anual é de 1.140 mm (Brasil, 1996).

Os principais usos dos recursos hídricos nas sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto são para o atendimento das demandas de abastecimento urbano, animal e irrigação. A maior parte das áreas irrigadas na bacia do Paracatu está concentrada nas cabeceiras até a metade do seu sistema de drenagem, sobretudo no ribeirão Entre Ribeiros e no rio Preto, concentrando 53% da área irrigada identificada na bacia pelo Plano-Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Paracatu – PLANPAR (Brasil, 1996).

Na bacia do rio Preto, o uso do solo é caracterizado pela pecuária intensiva e a agricultura mecanizada de alta tecnologia, especialmente da utilização intensiva de pivôs centrais no processo de irrigação. Borges (2008), utilizando imagens do sensor LANDSAT/ETM+ do ano de 2003, identificou 226 pivôs na bacia do rio Preto. Destes, 87 estavam localizados no Distrito Federal, 81 em Minas Gerais e 58 em Goiás. Este autor ainda cita que as principais atividades desenvolvidas na bacia são as produções de leite e de grãos, com destaques para as culturas do milho, soja, feijão, sorgo, trigo e hortaliças em geral.

Aquisição e processamento dos dados

Os produtos do sensor MODIS: MOD09GA (refletância espectral de superfície, bandas 1 a 7), MOD11A1 (temperatura da superfície, bandas 31 e 32) e MOD07 (ângulo zenital) dos dias 14 de julho, 13 de agosto, 16 de setembro e 16 de outubro de 2007 foram obtidos no formato HDF (*Hierarchical Data Format*) e convertidos para o formato GeoTIFF com a utilização do programa MRT (*MODIS Reprojection Tool*).

Os dados de velocidade do vento e radiação de onda curta incidente, dos dias relacionados no estudo, foram utilizados da estação meteorológica automática (A542) localizada no Município de Unaí, MG. A estação meteorológica possui as seguintes coordenadas geográficas: latitude 16° 33' 14" Sul, longitude 46° 52' 55" Oeste e 631 m de altitude, conforme localização apresentada na Figura 1, e pertence a rede de estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As informações desta estação serviram como dados de entrada no SEBAL para estimar a evapotranspiração real diária.

Todas as etapas envolvidas no processo de estimativa dos componentes do balanço de energia, e conseqüentemente, na determinação da evapotranspiração real diária para a área das sub-bacias em estudo foram desenvolvidas com o auxílio da ferramenta *Model Maker* do programa *Erdas 9.1*. Para descrição completa dos procedimentos adotados, consultar o trabalho de Lima (2010). O saldo de radiação instantâneo ($R_{n\text{inst}}$) foi a primeira componente

do balanço de energia a ser obtida. Para tanto, aplicou-se a equação sugerida por Allen et al. (2002):

$$Rn_{inst.} = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o) R_{L\downarrow} \quad (1)$$

em que, $R_{s\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente ($W.m^{-2}$), α é o albedo da superfície (adimensional), $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera ($W.m^{-2}$), $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida pela superfície ($W.m^{-2}$) e, ε_o é a emissividade da superfície (adimensional).

Após a estimativa do $Rn_{inst.}$ realizou-se, com a aplicação da equação empírica sugerida por Bastiaanssen (2000), a determinação do fluxo instantâneo de calor no solo (G).

$$G = \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2)(1 - 0,98 NDVI^4) \right] Rn_{inst.} \quad (2)$$

em que, T_s é a temperatura da superfície ($^{\circ}C$) relativa ao produto MOD11A1 e NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada. Para efeito de correção dos valores do fluxo de calor no solo para corpos d'água ($NDVI < 0$), considerou-se $G = 0,3Rn$ (Silva & Bezerra, 2006).

Na sequência, obteve-se o fluxo instantâneo de calor sensível (H). Esta componente do balanço de energia expressa à taxa de calor transferido da superfície para o ar pelos processos de convecção e condução. Este fluxo foi calculado utilizando a velocidade do vento (u), a resistência aerodinâmica da superfície (r_{ah}) e a diferença da temperatura do ar (dT) entre dois níveis acima da superfície, ou seja, nas alturas de 2,0 m e 0,1 m. A Figura 2 apresenta o fluxograma das etapas utilizadas na estimativa do fluxo de calor sensível.

No SEBAL, procedeu-se com o cálculo de dT para cada pixel por meio de uma relação linear entre dT e T_s . Esta relação é dada pelos coeficientes a e b que são obtidos pelos pixels denominados "âncoras", também chamados de "quente" e "frio". No pixel "frio" a temperatura da superfície e a do ar próxima à superfície foi considerada igual. Nesse caso, assumiu-se que o fluxo de calor sensível é igual a zero, e então, determinou-se o fluxo de calor latente máximo. Entretanto, no pixel "quente" assumiu-se igual a zero o fluxo de calor latente, e então, obteve-se o fluxo de calor sensível máximo. Os pixels "quente" e "frio" foram selecionados ao consultar simultaneamente os mapas temáticos do NDVI e da temperatura da superfície (T_s). Dessa forma, o pixel "frio" foi escolhido numa situação em que o valor do NDVI era negativo, geralmente sobre corpos d'água, e possuía um baixo valor da T_s . Entretanto, o pixel "quente" foi selecionado para a condição em que a T_s era elevada e o NDVI entre 0,1 e 0,2, que representa uma área não irrigada e considerada seca.

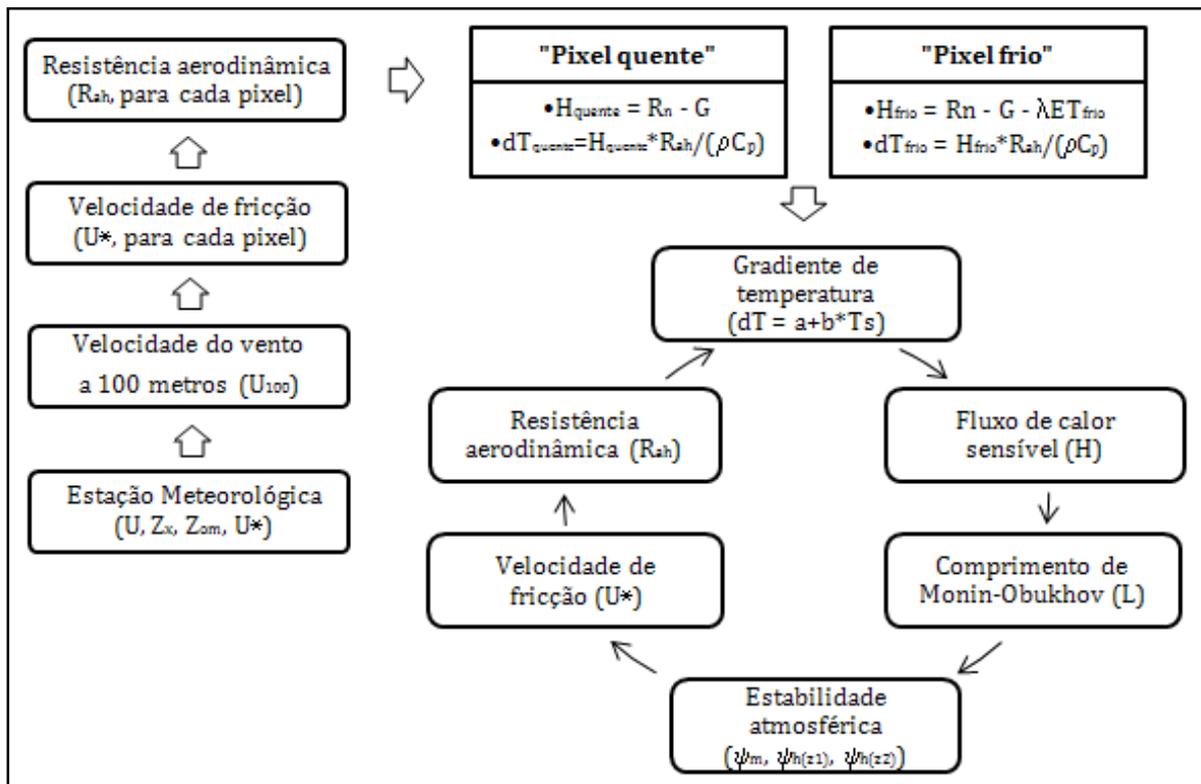


Figura 2. Fluxograma para a estimativa do fluxo instantâneo de calor sensível.

O fluxo instantâneo de calor latente (λET), em $W.m^{-2}$, foi calculado, como resíduo da equação do balanço de energia, pela simples diferença entre os mapas temáticos do saldo de radiação, fluxo de calor no solo e fluxo de calor sensível.

$$\lambda ET = Rn_{inst.} - G - H \quad (3)$$

Posteriormente, foi possível calcular a fração evaporativa por meio da expressão sugerida por Bastiaanssen et al. (1998):

$$FE = \frac{\lambda ET}{\lambda ET + H} = \frac{\lambda ET}{Rn_{inst.} - G} \quad (4)$$

Estudos micrometeorológicos indicam que esse termo pode ser considerado constante durante o período diurno (Ayenew, 2003). Dessa forma, estima-se a evapotranspiração por meio da seguinte expressão:

$$ETr_{diária} = \frac{86400 FE Rn_{24h}}{\lambda} \quad (5)$$

em que, $ETr_{diária}$ é a evapotranspiração real diária ($mm.d^{-1}$), FE é a fração evaporativa (adimensional), Rn_{24h} é o saldo de radiação médio ocorrido em um

período de 24 horas ($W.m^{-2}.d^{-1}$) e, λ é o calor latente de vaporização da água ($MJ.kg^{-1}$).

Comparação entre a evapotranspiração obtida pelo SEBAL e a no campo

Para efetuar a comparação da evapotranspiração, obtida por meio do SEBAL (E_{Tr}), e a evapotranspiração da cultura (E_{Tc}), ao nível diário, foram utilizadas informações da E_{Tc} para o feijão fornecidos pela IRRIGER, que é uma empresa de base tecnológica com prestação de serviço na área de gerenciamento da irrigação. A E_{Tc} foi determinada com base no coeficiente de cultura (K_c), relativo à fase de desenvolvimento da cultura, o método de Penman-Monteith FAO (1998) e coeficiente de estresse hídrico (K_s).

Utilizaram-se as informações da evapotranspiração da cultura de um dos pivôs centrais da Fazenda Decisão, localizada no Município de Unaí, MG, que faz a utilização intensiva de pivôs centrais no processo de irrigação de várias culturas. Essa fazenda encontra-se a Oeste da sede do Município em questão e está localizada próxima a área das sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto.

O pivô utilizado possuía uma área de 120,22 ha e as coordenadas geográficas do ponto central era: latitude $16^{\circ} 27' 31,7''$ Sul, longitude $47^{\circ} 18' 4,7''$ Oeste e 979 m de altitude. Nesse pivô, plantou-se a cultivar de feijão Pérola, que é proveniente de trabalho de seleção de linhas puras da cultivar Aporé – realizado pela Embrapa Arroz e Feijão –, em duas datas distintas. Na primeira metade do pivô, o feijão foi plantado no dia 8 de maio de 2007 e na segunda, no dia 12 de maio de 2007. Os ciclos finalizaram nos dias 18 e 24 de agosto, respectivamente, e apresentaram produtividade de 52 sacas/hectare.

Para realizar a comparação, utilizaram-se datas em que se tinham disponíveis produtos do sensor MODIS, ou seja, 10, 14 e 23 de julho, e 6 e 13 de agosto de 2007. A cultura encontrava-se na Fase III nos dias 10/07, 14/07, 23/07 e 6/08 e na Fase IV no dia 13/08. Dessa forma, os valores da evapotranspiração, obtidos por meio do SEBAL, do *pixel* referente à coordenada do ponto central do pivô, bem como dos oito *pixels* adjacentes serviram para verificar, conforme proposta de Oliveira (2012), o comportamento dos erros relativo e absoluto de cada *pixel* em comparação a evapotranspiração da cultura do feijão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O saldo de radiação instantâneo ($Rn_{inst.}$) estimado por meio do SEBAL, com o uso de produtos do sensor MODIS, é apresentado na Figura 3 para as áreas das sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto. A variação espacial do saldo de radiação observada nos mapas temáticos é devida as diferentes superfícies (cerrado, pastagem, áreas irrigadas com variados tipos de culturas, cursos d'água, etc.) presente nas sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto, pois o albedo da superfície – modelador do balanço de ondas curtas – varia conforme as características físico-químicas das superfícies e com o ângulo zenital.

Em nenhum dos mapas temáticos visualizou-se nitidamente a hidrografia dessas sub-bacias. Isto é por causa da resolução espacial de cada *pixel* (500m×500m) que compõe os mapas, sendo muitas vezes a informação do *pixel* a combinação de diferentes superfícies que compõe a área do *pixel* em questão. Devido à resolução espacial do sensor MODIS, um elemento de cena, correspondente a um *pixel* da imagem, pode incluir mais de um tipo de cobertura do terreno. Quando um sensor observa a cena, a radiância detectada é a integração, denominada mistura, de todos os objetos contidos no elemento de cena (Aguiar et al., 1999).

Apesar da hidrografia das sub-bacias não ser completamente visualizada nos mapas temáticos, observou-se que os valores do saldo de radiação instantâneo eram mais elevados sobre superfícies líquidas, neste caso representada pelos rios, do que os valores observados nos demais tipos de superfícies. Para ilustrar essa afirmação, observa-se parte da hidrografia do rio Preto, áreas circulares na cor preta (Figuras 3a e 3b), com elevados valores do Rn . Segundo Lima et al. (2009), a tendência de maiores valores do Rn sobre superfícies líquidas e menores sobre os demais tipos de superfícies pode ser explicada pelo efeito combinado do albedo e da temperatura da superfície, pois o primeiro termo influencia o balanço de ondas curtas e o segundo o balanço de ondas longas.

Comparando-se os mapas da Figura 3 verifica-se o aumento do saldo de radiação instantâneo, especialmente quando se observa a Fig. 3d, com a presença de muitas áreas com valores acima de 651 W.m^{-2} , e a Fig. 3a. Essa tendência pode ser explicada pela sazonalidade da radiação de onda curta incidente, que varia em função da declinação solar. Na maior parte dos mapas temáticos o Rn variou entre 451 e 650 W.m^{-2} (tonalidades de cinza mais claras), porém existiram algumas áreas no Alto rio Preto (Figura 3a) com o saldo de radiação $< 450 \text{ W.m}^{-2}$ (tonalidade branca). O saldo de radiação instantâneo médio variou entre $509,41 \pm 22,24 \text{ W.m}^{-2}$ e $643,33 \pm 33,19 \text{ W.m}^{-2}$, com valor mínimo de $419,13 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 14 de julho e máximo de $797,35 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 16 de outubro de 2007, conforme observa-se na Tabela 1.

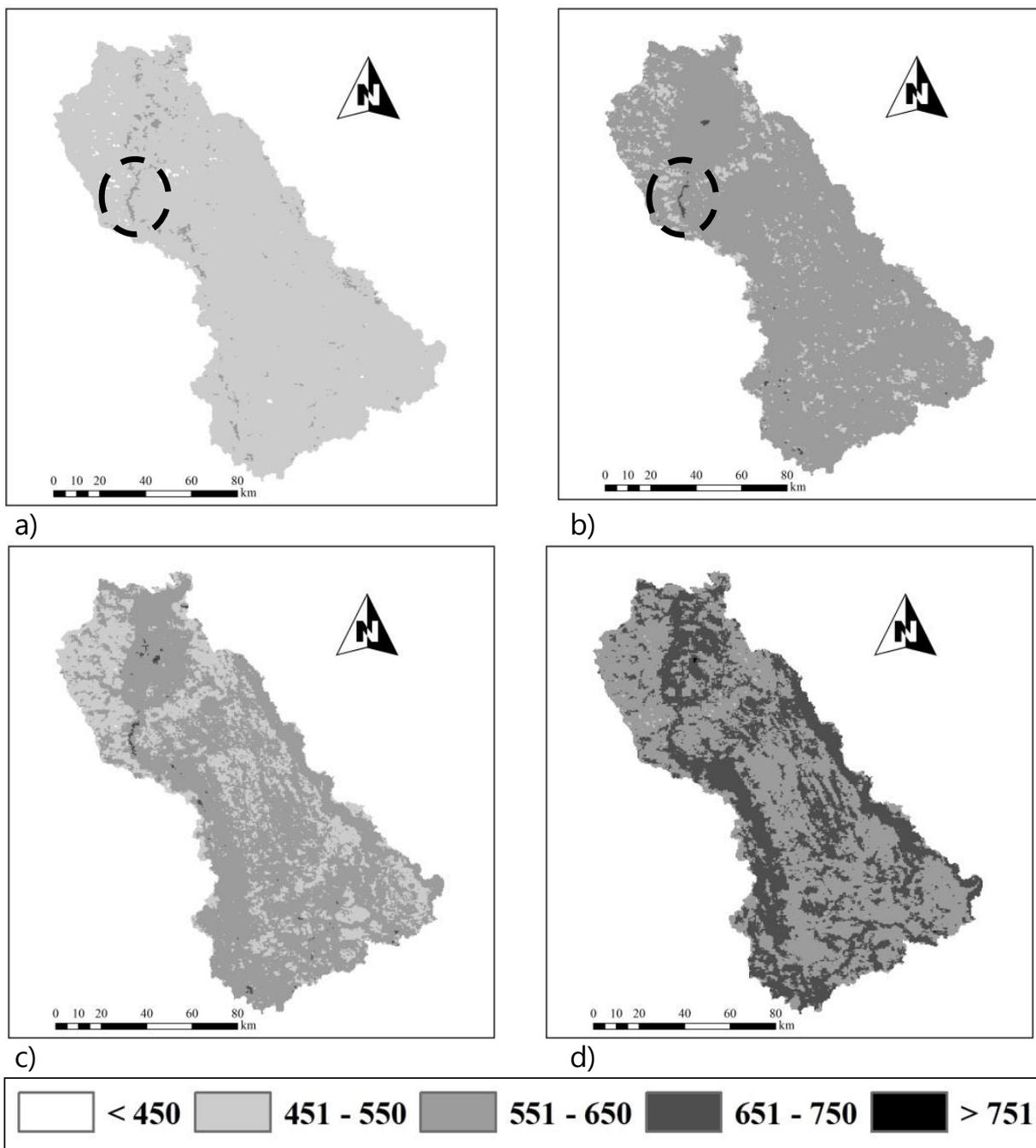


Figura 3. Saldo de radiação instantâneo (W.m^{-2}) para os dias 14 de julho (a), 13 de agosto (b), 16 de setembro (c) e 16 de outubro (d) do ano de 2007.

Mendonça (2007) estimou o R_n instantâneo para a região Norte Fluminense, Estado do Rio de Janeiro, utilizando imagens do sensor MODIS, e encontrou valores entre 411,76 e 646,64 W.m^{-2} , com média de 527,87 W.m^{-2} no dia 29 de agosto de 2005; 499,06 e 873,28 W.m^{-2} , com média de 683,58 W.m^{-2} em 16 de novembro de 2005; 482,40 e 818,32 W.m^{-2} , com média de 661,31 W.m^{-2}

no dia 05 de fevereiro de 2006; e entre 270,04 e 438,72 $W.m^{-2}$, com média de 339,82 $W.m^{-2}$ em 15 de junho de 2006. Embora os dois locais estejam em latitudes diferentes, o Rn mínimo de 419,13 $W.m^{-2}$, encontrado nesse trabalho, foi compatível com o de Mendonça (2007) no dia 29 de agosto de 2005; e o Rn máximo de 797,35 $W.m^{-2}$, encontrado para as sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto, foi compatível com o de Mendonça (2007) no dia 05 de fevereiro de 2006.

Tabela 1. Valores mínimos, médios, máximos e desvio padrão (DP) instantâneos do saldo de radiação ($Rn_{inst.}$), fluxo de calor no solo (G), fluxo de calor sensível (H), e, da evapotranspiração real diária ($ET_{diária}$) observadas nos mapas temáticos.

Datas	$Rn_{inst.}$ ($W m^{-2}$)			G ($W m^{-2}$)			H ($W m^{-2}$)			ET_{24h} (mm)		
	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx
14/07	419	509	633	26.8	71	185	-18	62	520	0.	2.9	4.4
13/08	446	582	737	33.6	88	212	-89	154	720	0.	3.0	5.5
16/09	422	566	758	55.6	118	223	-0.8	167	441	0.	3.0	6.1
16/10	502	643	797	66.4	134	222	-1.0	263	694	0.	2.8	6.9
Méd.	447	575	731	45.6	103	211	-27	161	594	0.	2.9	5.8

Ataíde (2006) estimou o Rn instantâneo para o município de Quixeré, no Estado do Ceará, utilizando informações do sensor MODIS, a bordo do satélite Terra, e encontrou valores entre 719 e 848 $W.m^{-2}$ no dia 10 de setembro de 2005; 733 e 864 $W.m^{-2}$ no dia 10 de outubro de 2005; 686 e 817 $W.m^{-2}$ em 14 de outubro de 2005; e entre 661 e 809 $W.m^{-2}$ no dia 25 de outubro de 2005. Verifica-se que o valor do Rn máximo instantâneo de 797,35 $W.m^{-2}$, estimado para as sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto, foi compatível com os encontrados para o Município de Quixeré, CE, nos dias 14 e 25 de outubro de 2005. Porém, o valor do Rn mínimo instantâneo de 419,13 $W.m^{-2}$, encontrado para a região do rio Paracatu, foi menor que os encontrados no Município de Quixeré, CE. Essa diferença pode ser devida ao albedo da superfície, pois alterações neste termo afetam diretamente o saldo de radiação. É válido ressaltar que o α depende do ângulo de incidência dos raios solares e das condições da superfície, como coloração do solo, umidade, tipo de cobertura e fase de desenvolvimento das culturas. Outra questão a ser considerada, para explicar a diferença nos valores mínimos desse estudo e os encontrados por Ataíde (2006), são as diferenças metodológicas na determinação do Rn .

Com a elaboração dos mapas temáticos do albedo da superfície, que podem ser visualizados no trabalho de Lima et al. (2012), juntamente com os mapas de temperatura da superfície, índice de vegetação da diferença normalizada, e saldo de radiação instantâneo foram obtidos os mapas temáticos

do fluxo de calor no solo (Figura 4) para as sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto.

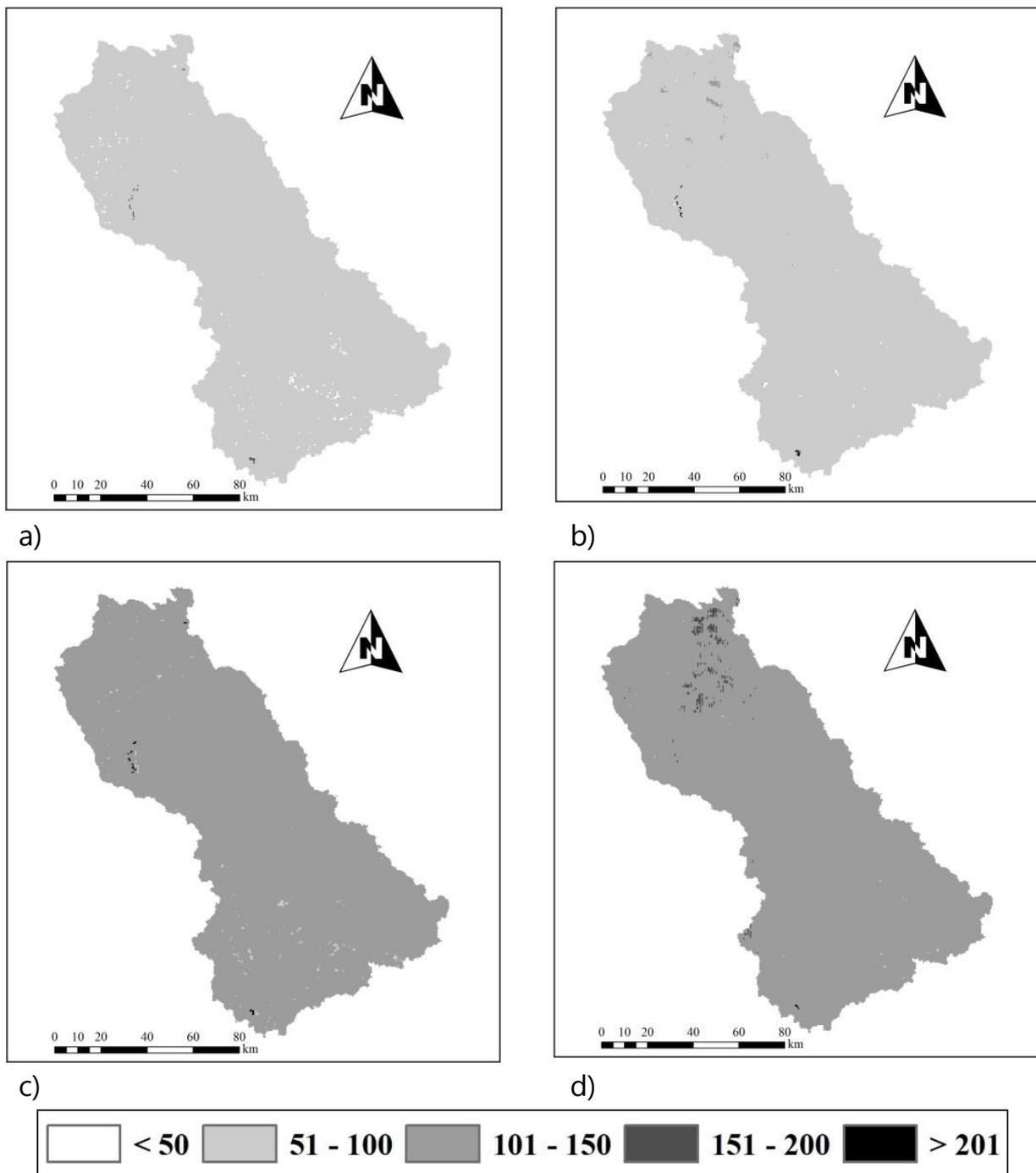


Figura 4. Fluxo de calor no solo ($W.m^{-2}$) para os dias 14 de julho (a), 13 de agosto (b), 16 de setembro (c) e 16 de outubro (d) de 2007.

A variação espacial do fluxo de calor no solo observada em cada um dos mapas temáticos, com exceção de pequenas áreas isoladas, foi bastante homogênea. Verifica-se que nos dois primeiros mapas (Figs. 4a e 4b) a tonalidade predominante foi da classe de valores entre 51 e 100 $W.m^{-2}$. Na Figura

4a observam-se pequenas áreas com as tonalidades branca ($< 50 \text{ W.m}^{-2}$) e cinza "escuro" ($151 \text{ a } 200 \text{ W.m}^{-2}$), ao passo que, no Alto rio Preto (Figuras 4b) existem áreas com tonalidade cinza "intermediário" ($101 \text{ a } 150 \text{ W.m}^{-2}$). Entretanto, nas Figuras 4c e 4d observa-se a predominância dos valores entre $101 \text{ e } 150 \text{ W.m}^{-2}$ de fluxo de calor no solo (tonalidade cinza "intermediário"). O aumento nos valores do G, verificado nas Figs. 4c e 4d, pode estar relacionado a baixos valores do NDVI e/ou presença de água nos pixels.

Apesar dessa relação de dependência entre o fluxo de calor no solo e o saldo de radiação disponível à superfície, não se pode esquecer que o índice de vegetação da diferença normalizada, temperatura e albedo da superfície também foram utilizados na determinação do G. Conforme observa-se na Tabela 1, o fluxo de calor no solo médio variou entre $71,26 \pm 5,91$ e $134,06 \pm 6,57 \text{ W.m}^{-2}$, com valor mínimo de $26,81 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 14 de julho e máximo de $223,34 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 16 de setembro de 2007.

Mendonça (2007) estimou o fluxo de calor no solo instantâneo para a região Norte Fluminense, RJ, utilizando imagens do sensor MODIS, e encontrou valores entre $30,49$ e $86,77 \text{ W.m}^{-2}$, com média de $68,97 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 29 de agosto de 2005; $10,00$ e $126,65 \text{ W.m}^{-2}$, com média de $96,51 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 16 de novembro de 2005; $10,00$ e $121,95 \text{ W.m}^{-2}$, com média de $94,21 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 05 de fevereiro de 2006; e entre $10,00$ e $46,72 \text{ W.m}^{-2}$, com média de $36,99 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 15 de junho de 2006.

Os resultados obtidos por Mendonça (2007) serviram para confrontar os resultados do fluxo de calor no solo encontrados para as duas sub-bacias do rio Paracatu, visto que a estação meteorológica automática (A542) do Município de Unaí, MG, não dispunha de informações do G. Alguns valores mínimos do fluxo de calor no solo obtidos por Mendonça (2007) foram de $10,00 \text{ W.m}^{-2}$. Pela análise desses resultados chega-se a conclusão que esse autor pode ter estabelecido uma condição, no momento do processamento por meio do SEBAL, para que o valor mínimo não fosse inferior a $10,00 \text{ W.m}^{-2}$. Entretanto, os valores máximos do fluxo de calor no solo nas sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto foram superiores aos encontrados por Mendonça (2007). Como exemplo, o valor máximo do G encontrado por Mendonça (2007), no dia 16/11/05, foi de $126,65 \text{ W.m}^{-2}$, enquanto que, o encontrado para as sub-bacias do Paracatu, no dia 16/09/07, foi de $223,34 \text{ W.m}^{-2}$. Vale destacar que, a cobertura do solo, as datas e o horário de imageamento da superfície pelo satélite foram distintos, e isso pode explicar as diferenças observadas nas duas áreas de estudo.

Na Figura 5 apresentam-se os mapas temáticos dos valores instantâneos do fluxo de calor sensível para as sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto. Todos os mapas foram marcados pela grande variabilidade espacial do

fluxo de calor sensível. Na Figura 5a observa-se que grande parte da área de estudo foi dominada pela tonalidade cinza “claro” (0 a 200 $W.m^{-2}$).

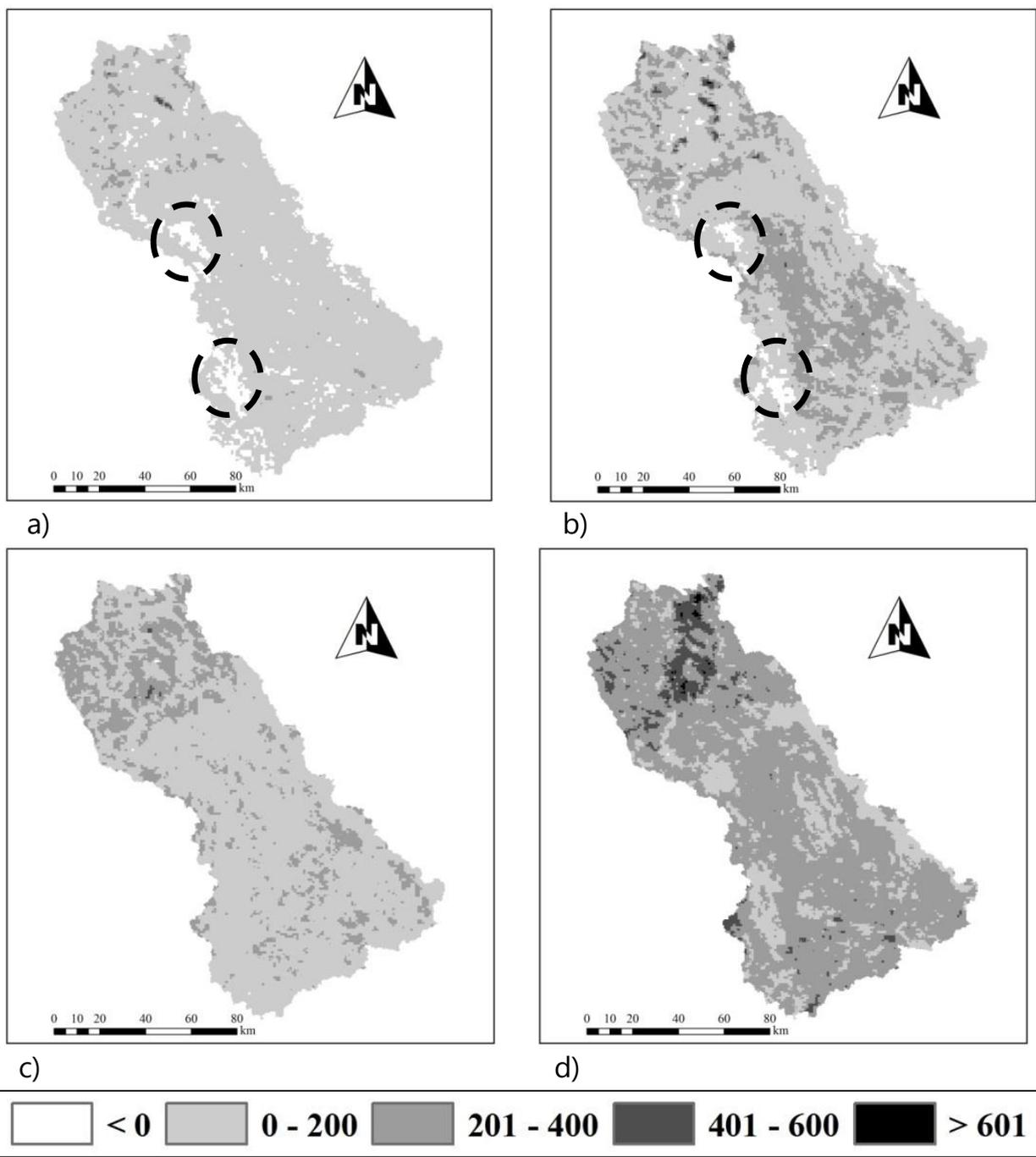


Figura 5. Fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$) para os dias 14 de julho (a), 13 de agosto (b), 16 de setembro (c) e 16 de outubro (d) de 2007.

Nas Figuras 5a e 5b verificam-se áreas na cor branca, circuladas em preto, com valores do fluxo de calor sensível negativo. Silva & Bezerra (2006) explicam que os pixels com H negativo correspondem aos pixels cuja temperatura da

superfície (T_s) é inferior a temperatura do pixel "frio". Isso ocorre em função da aceitação da hipótese de que $H=0$ no pixel "frio", assim qualquer pixel com a T_s inferior àquela do pixel "frio" terá necessariamente $H<0$.

Valores elevados do fluxo de calor sensível, acima de 401 W.m^{-2} , ocorreram em muitas áreas no Alto rio Preto (Figura 5d), indicando baixa umidade na superfície do solo. Isso significa que, com a baixa umidade, a maior parte da energia disponível à superfície foi utilizada para aquecer o ar, e o restante o solo. O fluxo instantâneo de calor sensível médio variou entre $61,70 \pm 56,48 \text{ W.m}^{-2}$ e $263,38 \pm 87,06 \text{ W.m}^{-2}$, com valor mínimo e máximo de $-88,88 \text{ W.m}^{-2}$ e $720,36 \text{ W.m}^{-2}$, respectivamente, no dia 13 de agosto de 2007, conforme observa-se na Tabela 1.

Mendonça (2007) estimou o fluxo de calor sensível instantâneo para a região Norte Fluminense, RJ, utilizando imagens do sensor MODIS, e encontrou valores entre $0,00$ e $480,64 \text{ W.m}^{-2}$, com média de $228,25 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 29 de agosto de 2005; $0,00$ e $611,35 \text{ W.m}^{-2}$, com média de $285,67 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 16 de novembro de 2005; $0,00$ e $615,40 \text{ W.m}^{-2}$, com média de $266,78 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 05 de fevereiro de 2006; e entre $0,00$ e $291,74 \text{ W.m}^{-2}$, com média de $125,42 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 15 de junho de 2006 com a proposição "clássica", sendo esta a que utiliza a fração evaporativa (FE) na estimativa da evapotranspiração diária.

Nicácio (2008) estimou o fluxo de calor sensível no dia 12 de outubro de 2004, na região de Petrolina/Juazeiro, com a utilização de produtos do sensor MODIS, a bordo do satélite Aqua, e observou valores mínimos ($H<0$) sobre o leito do rio São Francisco, enquanto os maiores valores do fluxo de calor sensível foram encontrados, especialmente, em região de solo aberto e áreas urbanizadas ($>754,4 \text{ W.m}^{-2}$). Em áreas de savana estépica aberta, os valores encontrados, mais predominantemente, estão na faixa de aproximadamente $535,0 \text{ W.m}^{-2}$ a $754,0 \text{ W.m}^{-2}$. Entretanto, em região de savana estépica densa foi possível encontrar valores do H entre $120,0$ e $535,0 \text{ W.m}^{-2}$.

Os resultados do fluxo de calor sensível instantâneo obtido por Mendonça (2007) e Nicácio (2008) foram comparados com os resultados obtidos neste estudo. O valor máximo do H encontrado nas sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto foi de $720,36 \text{ W.m}^{-2}$. Este resultado foi compatível com o valor máximo encontrado por Nicácio (2008), que no dia 12 de outubro de 2004 encontrou valor do H superior a $754,4 \text{ W.m}^{-2}$. No caso dos valores mínimos, tanto o presente estudo como o de Nicácio (2008) encontrou valores negativos ($H<0$). Entretanto, no estudo de Mendonça (2007) não foram verificados valores negativos do fluxo de calor sensível.

Na Figura 6 são apresentados os mapas temáticos dos valores diários da evapotranspiração real ($ET_{\text{diária}}$), que foram determinados com base na fração evaporativa e no saldo de radiação médio ocorrido num período de 24 horas. Da

mesma forma que os mapas do fluxo de calor sensível, observam-se que os de $ET_{diária}$ foram marcados pela grande variabilidade espacial. Nota-se também, uma relação entre os baixos valores da $ET_{diária}$, entre 0,0 e 2,0 mm.d⁻¹ na área circulada da Figura 6d, e os elevados valores do fluxo de calor sensível (> 401,00 W.m⁻²) na área circulada da Figura 5d. Devido à baixa umidade no solo a evapotranspiração é menor, indicando que, a maior parte da energia disponível foi utilizada para aquecer o ar.

Nos mapas temáticos relacionados à Figura 6, a $ET_{diária}$ predominou entre 2,1 e 4,0 mm.d⁻¹ (tonalidade cinza "claro"). A "evapotranspiração real diária" foi elevada sobre superfícies líquidas quando comparada com outras áreas. Para exemplificar, observa-se parte do rio Preto, circulada na Figura 6a, com valores da $ET_{diária}$ entre 4,1 e 6,0 mm.d⁻¹. Porém, vale lembrar que, sobre superfícies líquidas o processo predominante é a evaporação.

A evapotranspiração real diária média variou entre 2,82±1,16 e 2,99±0,74 mm.d⁻¹, com valor mínimo de 0,00 e máximo de 6,92 mm.d⁻¹ no dia 16 de outubro de 2007, conforme observa-se na Tabela 1. Na determinação da evapotranspiração real diária, por meio do SEBAL, estabeleceu-se o critério de desconsiderar valores menores que 0,00 mm.d⁻¹, por isso que os valores mínimos obtidos neste estudo foram zero.

Mendonça (2007) estimou a evapotranspiração real diária para a região Norte Fluminense, RJ, utilizando imagens do sensor MODIS, e encontrou valores entre 0,00 e 7,39 mm.d⁻¹, com média de 3,25 mm.d⁻¹ no dia 29 de agosto de 2005; 0,00 e 10,65 mm.d⁻¹, com média de 4,50 mm.d⁻¹ no dia 16 de novembro de 2005; 0,00 e 10,12 mm.d⁻¹, com média de 4,65 mm.d⁻¹ no dia 05 de fevereiro de 2006; e entre 0,00 e 5,45 mm.d⁻¹, com média de 2,73 mm.d⁻¹ no dia 15 de junho de 2006. Esses resultados se referem a proposição chamada "clássica", e que utiliza o saldo de radiação médio ocorrido em um período de 24 horas (Rn_{24h}).

A variação da evapotranspiração encontrada por Mendonça (2007) no dia 15 de junho de 2006 (0,00 a 5,45 mm.d⁻¹) foi compatível com a encontrada nas sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto no dia 13 de agosto de 2007 (0,00 a 5,54 mm.d⁻¹). Os valores máximos da $ET_{diária}$ obtidos no estudo de Mendonça (2007), foram normalmente superiores aos encontrados para as sub-bacias do rio Paracatu. Destaca-se que, a cobertura do solo, as datas e o horário de imageamento da superfície pelo satélite foram distintos nos dois estudos, e isso pode explicar as diferenças nos resultados.

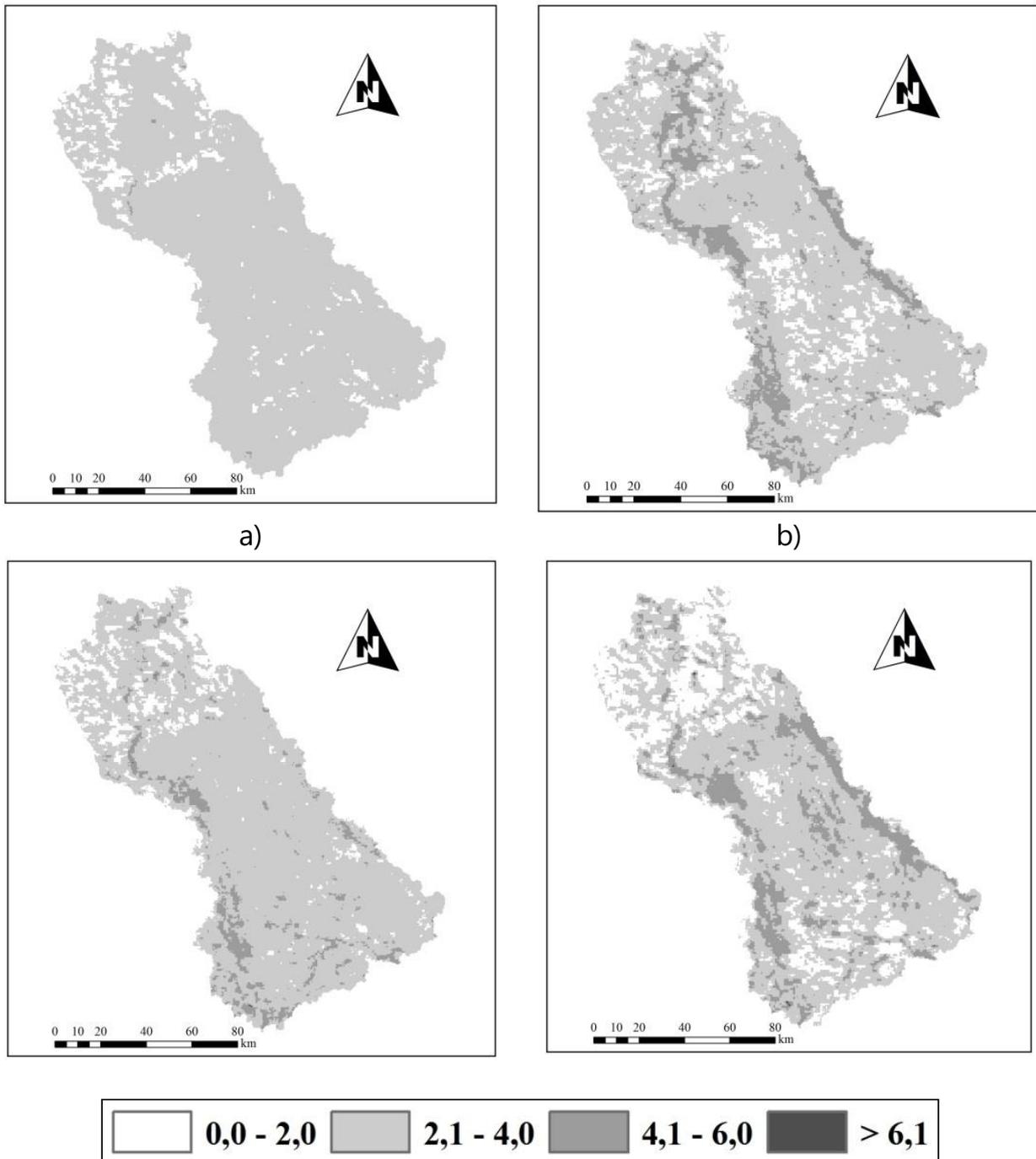


Figura 6. Evapotranspiração real diária (mm.d^{-1}) para os dias 14 de julho (a), 13 de agosto (b), 16 de setembro (c) e 16 de outubro (d) de 2007.

Além da comparação dos resultados com outros estudos, realizou-se a comparação da evapotranspiração real (ET_r), obtida pelo SEBAL, e a evapotranspiração da cultura (ET_c), verificada para o cultivar de feijão Pérola na Fazenda Decisão (Figura 7). Vale destacar que, apesar dos termos serem chamados de formas diferentes a evapotranspiração estimada pelo SEBAL, nesse

caso específico, é referente a um pixel que retrata a área de uma cultura com feijão. Na parte inferior da Figura 7 localiza-se o esquema de localização do *pixel* referência – “a” em relação aos *pixels* adjacentes – *pixels* de “b” até “i”. As coordenadas geográficas do ponto central do pivô coincidem com o *pixel* “referência” e serviram para se identificar as informações da ETr diária, no *pixel* “referência” e nos *pixels* adjacentes, gerada pelo SEBAL.

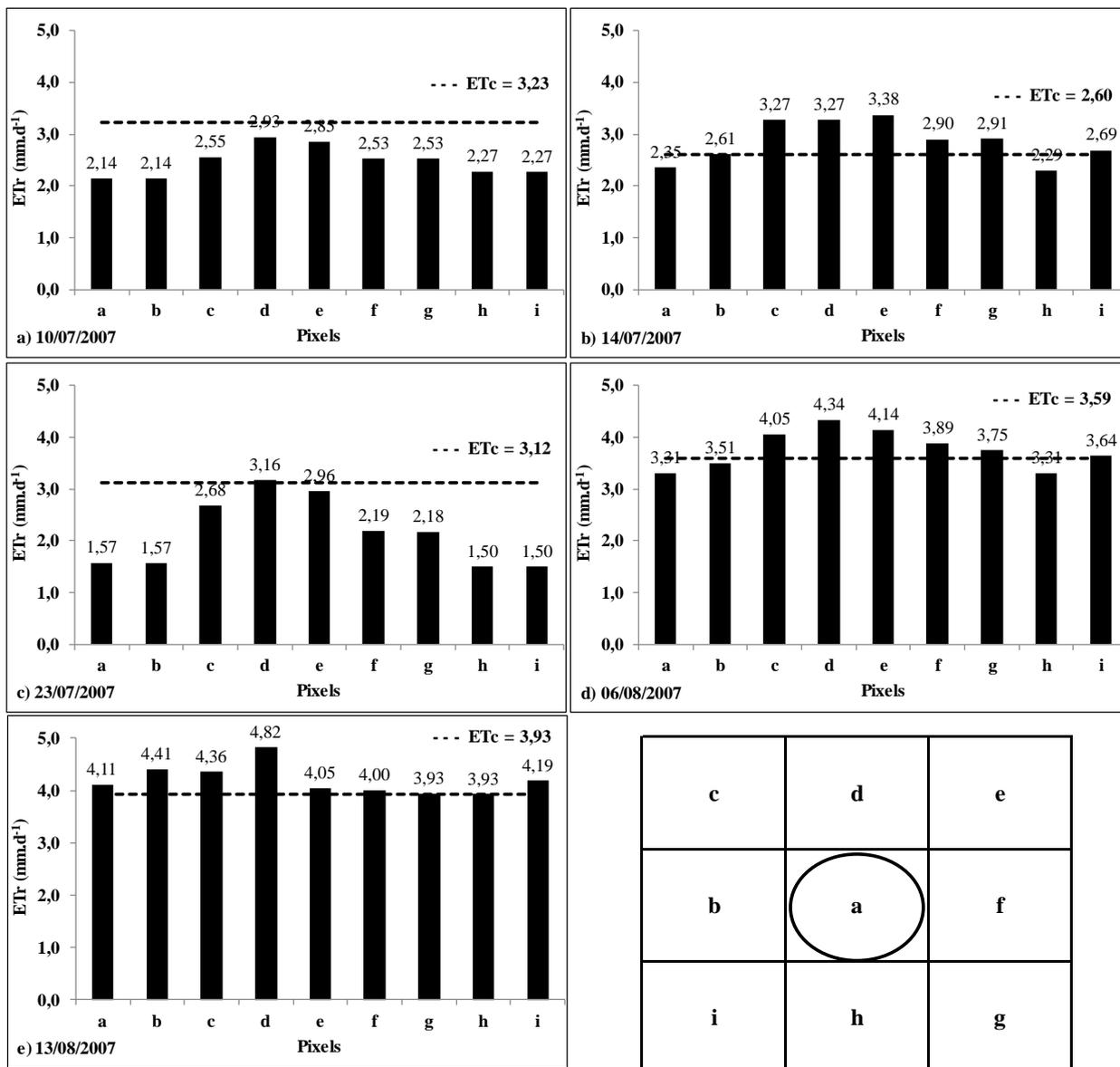


Figura 7. Comparação da evapotranspiração real obtida pelo SEBAL – ETr (mm.dia⁻¹), conforme a localização de cada *pixel* em relação ao *pixel* referência – “a”, e a evapotranspiração da cultura do feijão (ETc) observada na Fazenda Decisão nos dias 10 de julho (a), 14 de julho (b), 23 de julho (c), 06 de agosto (d) e 13 de agosto (e) de 2007.

Nas Figuras 7a e 7c verifica-se que a maioria dos *pixels* teve valores da ETr, obtida pelo SEBAL, menores do que a ETc, ou seja, valores menores que 3,23 e

3,12 mm.d⁻¹, respectivamente. Observa-se que nas Figuras 7b, 7d e 7e, a informação do *pixel* referência – “a” foi próxima a evapotranspiração da cultura (ET_c), determinada para o feijão na Fazenda Decisão, com erros absoluto (EA) de 0,25; 0,28; e 0,18 mm.dia⁻¹, respectivamente (Tabela 2). Observa-se também na Tabela 2, que os menores erros relativo médio (ERM) foram de 9,01% (06/08/2007) e 6,88% (13/08/2007). Esses resultados foram compatíveis com os encontrados por Oliveira (2012), nos dias 15/08/2010 (ERM = 10,36%) e 10/03/2010 (ERM = 6,56%) na bacia do rio Tapacurá, localizada no Estado de Pernambuco.

Tabela 2. Erro Relativo – ER (%), Erro Absoluto – EA (mm.dia⁻¹), Erro Relativo Médio – ERM (%) e Erro Absoluto Médio – EA (mm.dia⁻¹) entre a evapotranspiração real obtida pelo SEBAL – ETr, em cada *pixel*, e a evapotranspiração da cultura do feijão observada na Fazenda Decisão

<i>Pixels</i>	10/07/2007		14/07/2007		23/07/2007		06/08/2007		13/08/2007	
	ER	EA	ER	EA	ER	EA	ER	EA	ER	EA
a	33,65	1,09	9,58	0,25	49,55	1,55	7,86	0,28	4,50	0,18
b	33,78	1,09	0,31	0,01	49,81	1,55	2,37	0,09	12,21	0,48
c	20,93	0,68	25,85	0,67	13,97	0,44	12,81	0,46	10,94	0,43
d	9,29	0,30	25,92	0,67	1,41	0,04	20,84	0,75	22,72	0,89
e	11,92	0,39	29,81	0,78	5,29	0,17	15,29	0,55	3,05	0,12
f	21,83	0,71	11,54	0,30	29,68	0,93	8,25	0,30	1,86	0,07
g	21,83	0,71	11,81	0,31	30,22	0,94	4,43	0,16	0,05	0,00
h	29,69	0,96	11,85	0,31	51,86	1,62	7,86	0,28	0,08	0,00
i	29,88	0,97	3,42	0,09	52,08	1,63	1,42	0,05	6,49	0,25
Médio	23,64	0,76	14,45	0,38	31,54	0,98	9,01	0,32	6,88	0,27

CONCLUSÕES

Os resultados do saldo de radiação instantâneo obtido por meio do SEBAL são importantes, pois esse algoritmo pode estimá-lo para áreas onde há deficiência de estações meteorológicas automáticas, especialmente quando não existirem saldo radiômetros. Essa condição retrata bem as sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto, com uma área aproximada de 15.000 km², que contam com apenas uma estação automática, pertencente ao INMET, e sem a presença do saldo radiômetro.

O saldo de radiação instantâneo, os fluxos instantâneos de calor no solo e sensível, e a evapotranspiração real diária estimada por meio do algoritmo

SEBAL, para as sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto, foram compatíveis com os citados em outras literaturas.

Os resultados da comparação entre a evapotranspiração real (ET_r), obtida pelo SEBAL, e a evapotranspiração da cultura (ET_c), verificada para o cultivar de feijão Pérola, demonstraram que esse algoritmo pode ser utilizado como boa opção para determinar, com a utilização de produtos do sensor MODIS, a evapotranspiração diária nas condições da sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e rio Preto.