



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2014/02.11.14.02-TDI

## ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR POR MEIO DE MODELAGEM DO BALANÇO DE ENERGIA

Bruno Silva Oliveira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Elisabete Caria Moraes, e Bernardo Friedrich Theodor Rudorff, aprovada em 25 de fevereiro de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3FNHJ65>>

INPE  
São José dos Campos  
2014

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**

### **Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **Membros:**

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2014/02.11.14.02-TDI

## ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR POR MEIO DE MODELAGEM DO BALANÇO DE ENERGIA

Bruno Silva Oliveira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Elisabete Caria Moraes, e Bernardo Friedrich Theodor Rudorff, aprovada em 25 de fevereiro de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3FNHJ65>>

INPE  
São José dos Campos  
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Oliveira, Bruno Silva.  
Ol4e      Estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar por meio de modelagem do balanço de energia / Bruno Silva Oliveira. – São José dos Campos : INPE, 2014.  
            xxii + 107 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2014/02.11.14.02-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientadores : Drs. Elisabete Caria Moraes, e Bernardo Friedrich Theodor Rudorff .

1. evapotranspiração. 2. balanço de energia. 3. albedo de superfície. 4. sensoriamento remoto. 5. MODIS. I.Título.

CDU 528.8:633.61

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**Sensoriamento Remoto**

Dr. Antonio Roberto Formaggio



---

Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Elisabete Caria Moraes



---

Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff



---

Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

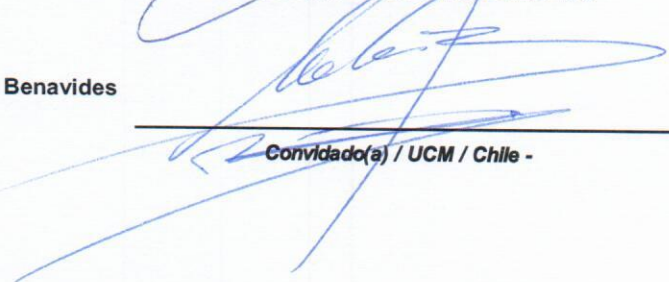
Dr. Gabriel Pereira



---

Convidado(a) / UFSJ / Minas Gerais - MG

Dr. Marcos Rodrigo Carrasco Benavides



---

Convidado(a) / UCM / Chile -

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(X) unanimidade

Aluno (a): **Bruno Silva Oliveira**

São José dos Campos, 25 de Fevereiro de 2014



## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Dra. Elisabete Caria Moraes e Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff pela confiança, amizade, bons conselhos e apoio para a realização deste trabalho.

Gostaria de agradecer ao Dr. Gabriel Pereira pelas ideias, bons conselhos e colaboração com o modelo RegCM4. Ao Dr. Marcos R. Carrasco-Benavides pela ajuda na construção e aplicação do modelo METRIC, uma incrível quantidade de informação transmitida em poucos dias de colaboração presencial no INPE, além da colaboração à distância. Também agradeço aos colegas do INPE que contribuíram na solução de diversas questões ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Ao Dr. Humberto Ribeiro da Rocha do Departamento de Ciências Atmosféricas (IAG/USP), pela disponibilização dos dados e à Emília Brasília pelas diversas dúvidas sanadas.

A meus pais Adélio e Vera e meus irmãos Mônica, Kátia e Lucas pelo amor, apoio e incentivo em todos os momentos. A Débora pelo amor, dedicação, paciência e compreensão.

Agradeço também aos meus amigos da pós-graduação e os de longa data, que com bom humor suportaram as minhas reclamações e ajudaram em diversos momentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro em forma de bolsa de estudo.





## RESUMO

A cana-de-açúcar é uma cultura agrícola de grande importância econômica no Brasil, principalmente devido à crescente demanda de etanol, decorrente tanto da mistura do etanol na gasolina quanto da popularização dos carros *flex* após o ano de 2003. Com a crescente expansão da cultura, é importante avaliar os impactos gerados pela mesma nos fluxos de energia na superfície e na evapotranspiração (ET). A ET é uma das variáveis mais importantes no ciclo hidrológico, estando relacionada com a energia, a disponibilidade hídrica e o clima. Além disso, a ET é uma variável fundamental em modelos agrometeorológicos de estimativa de produtividade agrícola. Medidas pontuais *in situ* restringem a obtenção dos fluxos de energia e da ET para pequenas áreas. Neste sentido, o uso de dados de sensoriamento remoto, em conjunto com dados de superfície, permite realizar a modelagem do balanço de energia e assim obter estimativas dos fluxos de energia e da ET para extensas áreas. Este estudo objetivou estimar as componentes do balanço de energia e a evapotranspiração real diária ( $ET_a$ ) para a cultura da cana-de-açúcar na Região Administrativa (RA) de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, utilizando dados do sensor MODIS/Terra e dados meteorológicos de superfície. O modelo utilizado foi o METRIC (*Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration*). Estimativas expandidas para o Estado de São Paulo também foram realizadas, utilizando o modelo regional RegCM4 para gerar os dados meteorológicos de entrada do METRIC, buscando superar a restrição que os dados pontuais oferecem. Os resultados encontrados mostram que as variáveis estimadas pelo METRIC variaram de acordo com a energia disponível e o estágio de desenvolvimento da cana-de-açúcar, respondendo às variações biofísicas características de cada fase fenológica da cultura. No sítio experimental o saldo de radiação foi superestimado em 12% ( $R^2=0,94$ ), variando entre  $399 \text{ W m}^{-2}$  e  $727 \text{ W m}^{-2}$ , mostrando-se fortemente influenciado pelo albedo da superfície, que durante a estação seca apresentou maiores desvios em sua estimativa. Os fluxos de calor no solo e calor sensível apresentaram baixa concordância com os valores medidos em campo, diferentemente do fluxo de calor latente, que foi subestimado em 4% ( $R^2=0,95$ ). Os valores do coeficiente da cultura ( $K_c$ ) estimados pelo METRIC para cana-de-açúcar foram de 0,13 na brotação, 0,28 no perfilhamento, 0,66 no crescimento e 0,62 na maturação. A  $ET_a$  foi superestimada em 4% ( $R^2=0,99$ ), com raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) de 0,24 e erro absoluto médio (MAE) de  $0,16 \text{ mm dia}^{-1}$  no sítio experimental, acompanhando satisfatoriamente os valores medidos *in situ* durante as diferentes fases fenológicas da cultura. A dificuldade de calibração do modelo ao longo da estação seca gerou valores inconsistentes de  $ET_a$  na RA de Ribeirão Preto, porém para a estação chuvosa os resultados concordaram com os da literatura. A aplicação da estimativa de  $ET_a$  para o Estado de São Paulo apresenta potencial, acompanhando tanto a sazonalidade quanto a variabilidade espacial quando comparada com a ET do produto MODIS.



# ESTIMATING SUGARCANE EVAPOTRANSPIRATION THROUGH ENERGY BALANCE MODELING

## ABSTRACT

Sugarcane is a crop of great economic importance in Brazil, mainly due to the growing demand for ethanol, resulting from both the mixture of ethanol in gasoline and the popularity of flex fuel cars after the year 2003. With the growing expansion of this crop, it is important to evaluate its impacts over energy flows at the surface and in evapotranspiration (ET). ET is one of the most important variables in the hydrological cycle, and it is related with energy, water availability and climate. Moreover, ET is a fundamental variable in agrometeorological models to estimate agricultural productivity. In situ point measures restrict the energy fluxes and ET estimates for small areas. In this sense, the use of remote sensing data in conjunction with surface data allows modeling energy balance, and thereby, obtaining energy fluxes and ET for large areas. This study aimed to estimate the surface energy balance and daily actual evapotranspiration ( $ET_a$ ) for sugarcane crop in the administrative region of Ribeirão Preto, São Paulo State, using MODIS/Terra products and surface meteorological data. For this purpose, the METRIC (*Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration*) model was used. Expanded estimates for São Paulo State were also performed, using regional model RegCM4 to generate meteorological input data used in METRIC model, aiming to overcome the restrictions provided by point measurements. The results show that variables estimated by METRIC model varied according to the available surface energy and sugarcane development stage, responding to biophysical variations characteristics of each phenological stage of the crop. In the experimental site the net radiation was overestimated by 12% ( $R^2= 0.94$ ), ranging from  $399 \text{ W m}^{-2}$  and  $727 \text{ W m}^{-2}$ , being strongly influenced by surface albedo, which during dry season showed higher deviations in its estimate. Soil and sensible heat fluxes showed poor concordance with field measurements, unlike the latent heat flux, which was underestimated by 4% ( $R^2= 0.95$ ).  $K_c$  values for sugarcane estimated by METRIC were 0.13 during sprouting, 0.28 during tillering, 0.66 during growth and 0.62 at maturation stage. The  $ET_a$  was overestimated by 4% ( $R^2= 0.99$ ), RMSE= 0.24 and MAE=  $0.16 \text{ mm day}^{-1}$  in the experimental site, satisfactorily following the values measured in situ during different phenological stages of the crop. The difficulty to calibrate the model during dry season led to inconsistent values of  $ET_a$  in the administrative region of Ribeirão Preto, however, for rainy season the results were in accordance with the literature. The application of  $ET_a$  estimate for São Paulo State presents potential, accompanying both seasonality and spatial variability when compared to ET of MODIS product.



## LISTA DE FIGURAS

|             | <u>Pág.</u>   |
|-------------|---|
| Figura 2.1  | Fases do desenvolvimento da cana-de-açúcar..... 8   |
| Figura 3. 1 | (a) Localização da RA de Ribeirão Preto no Estado de São Paulo (Composição colorida com imagem MODIS RGB 621); (b) áreas de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto no ano de 2006. Fonte: INPE (2013).<br>COLOCAR LOCALIZAÇÃO DA TORRE ..... 25   |
| Figura 3. 2 | (a) Torre de monitoramento de fluxos turbulentos USR – SP. Fonte: Adaptado de Rocha (2004); (b) localização da torre (círculo vermelho) na área de cana-de-açúcar da USR – Imagem Landsat 5 TM de 14/04/2006 (RGB543). A grade branca indica a posição dos <i>pixels</i> de 1 km do MODIS, com destaque para o <i>pixel</i> central em preto, utilizado na validação das estimativas do METRIC. .... 27 |
| Figura 3. 3 | Imagens TM-Landsat ao longo da safra 2005 (Composição RGB 543). O círculo vermelho indica o local da torre micrometeorológica e as linhas pretas correspondem ao mapeamento do Canasat. .... 29   |
| Figura 3. 4 | Imagens TM-Landsat ao longo da safra 2006 (Composição colorida RGB 543). O círculo vermelho indica o local da torre micrometeorológica e as linhas pretas correspondem ao mapeamento do Canasat. .... 30  |
| Figura 3. 5 | Mapas temáticos das áreas de cultivo da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo para as safras de (a) 2005 e (b) 2006. Fonte: INPE (2013). .... 37  |
| Figura 3. 6 | Seleção de <i>pixels</i> puros (células em ciano) em áreas de cana-de-açúcar para extração dos valores das estimativas do modelo METRIC em imagens com resolução espacial de 1km. As linhas vermelhas indicam a grade das células do MODIS. .... 38   |
| Figura 3. 7 | Modelo digital de elevação obtido do SRTM para o Estado de São Paulo, com resolução espacial de 90m, em Coordenadas Geográficas, Datum WGS84. .... 39   |
| Figura 4. 1 | Balço hídrico e variação da $ET_o$ para os ciclos 2005 e 2006 no sítio experimental, realizado segundo o método Penman-Monteith (ASCE-EWRI, 2005). .... 52  |
| Figura 4. 2 | Relação entre os fluxos turbulentos horários (LE+H) e a energia disponível (Rn-G) obtidas pelo sistema de <i>eddy covariance</i> (EC) para os períodos diurnos na área de cana-de-açúcar nos dias de processamento do modelo METRIC durante as safras (a) 2005 e (b) 2006. .... 53  |
| Figura 4. 3 | Albedo da superfície observado (azul), modelado (vermelho) e índice de área foliar (preto) para a área de cana-de-açúcar do sítio experimental. As  |

|              |  |    |
|--------------|--|----|
|              | linhas verticais indicam o limiar das fases fenológicas da cana-de-açúcar: (a) brotação, (b) perfilhamento, (c) crescimento e (d) maturação.....   | 54 |
| Figura 4. 4  | Variação do albedo nos <i>pixels</i> puros (1km x 1km) em área de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto – SP.....   | 57 |
| Figura 4. 5  | Comparação entre as estimativas observadas e calculadas com o METRIC: (a) saldo de radiação (Rn), (b) fluxo de calor no solo (G), (c) fluxo de calor sensível (H) e (d) fluxo de calor latente (LE). A linha azul representa a proporção 1:1.....  | 58 |
| Figura 4. 6  | Fluxo de calor latente observado pelo sistema de eddy covariance ( $LE_{\text{observado}}$ ) e estimado pelo METRIC ( $LE_{\text{Metric}}$ ) no sítio experimental de cana-de-açúcar durante as safras 2005 e 2006. As linhas verticais indicam as fases fenológicas da cana-de-açúcar: (a) brotação, (b) perfilhamento, (c) crescimento e (d) maturação. ....   | 61 |
| Figura 4. 7  | Valores diários de Kc obtidos nas safras 2005 e 2006 pelo sistema de eddy covariance e pelo METRIC para as fases fenológicas da cana-de-açúcar: (a) brotação, (b) perfilhamento, (c) crescimento e (d) maturação. DAP representa a contagem de dias após o plantio.....  | 63 |
| Figura 4. 8  | Comparação entre as estimativas diárias de $ET_a$ do METRIC e valores observados pelo sistema de eddy covariance no sítio experimental em área de cana-de-açúcar para as safras 2005 e 2006.....   | 64 |
| Figura 4. 9  | Variação da $ET_a$ estimada pelo METRIC e observada pelo sistema de eddy covariance, ao longo das safras 2005 e 2006 no sítio experimental em área de cana-de-açúcar. As linhas verticais indicam as fases fenológicas da cana-de-açúcar: (a) brotação, (b) perfilhamento, (c) crescimento e (d) maturação. ....   | 65 |
| Figura 4. 10 | Valores de $ET_a$ ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) para os <i>pixels</i> puros em área de cana-de-açúcar durante as safras 2005 e 2006 na RA de Ribeirão Preto –SP.....  | 66 |
| Figura 4. 11 | Mapas com composições coloridas falsa cor (MOD09 – RGB261), NDVI e evapotranspiração real ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) para a RA de Ribeirão Preto, nas datas 03/10/2005 (a, b, c) e 01/04/2006 (d, e, f).....   | 69 |
| Figura 4. 12 | Mapas com composições coloridas falsa cor (MOD09 – RGB261), NDVI e evapotranspiração real ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) para a RA de Ribeirão Preto, nas datas 29/10/2006 (a, b, c) e 23/02/2007 (d, e, f).....   | 70 |
| Figura 4. 13 | Mapas de Evapotranspiração real ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) para o Estado de São Paulo nas datas de 03/10/2005, 06/02/2006, 29/10/2006 e 23/02/2007. Estimativas realizadas pelo METRIC com dados meteorológicos do RegCM4 e produtos MODIS (a), (d), (g) e (j); dados do produto MOD16 (b), (e), (h) e (k); estimativas do RegCM4 (c), (f), (i) e (l). As áreas em preto ou branco no mapa indicam ausência de dados ou cobertura de nuvens..... | 72 |

|              |   |     |
|--------------|---|-----|
| Figura A. 1  | Fluxograma da metodologia. ....   | 90  |
| Figura B. 1  | Mapas da Região Administrativa de Ribeirão Preto - Produto MOD09 – Reflectância de superfície – Composições coloridas RGB 261. – Safra 2005.....                          | 92  |
| Figura B. 2  | Mapas da Região Administrativa de Ribeirão Preto - Produto MOD09 - Reflectância de superfície – Composições coloridas RGB 261. – Safra 2006. ....                         | 93  |
| Figura B. 3  | Mapas de albedo de superfície na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2005. ....   | 94  |
| Figura B. 4  | Mapas de albedo de superfície na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2006. ....   | 95  |
| Figura B. 5  | Mapas de saldo de radiação na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2005.....   | 96  |
| Figura B. 6  | Mapas de saldo de radiação na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2006.....   | 97  |
| Figura B. 7  | Mapas de fluxo de calor no solo (G) na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2005. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.....                              | 98  |
| Figura B. 8  | Mapas de fluxo de calor no solo (G) na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2006. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.....                              | 99  |
| Figura B. 9  | Mapas de fluxo de calor sensível (H) na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2005. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens. ....                            | 100 |
| Figura B. 10 | Mapas de fluxo de calor sensível (H) na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2006. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.....                             | 101 |
| Figura B. 11 | Mapas de fluxo de calor latente (LE) na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2005. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.....                             | 102 |
| Figura B. 12 | Mapas de fluxo de calor latente (LE) na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2006. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.....                             | 103 |
| Figura B. 13 | Mapas de evapotranspiração real diária ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2005. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens. .... | 104 |
| Figura B. 14 | Mapas de evapotranspiração real diária ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2006. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens. .... | 105 |
| Figura B. 15 | Mapas de NDVI na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2005. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.....  | 106 |

|              |   |     |
|--------------|---|-----|
| Figura B. 16 | Mapas de NDVI na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2006. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.....  | 106 |
| Figura C. 1  | Variação do saldo de radiação ( $R_n$ ), fluxo de calor no Solo (G), fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor latente (LE) ao longo das safras 2005 e 2006 nos <i>pixels</i> puros (1 km x 1 km) em área de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto – SP. ....                       | 107 |
| Figura C. 2  | Variação da temperatura da superfície ( $T_s$ ), índice de área foliar (LAI), índice de vegetação ajustado para o solo (SAVI) e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) nos <i>pixels</i> puros (1 km x 1 km) em área de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto – SP. .... | 107 |



## LISTA DE TABELAS

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tabela 2.1. | Duração (dias) das fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar. ....   | 8  |
| Tabela 2.2. | Índices de vegetação gerados a partir dos dados de reflectância de superfície do produto MOD09GA.....   | 21 |
| Tabela 3.1  | Fases fenológicas da cana-de-açúcar no sítio experimental no município de Luiz Antônio durante as safras 2005 e 2006. ....  | 31 |
| Tabela 3.2  | Variáveis medidas no sítio experimental, instrumentação e geometria....   | 33 |
| Tabela 3.3  | Produtos MODIS utilizados e suas características. ....  | 34 |
| Tabela 3.4  | Dados simulados pelo modelo numérico RegCM4 para alimentação do modelo METRIC. ....   | 37 |
| Tabela 3.5  | Datas das simulações com o METRIC para a RA de Ribeirão Preto e para o Estado de São Paulo. ....  | 40 |
| Tabela 4.1  | Avaliação da fração de evapotranspiração de referência (F). $F_{i\_ec}$ é o F instantâneo obtido em campo, $F_{médio}$ é a média de F no período diurno (8:00 às 18:00), $Kc\_ec$ é o Kc obtido em campo, $Kc\_M$ é o Kc estimado pelo METRIC. MAE é o erro absoluto médio, RMSE é a raiz quadrada do erro quadrático médio, b é a razão entre a variável estimada e a observada, $R^2$ é o coeficiente de determinação, V é aceitação da hipótese nula ( $b=1$ ).<br>..... | 62 |
| Tabela 4.2  | Avaliação estatística da Evapotranspiração real ( $ET_a$ ). $ET_{a\_Metric}$ é a estimativa realizada pelo METRIC, $ET_{a\_observada}$ é o valor medido em campo pelo sistema de <i>eddy covariance</i> . MAE é o erro absoluto médio, RMSE é a raiz quadrada do erro quadrático médio, b é a razão entre a variável estimada e a observada, $R^2$ é o coeficiente de determinação, V é aceitação da hipótese nula ( $b=1$ ) .....  | 64 |
| Tabela 4.3  | Estimativas de evapotranspiração real ( $mm\ dia^{-1}$ ) no <i>pixel</i> da torre de monitoramento em área de cana-de-açúcar, segundo o modelo METRIC com dados meteorológicos de superfície ( $ET_{a\_METRIC}$ ) e dados meteorológicos fornecidos pelo modelo RegCM4 ( $ET_{a\_METRIC\_RegCM4}$ ), o MOD16 e o modelo RegCM4. ....  | 71 |



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|         |  |
|---------|--|
| ASCE-PM | <i>American Society of Civil Engineers</i>   |
| BATS    | <i>Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme</i>  |
| CEPEA   | Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada                                   |
| CTC     | Centro de Tecnologia Canavieira  |
| EDC     | <i>Earth Resources Observation System Data Center</i>                              |
| HDF     | <i>Hierarchy Data Format</i>   |
| IAF     | Índice de área foliar  |
| INPE    | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  |
| LPDAAC  | <i>Land Processes Distributed Active Archive Center</i>                            |
| LSEB    | <i>Land Surface Energy Balance</i>   |
| METRIC  | <i>Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration</i> |
| MODIS   | <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>                               |
| MRT     | <i>Modis Reprojection Tools</i>  |
| NDVI    | Índice de vegetação por diferença normalizada                                      |
| RA      | Região Administrativa  |
| RegCM4  | <i>Regional Climate Model System</i>   |
| SAVI    | Índice de vegetação ajustado para o solo   |
| SEBAL   | <i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>                                   |
| SRTM    | <i>Shuttle Radar Topography Mission</i>  |
| TIFF    | <i>Tagged Image File Format</i>  |
| TSEB    | <i>Two-Source Energy Balance</i>   |
| UNICA   | União da Agroindústria Canavieira  |
| USR     | Usina Santa Rita   |



## LISTA DE SÍMBOLOS

### Latinos

|  |  |
|--|--|
| a, b                                   | Coefficientes relacionados as condições de nulidade dos fluxos de calor latente e sensível no <i>pixel</i> quente e no <i>pixel</i> frio |
| $c_p$                                  | Calor específico do ar à pressão constante ( $1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )   |
| $C_d$                                  | Fator de correção (0.24 para dia e 0.96 para noite)  |
| d                                      | Distância entre a terra e o Sol  |
| $d_b$                                  | Densidade do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ )   |
| $d_j$                                  | Dia Juliano  |
| $d_m$                                  | Distância média entre a Terra e o Sol (km)   |
| dT                                     | Diferença de temperatura entre dois níveis na superfície (K)   |
| $dT_{\text{frio}}, dT_{\text{quente}}$ | Gradiente de temperatura nos <i>pixels</i> frio e quente (K)   |
| DAP                                    | Dias após o plantio  |
| e                                      | Pressão de vapor à altura considerada (mb)   |
| $e_s$                                  | Pressão de saturação do vapor de água (mb)   |
| ET                                     | Evapotranspiração (mm)   |
| $ET_a$                                 | Evapotranspiração real diária ( $\text{mm dia}^{-1}$ )   |
| $ET_{a\_M}$                            | ET diária calculada para cada <i>pixel</i> pelo METRIC ( $\text{mm dia}^{-1}$ )  |
| $ET_{i\_M}$                            | ET instantânea calculada pelo METRIC para cada <i>pixel</i> no momento da passagem do satélite ( $\text{mm h}^{-1}$ )                    |
| $ET_o$                                 | Evapotranspiração diária de referência (grama) ( $\text{mm dia}^{-1}$ )  |
| $ET_{oh}$                              | Evapotranspiração horária de referência (grama) calculada pelo método Penman-Monteith ( $\text{mm h}^{-1}$ )                             |
| $ET_{oh\_i}$                           | ET de referência horária no momento da passagem do satélite ( $\text{mm h}^{-1}$ )   |
| $ET_r$                                 | Evapotranspiração diária de referência (alfafa) ( $\text{mm dia}^{-1}$ )   |
| F                                      | Fração da evapotranspiração de referência  |
| $F_{i\_M}$                             | Fração da ET de referência instantânea modelada pelo METRIC  |
| $F_o$                                  | Fração média da evapotranspiração de referência ao longo do dia  |
| G                                      | Fluxo de calor no solo ( $\text{W m}^{-2}$ )   |
| $G_{\text{frio}}, G_{\text{quente}}$   | Fluxo de calor no solo nos <i>pixels</i> frio e quente ( $\text{W m}^{-2}$ )   |
| $G_{sc}$                               | Constante solar ( $1367 \text{ W m}^{-2}$ )  |
| $G_o$                                  | Fluxo de calor no solo na superfície de referência ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )   |
| h                                      | Altura média da vegetação nas adjacências da torre micrometeorológica (m)  |
| H                                      | Fluxo de calor sensível ( $\text{W m}^{-2}$ )  |
| $H_{\text{frio}}, H_{\text{quente}}$   | Fluxo de calor sensível nos <i>pixels</i> frio e quente ( $\text{W m}^{-2}$ )  |
| k                                      | Constante de Von Karman (0,41)   |
| $K_c$                                  | Coefficiente de cultivo  |
| $K_{\downarrow}$                       | Irradiância solar incidente na superfície ( $\text{W m}^{-2}$ )  |
| L                                      | Fator de correção para o brilho do solo  |
| $L_{w\downarrow}$                      | Radiação infravermelho termal emitida pela atmosfera em direção à superfície ( $\text{W m}^{-2}$ )                                       |
| $L_{w\uparrow}$                        | Radiação infravermelho termal emitida pela superfície ( $\text{W m}^{-2}$ )  |
| LE                                     | Fluxo de calor latente ( $\text{W m}^{-2}$ )   |
| $LE_{\text{frio}}, LE_{\text{quente}}$ | Fluxo de calor latente nos <i>pixels</i> frio e quente ( $\text{W m}^{-2}$ )   |
| $r_a$                                  | Resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $\text{s m}^{-1}$ )  |
| $R_n$                                  | Balanco de radiação na superfície ( $\text{W m}^{-2}$ )  |
| $R_{n\text{frio}}, R_{n\text{quente}}$ | Balanco de radiação nos <i>pixels</i> frio e quente ( $\text{W m}^{-2}$ )  |
| $R_{n\_o}$                             | Saldo de radiação na superfície de referência ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )  |

|                         |   |
|-------------------------|---|
| $R_{n24h}$              | Balço de radiação médio diário ( $W m^{-2}$ )                         |
| $r_s$                   | Resistência estomática ( $s m^{-1}$ )                                 |
| $T_a$                   | Temperatura do ar próxima à superfície (K)                            |
| $T_{a_o}$               | Temperatura do ar na superfície de referência ( $^{\circ}C$ )         |
| $T_s$                   | Temperatura da superfície (K)   |
| $T_{sfrio}, T_{sqente}$ | Temperatura da superfície nos <i>pixels</i> frio e quente (K)         |
| $T_{1m}$                | Temperatura do solo a 1m de profundidade (K)                          |
| $T_r$                   | Temperatura do ar na camada mais baixa logo acima da superfície (K)   |
| $u$                     | Velocidade do vento ( $m s^{-1}$ )                                    |
| $u_2$                   | Velocidade do vento a 2m ( $m s^{-1}$ )                               |
| $u^*$                   | Velocidade de fricção do vento ( $m s^{-1}$ )                         |
| $u_{200}$               | Velocidade do vento à altitude de 200 m ( $m s^{-1}$ )                |
| VPD                     | Déficit de pressão de vapor (kPa)                                     |
| $z$                     | Altitude no <i>pixel</i> (m)  |
| $Z_{om}$                | Coefficiente de rugosidade da superfície na estação meteorológica (m) |
| $z_{om}$                | Coefficiente de rugosidade para cada pixel (m)                        |
| $z_1, z_2$              | Alturas 1 e 2 acima do plano zero de deslocamento (m)                 |

### **Gregos**

|                     |   |
|---------------------|---|
| $\alpha$            | Albedo de superfície  |
| $\beta$             | Ângulo solar (rad)  |
| $\chi$              | Condutividade térmica ( $W m^{-1} K^{-1}$ )   |
| $\Delta$            | Taxa de variação da pressão de saturação do vapor de água ( $kPa ^{\circ}C^{-1}$ )  |
| $\delta_T/\delta_z$ | Gradiente vertical de temperatura ( $^{\circ}C m^{-1}$ )                            |
| $\epsilon_a$        | Emissividade da atmosfera   |
| $\epsilon_s$        | Emissividade da superfície  |
| $\gamma$            | Constante psicrométrica ( $\gamma = \rho_a c_p$ )/0,622 $\lambda$ ) ( $mb K^{-1}$ ) |
| $\lambda$           | Calor latente de vaporização da água ( $2,45 \cdot 10^6 J kg^{-1}$ )                |
| $\theta_z$          | Ângulo zenital solar (rad)  |
| $\rho_a$            | Massa específica do ar ( $1,15 kg m^{-3}$ )   |
| $\rho_i$            | Reflectância da superfície na banda i   |
| $\rho_{nir}$        | Reflectância na banda do infravermelho próximo                                      |
| $\rho_{red}$        | Reflectância na banda do vermelho   |
| $\rho_s$            | Reflectância de superfície  |
| $\sigma$            | Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ )              |
| $\tau$              | Transmitância atmosférica   |

## SUMÁRIO

|  | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 1. INTRODUÇÃO .....  | 1           |
| 1.1. Problema.....   | 4           |
| 1.2. Hipótese.....   | 4           |
| 1.3. Objetivos .....   | 5           |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....   | 7           |
| 2.1. Caracterização da cultura .....   | 7           |
| 2.2. Balanço de energia .....  | 10          |
| 2.2.1. Balanço de radiação ( $R_n$ ).....  | 11          |
| 2.2.2. Fluxo de calor no solo (G).....   | 12          |
| 2.2.3. Fluxo de calor sensível (H) .....   | 12          |
| 2.2.4. Fluxo de calor latente (LE).....  | 13          |
| 2.3. Evapotranspiração (ET).....   | 13          |
| 2.4. Estimativa dos fluxos de energia em superfície e ET por sensoriamento remoto.....                 | 15          |
| 2.5. Modelo METRIC (Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration) ..... | 17          |
| 2.6. Variáveis estimadas pelo METRIC.....  | 20          |
| 2.6.1. Albedo de superfície ( $\alpha$ ).....  | 20          |
| 2.6.2. Índices de vegetação.....   | 21          |
| 2.6.3. Índice de área foliar (IAF).....  | 22          |
| 2.7. Sensor MODIS .....  | 23          |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS .....   | 25          |
| 3.1. Área de estudo .....  | 25          |
| 3.2. Sítio experimental .....  | 27          |
| 3.3. Estimativa dos fluxos de energia e ET por medidas <i>in situ</i> .....                            | 31          |
| 3.4. Produtos MODIS .....  | 33          |
| 3.4.1. Produto de reflectância de superfície .....   | 34          |
| 3.4.2. Produto de emissividade e reflectância de superfície (MOD11A1).....                             | 34          |
| 3.4.3. Produto de evapotranspiração (MOD16A2) .....  | 35          |
| 3.5. Modelo numérico RegCM4.....   | 36          |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 3.6.   | Mapeamento do projeto Canasat .....                                  | 37  |
| 3.7.   | Modelo digital de elevação .....                                     | 38  |
| 3.8.   | Implementação do modelo METRIC .....                                 | 39  |
| 3.8.1. | Estimativa do balanço de radiação ( $R_n$ ) .....                    | 40  |
| 3.8.2. | Estimativa do fluxo de calor no solo ( $G$ ) .....                   | 42  |
| 3.8.3. | Estimativa do fluxo de calor sensível ( $H$ ) .....                  | 43  |
| 3.8.4. | Fluxo de calor latente ( $LE$ ) e $ET$ .....                         | 46  |
| 3.9.   | Estimativas com o RegCM4.....  | 47  |
| 3.10.  | Validação das estimativas .....                                      | 48  |
| 4.     | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 51  |
| 4.1.   | Balanço hídrico no sítio experimental.....                           | 51  |
| 4.2.   | Correção das medidas de fluxos turbulentos.....                      | 52  |
| 4.3.   | Albedo de superfície.....  | 53  |
| 4.4.   | Estimativas das componentes do balanço de energia.....               | 58  |
| 4.4.1. | Saldo de radiação .....  | 58  |
| 4.4.2. | Fluxo de calor no solo .....   | 59  |
| 4.4.3. | Fluxo de calor sensível.....   | 60  |
| 4.4.4. | Fluxo de calor latente .....   | 60  |
| 4.5.   | Avaliação da Fração da evapotranspiração de referência ( $F$ ) ..... | 61  |
| 4.6.   | Evapotranspiração real diária ( $ET_a$ ) .....                       | 63  |
| 4.7.   | Estimativas de $ET_a$ com dados meteorológicos do RegCM4.....        | 71  |
| 5.     | CONCLUSÕES.....  | 77  |
|        | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                     | 79  |
|        | APÊNDICE A – FLUXOGRAMA .....  | 89  |
|        | APÊNDICE B – MAPAS .....   | 91  |
|        | APÊNDICE C – GRÁFICOS .....  | 107 |



## 1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 70 o Brasil vem investindo no desenvolvimento automotivo baseado no álcool combustível (etanol), proveniente da cana de açúcar, numa tentativa de substituir a utilização do petróleo por uma energia limpa e mais barata. O etanol tem sido empregado tanto como aditivo à gasolina, quanto como combustível dos automóveis *flex*. O país investiu muito em pesquisas e tecnologia, tanto no que diz respeito ao cultivo da cana de açúcar quanto à produção do etanol derivado desta cultura, destacando-se hoje como uma das culturas mais importantes no cenário atual da agroindústria nacional e como o maior produtor de etanol de cana de açúcar no cenário internacional por responder com 37,5% da produção mundial (SILVA; SAKATSUME, 2014).

Nesta última década houve uma grande expansão do cultivo da cana de açúcar (RUDORFF et al., 2010) e toda a intervenção antrópica gerada por esta monocultura gera questionamentos socioambientais ainda não bem respondidos. A expansão desta cultura é intensa na região Centro-Sul do Brasil, em especial no Estado de São Paulo. Entre os anos de 2003 e 2013, a área plantada de cana-de-açúcar no estado aumentou 92%, em decorrência da crescente demanda do produto para produção de etanol (INPE, 2013). Segundo a União das Indústrias de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2014), a safra de 2011/2012 indicou que a região Centro-Sul foi responsável por aproximadamente 90% da produção nacional de etanol e de 87% da produção de açúcar.

A UNICA prevê para os próximos cinco anos um crescimento da indústria sucroalcooleira nacional de 9%, sendo que a média histórica de crescimento deste setor foi de aproximadamente 7% ao ano. Além disto, a política brasileira do etanol, utilizado como aditivo ou biocombustível, implicou em uma redução equivalente à aproximadamente 18% das emissões dos combustíveis fósseis no país. Isto diminuiu as emissões de gases do efeito estufa, que alteram o balanço de radiação (SILVA; SAKATSUME, 2014). O aumento da demanda mundial por biocombustíveis exige a conversão de áreas de culturas convencionais e pastagens em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, causando mudança do uso e ocupação da terra, que pode gerar impactos nos fluxos de energia na superfície e na evapotranspiração (LOARIE et al., 2011). Estas alterações influirão nas variáveis

climáticas como a temperatura próxima à superfície e a precipitação (GEORGESCU et al., 2013). Dessa forma, é importante que esses impactos sejam conhecidos e esclarecidos, levantando uma base de informações que contribua estrategicamente para a formulação de políticas públicas que maximizem os benefícios do etanol e minimizem seus efeitos negativos. De acordo com Juárez (2004), diante da atual predominância das atividades agrícolas e pequenos remanescentes de floresta natural no Estado de São Paulo, o entendimento dos padrões dos fluxos de CO<sub>2</sub>, água e energia na superfície sobre diferentes ecossistemas, permitirá uma melhor compreensão dos impactos das mudanças do uso da terra no clima e na interação entre a biosfera e a atmosfera. De acordo com Oliveira e Moraes (2013) a determinação precisa do balanço de radiação é fundamental na definição das perdas de água por superfícies vegetadas. Segundo Bernardo et al. (2005), a estimativa de consumo de água por parte das culturas agrícolas tem grande importância no planejamento, dimensionamento e avaliação de sistemas de irrigação, permitindo a otimização na utilização dos recursos hídricos.

A evapotranspiração (ET) é uma das variáveis mais importantes no ciclo hidrológico, relacionando-se com a energia, disponibilidade hídrica e com o clima. Segundo Costa (2002), a ET é o total de água transferida do solo, das superfícies livres, da vegetação úmida e da transpiração das plantas para a atmosfera. Além de sua importância no ciclo hidrológico, a ET tem uma relevante participação na dinâmica climática global e nos processos de produtividade primária de ecossistemas terrestres (RUHOFF, 2011).

A ET é controlada pela disponibilidade de energia solar, pelas condições aerodinâmicas da atmosfera, pelo surgimento de água no solo e pela densidade e arquitetura foliar da planta, portanto a ET está diretamente relacionada com o tipo de uso e cobertura da terra, uma vez que cada tipo de vegetação apresenta diferenças adaptativas características com relação à capacidade de absorção de água, à estrutura e profundidade do sistema radicular e com relação ao estágio fenológico, que está ligado ao potencial de transpiração em função da área foliar (MEIRELES, 2007).

A ET pode ser obtida por lisimetria (métodos físicos), métodos empíricos (equações empíricas ou experimentais) ou métodos com embasamento físico, que pressupõe que o

processo de ET utiliza parte da energia disponível, representada pelo saldo de radiação, para vaporizar a água. Os métodos baseados no princípio do balanço de energia na superfície, como sistemas de covariância de vórtices turbulentos (*eddy covariance*), cintilômetros, razão de Bowen (CARRASCO-BENAVIDES et al., 2012) ou o método de Penman-Monteith FAO (PM-FAO), que combina o balanço de energia radiante com princípios aerodinâmicos e fatores de resistência do dossel da cultura, necessitam da determinação de grande número de dados meteorológicos, os quais, na maioria das estações, não são disponíveis. Estes métodos limitam as estimativas de ET a valores pontuais, no entanto pode-se utilizar o balanço hídrico para estimativas em grandes áreas (GIONGO, 2011; RUHOFF, 2011). Por ser uma combinação de fluxos de energia com grande variabilidade espacial, diária e sazonal (ALLEN et al., 2007a), a aplicação operacional de estimativas de ET em grandes áreas exige dados espacializados.

Nesse contexto o sensoriamento remoto apresenta vantagens, como a possibilidade de obtenção de informações detalhadas para extensas áreas com baixo custo e em escala de tempo adequada ao acompanhamento do crescimento e desenvolvimento de culturas agrícolas como a cana-de-açúcar, além da quantificação contínua e espacializada de parâmetros físicos da superfície, o que possibilita a melhoria de modelos agrometeorológicos e de previsão de tempo e clima (PAIVA et. al., 2011). Dessa forma, a ET pode ser estimada por meio de modelagem dos fluxos de energia na superfície com base em dados de sensoriamento remoto.

Modelos baseados no balanço de energia, como o METRIC (*Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration*) (ALLEN et al., 2007a) buscam realizar estimativas dos fluxos de energia e da ET para grandes áreas utilizando dados de sensoriamento remoto e dados complementares de superfície. O modelo METRIC, que representa um aprimoramento do modelo SEBAL (BASTIAANSEN, 1995) foi desenvolvido para aplicações em escalas locais e regionais com a utilização de imagens Landsat, porém sistemas sensores como o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) apresentam a vantagem de uma maior resolução temporal que permite estimativas de fluxos de energia em intervalo de tempo menores (ALLEN et al., 2002; RUHOFF, 2011). No entanto, as estimativas do modelo

são limitadas a poucas centenas de quilômetros (ALLEN et al., 2007a), o que impede a expansão das estimativas representativas para áreas maiores.

### **1.1. Problema**

A mudança de uso da terra causada pela recente expansão da cultura da cana-de-açúcar provoca alterações no balanço de radiação e nos fluxos de energia, afetando diretamente a ET. Dessa forma, é importante conhecer o comportamento das componentes do balanço de radiação e dos fluxos de energia dessa cultura, que atualmente cobre cerca de 20% do território do Estado de São Paulo. Nesse sentido, é necessário que os impactos da cana-de-açúcar nos fluxos de energia e na ET sejam conhecidos, bem como compreender suas relações com os parâmetros da cultura e com as variáveis meteorológicas que os influenciam diretamente. Além disso, a modelagem utilizando dados de superfície limita as estimativas em áreas maiores, mesmo quando emprega dados de sensoriamento remoto. Nesse contexto, uma alternativa é o emprego de dados meteorológicos gerados por modelos regionais para alimentar modelos como o METRIC, que também utilizam dados extraídos de satélites, possibilitando estimar a ET para áreas maiores com confiabilidade, visto que, além da evapotranspiração ser um elemento essencial para a determinação da produtividade da cana de açúcar, o seu conhecimento é essencial para o uso sustentável dos recursos hídricos superficiais.

### **1.2. Hipótese**

O desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar geram impactos na ET, além de refletir nos fluxos do balanço de energia e em outras propriedades da superfície (como o albedo) e da atmosfera. Com o crescimento da cultura da cana-de-açúcar, espera-se que o padrão da ET varie ao longo do desenvolvimento desta cultura, uma vez que há alterações na interação da vegetação com a atmosfera, nos seus métodos de manejo e na área ocupada pela mesma.

### 1.3. Objetivos

O objetivo desse trabalho será estimar a ET real diária ( $\text{mm d}^{-1}$ ) por meio do modelo METRIC para a cana-de-açúcar cultivada tanto na região administrativa de Ribeirão Preto quanto no Estado de São Paulo utilizando dados meteorológicos de superfície e simulados pelo modelo regional RegCM4 em conjunto com dados de sensoriamento remoto do sensor MODIS/Terra. Os objetivos específicos serão:

- (a) Comparar as estimativas do modelo METRIC com medidas observadas em torre micrometeorológica localizada em área de cana-de-açúcar durante as safras 2005 e 2006;
- (b) Testar a legitimidade da suposição do modelo METRIC de que a fração da ET de referência instantânea ( $F_{i\_M}$ ) é igual à média dessa variável ao longo do dia ( $F_{i\_M}=F_o$ );
- (c) Gerar curvas de  $K_c$  para a cana-de-açúcar utilizando os resultados do METRIC, para as safras 2005 e 2006;
- (d) Gerar mapas das estimativas das componentes do balanço de energia (balanço de radiação, fluxos de calor no solo, calor sensível e calor latente) e da ET real diária ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) para a cana-de-açúcar na região administrativa de Ribeirão Preto, aplicando o modelo METRIC utilizando dados meteorológicos de superfície e produtos MODIS;
- (e) Comparar as estimativas das componentes do balanço de energia e da ET real diária oriundas do modelo METRIC utilizando dados meteorológicos de superfície e utilizando dados do modelo regional climatológico (RegCM4).



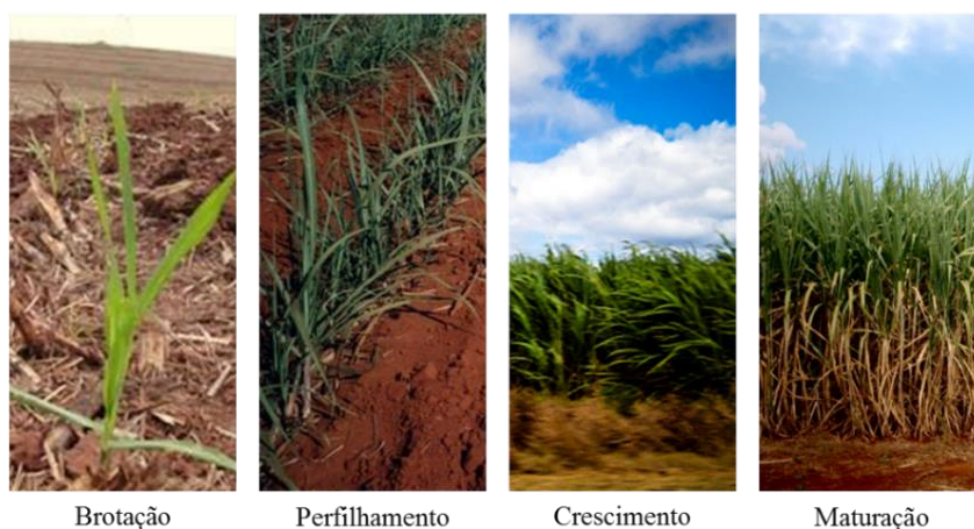
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Caracterização da cultura

A cana-de-açúcar é uma cultura adaptada ao clima tropical, exigindo de 1500 a 2500 mm de água durante o período de crescimento. O crescimento ótimo é alcançado com uma média diária de temperatura entre 22 e 30°C, sendo que a temperatura mínima para um efetivo crescimento é de 20°C (DOORENBOS; KASSAM, 1979). A deficiência hídrica e nutricional além de temperaturas extremas e baixa incidência radiação solar são algumas das principais limitações ao seu desenvolvimento (BRAY, 1980).

Segundo Bray (1980), durante o ciclo vegetativo, existem fases em que a planta apresenta alterações de exigência hídrica, em função da ação do ambiente e da fase fenológica. Os principais estádios fenológicos da cana-de-açúcar (**Figura 2.1**) são: brotação e emergência, perfilhamento, crescimento dos colmos e maturação dos colmos (ciclo de cana-planta) (EVANGELISTA, 2011; SUGAWARA, 2010; SCARDUA; ROSENFELD, 1987). O colmo é um tipo de caule em que nós e entrenós são visíveis. No caso da cana de açúcar é nos colmos que ocorre o armazenamento da sacarose.

Para cada uma destas fases a cana-de-açúcar apresenta diferentes necessidades climáticas, sendo que algumas são mais exigentes do que outras. O crescimento dos colmos é estimulado pela radiação solar incidente, umidade e temperatura favoráveis. Na fase de maturação o acúmulo de sacarose é beneficiado por condições desfavoráveis ao crescimento vegetativo, como limitação de água no solo, ausência de vento e temperatura média do mês mais frio abaixo de 21°C (SEGATO et al., 2006; GASCHO; SHIH, 1983; BRAY, 1980).



**Figura 2.1** Fases do desenvolvimento da cana-de-açúcar

A duração das fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar segundo a FAO56 (ALLEN, 1998), tanto para o primeiro ciclo da cultura (cana-planta), quanto para os cortes posteriores (cana soca), são apresentadas na **Tabela 2.1**.

**Tabela 2 1.** Duração (dias) das fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

|                    | <b>Brotação</b> | <b>Perfilamento</b> | <b>Crescimento</b> | <b>Maturação</b> | <b>Total</b> |
|--------------------|-----------------|---------------------|--------------------|------------------|--------------|
| <b>Cana-planta</b> | 50              | 70                  | 220                | 140              | 480          |
| <b>Cana soca</b>   | 30              | 50                  | 180                | 60               | 320          |

Fonte: Allen (1998).

Segundo Machado (1981), a brotação se inicia de 7 a 10 dias após o plantio (DAP) e sua emergência ocorre de 20 a 30 dias (GASCHO; SHIH, 1983). O perfilamento inicia-se 40 dias após o plantio e pode durar até 120 dias. A fase de crescimento vai do final do perfilamento até o início da intensa atividade de acúmulo de sacarose, iniciando-se por volta dos 120 DAP e dura até 270 (EVANGELISTA, 2011). A maturação caracteriza-se pela concentração de sacarose nos colmos, podendo durar até 3 meses.

Segundo Irmak (2011), a temperatura é um fator de grande importância na maturação da cana-de-açúcar, pois interfere nos processos de absorção de água e fluxo de transpiração na planta. A umidade do solo também é relevante, cuja importância varia em função do



ciclo de cultivo, estágio de desenvolvimento, condições climáticas e outros fatores. O teor de umidade no solo se modifica durante o crescimento da cultura, sendo esta a principal causa da variação da produção. Entretanto, a distribuição da precipitação ao longo do ano e a capacidade de água disponível no solo são mais importantes para o ciclo vegetativo da cana-de-açúcar do que a precipitação total incidente na cultura. De acordo com Juárez (2004), ocorre uma redução na ET ao longo do período de transição da estação chuvosa para a estação seca e também durante a estação seca, devido ao início do período de colheita da cana-de-açúcar.

O ciclo da cana-planta de ano dura em média 12 meses, enquanto para cana-planta de ano e meio dura de 14 a 21 meses, sendo a duração dependente da época de plantio (SUGAWARA, 2010). Para a região Centro-Sul do Brasil, o clima propicia duas épocas preferenciais para o plantio da cana-de-açúcar. A primeira época se dá de setembro a novembro, coincidindo com o início da estação chuvosa. Essa época de plantio caracteriza a cana-planta de ano, que tem seu principal crescimento ao longo da estação chuvosa, até o mês de abril, passando então pela fase de maturação por um período em torno de 4 meses. A segunda época de plantio ocorre entre os meses de janeiro a abril, durante a estação chuvosa. Dessa forma, a cultura tem seu crescimento inicial favorecido pelo regime de incidência da precipitação e limitado em seguida, durante a estação seca. Com o início da estação chuvosa seguinte, a cana-de-açúcar volta a ter seu crescimento acelerado (de setembro a abril) e, posteriormente, a maturação, sendo colhida na estação seca seguinte. Esse caso caracteriza o ciclo de cana-planta de ano e meio. Há ainda a época de plantio de inverno (junho a agosto), onde a irrigação ou fertirrigação é empregada pelo menos no início do crescimento vegetativo, sendo este tipo definido como cana de inverno (SUGAWARA, 2010).

Após o corte da cana-planta ocorre a rebrota e inicia-se um novo ciclo, denominado cana-soca, com duração média de 12 meses. Assim, com cortes sucessivos seguidos da rebrota, podem-se seguir até cinco ciclos da cultura, dependendo do manejo e do rendimento da cultura (EVANGELISTA, 2011; SEGATO et al., 2006).

A colheita da cana-de-açúcar pode ser feita com corte mecanizado ou manual. Para os dois cortes, a queima da palhada pode ser empregada, de forma a facilitar o processo de colheita, porém, causando danos ao meio ambiente (SUGAWARA, 2010). Atualmente a prática da colheita com queima é realizada em cerca de 25% do total da área cultivada no Estado de São Paulo (INPE, 2013) devendo ser eliminada até 2017 (AGUIAR et al., 2011).

Considerando-se o índice de área foliar (IAF), tem-se que para cada estágio da cultura, há um comportamento correspondente do índice. No estágio inicial o IAF é pequeno, com aumento gradativo até atingir um valor máximo. Nesse ponto o IAF pode manter-se ou diminuir, quando a cultura está sujeita a condições climáticas desfavoráveis (MACHADO, 1981).

Segundo Gomes (2009), grandes extensões da vegetação primária do Estado de São Paulo foram transformadas em agroecossistemas e a cana de açúcar passou a ocupar os solos mais férteis de áreas em que predominava o Cerradão e a floresta estacional, atualmente ocupando também solos mais arenosos. No ano de 2013 o cultivo da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo ocupou 23% de sua área (INPE, 2014).

Alterações no clima regional podem ocorrer em decorrência do monocultivo da cana-de-açúcar, interferindo no balanço de energia local (GOMES, 2009). Segundo Loarie et al. (2011), a expansão da cana-de-açúcar sobre pastagem ou outras culturas provoca redução da temperatura e aumento do albedo e da ET.

## **2.2. Balanço de energia**

O balanço de energia é controlado pelo saldo de radiação na superfície, que é dependente da radiação solar incidente na superfície e de suas características como albedo, emissividade e temperatura. O saldo de radiação por sua vez é particionado em três componentes de fluxo de calor: aquecimento do solo, calor sensível e calor latente, conforme apresentado na **Equação (2.1)**.

$$R_n = G + H + LE \quad (2.1)$$

em que  $R_n$  é o balanço de radiação ( $W m^{-2}$ ),  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $W m^{-2}$ ),  $H$  é o fluxo de calor sensível ( $W m^{-2}$ ) e  $LE$  é o fluxo de calor latente ( $W m^{-2}$ ).

Segundo Sellers et al. (1997), os fluxos de calor sensível e latente têm grande efeito no tempo e no clima. O calor sensível liberado pela superfície terrestre eleva a temperatura da coluna de ar sobrejacente e aquece a camada limite atmosférica, enquanto o fluxo de calor latente é equivalente à energia da água evaporada a partir da superfície do solo ou através da transpiração da vegetação.

### 2.2.1. Balanço de radiação ( $R_n$ )

A irradiância solar ao penetrar na atmosfera sofre uma série de processos que a modifica, como a reflexão, transmissão, espalhamento e absorção pelos gases, aerossóis e nuvens que compõem a atmosfera (OLIVEIRA, 2012). A quantidade de energia eletromagnética disponível para ser convertida em outras formas de energia é conhecida como balanço de radiação, ou saldo de radiação (**Equação 2.2**), definida como a diferença entre a irradiância solar incidente e radiação infravermelha distante refletida ou emitida pela superfície terrestre.

$$R_n = K_{\downarrow}(1 - \alpha) + L_{w\downarrow} - L_{w\uparrow} - (1 - \epsilon_s)L_{w\downarrow} \quad (2.2)$$

em que  $K_{\downarrow}$  é a irradiância solar incidente na superfície ( $W m^{-2}$ ),  $\alpha$  e  $\epsilon_s$  são, respectivamente, o albedo e a emissividade da superfície,  $L_{w\downarrow}$  é a radiação infravermelha termal emitida pela atmosfera em direção à superfície ( $W m^{-2}$ ) e  $L_{w\uparrow}$  é a radiação infravermelha termal emitida pela superfície ( $W m^{-2}$ ).

De acordo com Jin et al. (2011), o balanço de radiação é afetado pelas propriedades da atmosfera e da superfície, e estimar  $R_n$  em resolução espacial moderada (de acordo com padrões de escala para agricultura) é desafiador, sendo interessante dessa forma utilizar os produtos do MODIS para estimar propriedades físicas da superfície, como albedo e emissividade, bem como estimar a temperatura da superfície.

### 2.2.2. Fluxo de calor no solo (G)

O fluxo de calor no solo (G) consiste na quantidade de energia utilizada para seu aquecimento, sendo geralmente modelado como uma troca de calor por condução (SELLERS et al., 1997; ALLEN et al., 2002). Dessa forma, G é função da condutividade térmica do solo ( $\chi$ ) e do gradiente vertical de temperatura  $\left(\frac{\delta T}{\delta z}\right)$ . Alvalá (1993) descreve o fluxo de calor no solo como uma troca de calor primariamente por condução, ainda que a convecção e a radiação eletromagnética também sejam relevantes. Assim, o fluxo de calor no solo é dado pela lei de Fourier:

$$G = -\chi \left(\frac{\delta T}{\delta z}\right) \approx \chi \frac{T_s - T_{1m}}{1} \quad (2.3)$$

em que  $\chi$  é a condutividade térmica do solo ( $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ ),  $\left(\frac{\delta T}{\delta z}\right)$  é o gradiente vertical de temperatura ( $^{\circ}C\ m^{-1}$ ),  $T_s$  é a temperatura da superfície e  $T_{1m}$  é a temperatura do solo (K) a 1m de profundidade.

Em situações onde a superfície é recoberta com vegetação senescente como palha pós-colheita ou vegetação de áreas alagadas, o valor de G pode ser reduzido, mesmo havendo pouca massa vegetal vigorosa, pois nesses casos a vegetação senescente atua como um isolante da superfície (ALLEN et al., 2011).

### 2.2.3. Fluxo de calor sensível (H)

O fluxo de calor sensível (H) corresponde ao calor trocado entre a superfície e o ar por condução. Segundo Alvalá (1993), o processo de troca de calor sensível é determinado pelo estado da camada limite da atmosfera e pelas propriedades da superfície. Dessa forma, a troca de calor sensível entre a superfície e a atmosfera é dada por:

$$H = \frac{T_s - T_r}{r_a} \rho_a c_p \quad (2.4)$$

em que  $T_r$  é a temperatura do ar (K) na camada mais baixa logo acima da superfície,  $r_a$  é a resistência aerodinâmica para transferência de calor ( $s\ m^{-1}$ ),  $\rho_a$  e  $c_p$  são, respectivamente,

a massa específica do ar ( $1,15 \text{ kg m}^{-3}$ ) e o calor específico do ar a pressão constante ( $1,004 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) (SELLERS et al., 1997).

#### 2.2.4. Fluxo de calor latente (LE)

O fluxo de calor latente ocorre quando há uma diferença na concentração de vapor de água entre a superfície vegetada e a atmosfera (ALVALÁ, 1993), consistindo na energia envolvida na evaporação da água da superfície e na transpiração vegetal (SELLERS et al., 1997). Analogamente à relação descrita para o calor sensível, temos que para o calor latente:

$$LE = \left[ \frac{e_s(T_s) - e}{r_a + r_s} \right] \frac{\rho_a c_p}{\gamma} \quad (2.5)$$

em que  $\gamma$  é a constante psicrométrica ( $\gamma = \frac{\rho_a c_p}{0,622\lambda}$ ) ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $e_s$  é a pressão de saturação do vapor de água ( $\text{kPa}$ ),  $e$  é a pressão de vapor ( $\text{kPa}$ ) na altura considerada,  $r_a$  é a resistência aerodinâmica para transferência de calor ( $\text{s m}^{-1}$ ) e  $r_s$  é a resistência estomática ( $\text{s m}^{-1}$ ) (ALVALÁ, 1993).

#### 2.3. Evapotranspiração (ET)

A evapotranspiração (ET) é um processo de grande importância no sistema climático, nos ciclos da água, de energia e do carbono. A ET é uma das mais importantes variáveis no ciclo hidrológico, inter-relacionando a energia com a disponibilidade hídrica e o clima. O termo é empregado para exprimir o processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera por evaporação, proveniente de superfícies livres, dos solos, da vegetação úmida e da transpiração das plantas (VAREJÃO-SILVA, 2001; COSTA, 2002).

Em escala global, a ET é a segunda maior componente, depois da precipitação, no ciclo terrestre da água, uma vez que devolve para a atmosfera mais de 60% da água precipitável, além de utilizar mais da metade da energia solar absorvida pela superfície terrestre (TRENBERTH et al., 2009; MU et al., 2011). A ET também é utilizada para inferir sobre a condição de umidade do solo, importante variável em modelos climáticos e de previsão de tempo (ALLEN et al., 2011).

A ET pode afetar a precipitação, o fluxo de calor latente associado e atuar no controle da temperatura da superfície, com importantes reflexos nas características climáticas regionais (JUNG et al., 2010). A evaporação da água no solo e transpiração da vegetação apresentam tempos de resposta diferenciados em relação à umidade superficial, sendo a transpiração sensível ao teor médio de umidade em toda a zona radicular, enquanto a evaporação de água no solo é mais importante nas primeiras horas após eventos de precipitação ou de irrigação (SCHERER-WARREN, 2012).

Em áreas de cana-de-açúcar, a ET depende do ciclo da cultura, uma vez que durante o desenvolvimento da mesma, as condições de cobertura do solo variam desde solo descoberto (no período de plantação ou colheita) até solo totalmente coberto pela cultura, quando esta se encontra plenamente desenvolvida. As alterações na estrutura do dossel provocam uma variação na rugosidade superficial, implicando em mudanças na velocidade do vento e, conseqüentemente, no particionamento dos fluxos de calor sensível e latente. A disponibilidade de umidade no perfil do solo também é afetada pela compactação que o manejo da cultura da cana-de-açúcar proporciona (RUHOFF et al., 2009). Os mesmos autores avaliaram a importância das variáveis climáticas envolvidas no processo de ET em áreas de cerrado e cana-de-açúcar, concluindo que o processo é comandado pela variação da oferta de energia, pelo processo de circulação atmosférica (velocidade do vento e pressão atmosférica) e pelas condições da vegetação, que apresentaram modificações significativas com a alternância de estações secas e úmidas.

A ET real ( $ET_a$ ) da cultura é a quantidade de água transferida pela cultura para a atmosfera, por evaporação e transpiração, nas condições reais de demanda atmosférica, umidade do solo e condições da cultura (FOLHES, 2007). O cálculo da  $ET_a$  da cultura é feito com base no coeficiente da cultura ( $K_c$ ) e na ET de referência, que diz respeito à ET de uma cultura hipotética de referência mantida sob condições reais de crescimento (DOORENBOS; PRUITT, 1977). Relacionar a ET de referência com uma cultura específica pelo  $K_c$  tem a vantagem de incorporar nesse coeficiente processos físicos e biológicos envolvidos na interação da cultura com o ambiente (ALLEN, 1998). A ET de referência é definida como a ET de uma superfície uniforme recoberta com uma vegetação em crescimento ativo, com determinada altura e resistência aerodinâmica de

superfície, sem restrição de umidade e que represente uma extensão de pelo menos 100 m com vegetação igual ou similar (ASCE-EWRI, 2005). O método ASCE-PM descrito em ASCE-EWRI (2005) é aplicado padronizando dois tipos de superfícies de referência: (1) grama e (2) alfafa, que diferenciam as ET de referência como  $ET_o$  e  $ET_r$ , respectivamente. Os valores de  $ET_o$  e  $ET_r$  podem diferir em virtude do albedo e da rugosidade das duas superfícies.

A determinação de  $ET_o$  supõe uma cultura de referência uniforme com altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica de superfície de  $70 \text{ s m}^{-1}$  e albedo de 0,23, características semelhantes a uma área com grama de altura uniforme, em crescimento ativo e recobrando a superfície do solo sem restrição de umidade.

Com a utilização do coeficiente da cultura ( $K_c$ ), pode-se estimar a  $ET_a$ , o que torna possível sua utilização em modelos agrometeorológicos como o de Doorenbos e Kassam (1979), que buscam estimar a produtividade da cultura agrícola.

#### **2.4. Estimativa dos fluxos de energia em superfície e ET por sensoriamento remoto**

O sensoriamento remoto é reconhecido como o meio mais viável para obter informações regionais de ET na superfície terrestre. A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto permite uma determinação espacializada da ET (MU et al., 2011; MEDINA et al., 1998). Dados de sensoriamento remoto, especialmente os de satélites em órbita polar, fornecem informações sobre superfícies vegetadas, úteis para medidas regionais e monitoramento de variáveis biofísicas que afetam a ET, como albedo, tipo de biomassa e índice de área foliar (IAF), com um fluxo relativamente favorável de dados com resolução espacial e temporal adequadas (MU et al., 2011; PAIVA et. al., 2011).

De acordo com Scherer-Warren (2011), para aplicações como modelagem hidrológica ou manejo agrícola, o uso de estimativas de ET com frequência temporal e resolução espacial adequada é desejável, pois possibilita relacionar a estimativa de ET por imagem de satélite a uma determinada área no terreno. Além das resoluções espacial e temporal, devem ser considerados os aspectos operacionais no procedimento de construção de uma

série temporal de ET e sua validação, em particular a complexidade de processamento e a necessidade de dados de campo.

Os modelos com base em dados de sensoriamento remoto surgiram como uma opção confiável e de baixo custo para estimativas de  $ET_a$  e  $K_c$  em grandes áreas, com diversos tipos de cobertura vegetal (GOWDA et al., 2008). As abordagens que vêm sendo utilizadas para estimar a  $ET_a$  com dados de sensoriamento remoto podem ser divididas em:

- a) métodos empíricos e estatísticos, baseados em dados do infravermelho termal que são introduzidos diretamente em modelos empíricos;
- b) métodos residuais do balanço de energia (LSEB – *Land Surface Energy balance*) (Eq. 2.1), que combinam algumas relações empíricas com modelos físicos e utilizam dados de sensoriamento remoto para estimar parâmetros de entrada dos modelos;
- c) outros modelos físicos que utilizam a lógica de equações como a de Penman-Monteith para o cálculo da ET (MU et al., 2011; RUHOFF, 2011).

Modelos do tipo LSEB que utilizam dados de sensoriamento remoto, como o METRIC e o SEBAL, apresentam vantagens sobre outros métodos convencionais para estimar a ET, pelo uso de coeficientes da cultura e índices de vegetação, que não exigem que se determine o tipo de cultura nem o estágio de desenvolvimento da mesma (ALLEN et al., 2011).

Juárez (2004) avaliou as observações de variáveis climáticas (estação meteorológica e fluxos radiativos) e de fluxos turbulentos de água, calor e  $CO_2$  sobre um ecossistema de cerrado *stricto sensu* e um agroecossistema de cana-de-açúcar, no período de 2001 a 2002. Suas análises indicam a variabilidade no ciclo diurno, sazonal e interanual durante o período de estudo, enfatizando-se as principais mudanças dos padrões médios dos fluxos e de clima entre os dois ecossistemas. Houve também notáveis diferenças entre os anos de 2001 e 2002, o primeiro caracterizado com maior número de frentes frias atingindo as áreas experimentais, o que produziu efeitos nos fluxos de superfície pela resposta da vegetação e pelo clima.



## **2.5. Modelo METRIC (Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration)**

Diversos algoritmos vêm sendo desenvolvidos para estimar os fluxos de energia entre a superfície terrestre e a atmosfera. Dentre eles, alguns modelos permitem estimar a evapotranspiração através do balanço de energia em superfície, com dados de sensoriamento remoto, como o TSEB - *Two-Source Energy Balance* (NORMAN et al., 1995), SEBAL - *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (BASTIAANSEN, 1995), SEBS - *Surface Energy Balance System* (SU, 2002) e o METRIC - *Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration* (ALLEN et al., 2007a; ALLEN et al., 2007b). O METRIC tem como principal característica a utilização de dados de sensoriamento remoto e reduzidas informações de superfície, sendo utilizado para aplicações em escala local e regional com imagens Landsat, originalmente (ALLEN et al., 2007a). O METRIC representa um aprimoramento do SEBAL, sendo aplicado com sucesso a superfícies heterogêneas e montanhosas, adotando a metodologia de processamento de imagens do SEBAL, incluindo dados de modelos numéricos de terreno (MNT) e dados de evapotranspiração de referência, horária e diária (GIONGO, 2011).

A principal diferença entre o METRIC e o SEBAL está associada à estimativa do fluxo de calor sensível (H), além da estimativa da ET diária (GIONGO, 2011). Na estimativa de H, o balanço de energia é calibrado internamente para duas condições extremas (seca e úmida) usando dados locais. A calibração é realizada para cada imagem utilizada no modelo, empregando para tanto a ET de referência (em grama ou alfafa), computada para dados horários (ALLEN et al., 2007a; CARRASCO-BENAVIDES et al., 2012). Os dois modelos são calibrados por meio de modelagem inversa em condições extremas para gerar estimativas de H e para reduzir erros sistemáticos nas estimativas de saldo de radiação, fluxo de calor no solo e temperatura em superfície (ALLEN et al., 2011). Ruhoff et al. (2012) avaliaram as estimativas de fluxos de calor do modelo SEBAL na bacia do Rio Grande, utilizando imagens do sensor MODIS, verificando que o modelo SEBAL

superestima a ET em nível local e regional devido à sua baixa sensibilidade às condições de umidade do solo e estresse hídrico.

A calibração interna utiliza *pixels* âncora (quente e frio), que representam as condições extremas no terreno (seca e úmida). Estes *pixels* são selecionados pelo usuário e submetidos a um processo iterativo que envolve a teoria de Monin-Obukhov. (ALLEN et al., 2007a; CARRASCO-BENAVIDES et al., 2012). Comparando o SEBAL e o METRIC, há particularidades relacionadas à escolha do *pixel* frio e ao cálculo de sua diferença de temperatura (dT), que difere entre os dois modelos. Para o *pixel* quente as mesmas suposições são consideradas pelos dois modelos, conforme descrito por Allen et al. (2007a). O parâmetro dT representa a diferença entre a temperatura da superfície e a temperatura da camada de ar logo acima da superfície (níveis  $z_1$  e  $z_2$ ), e sua determinação por meio de dados de sensoriamento remoto é dificultada pelas incertezas na atenuação da atmosfera ou pela calibração radiométrica dos sensores. Dessa forma, o gradiente de temperatura dT pode ser aproximado por uma relação linear com  $T_s$ , conforme proposto por Bastiaanssen (1995).

No METRIC o *pixel* frio é associado a uma cultura em pleno desenvolvimento e sem restrição de umidade, onde o valor da diferença de temperatura (dT) entre os níveis  $z_1$  e  $z_2$  é diferente de zero, calculada em função de  $ET_o$  (ALLEN et al., 2007a).

Para cada imagem, o fluxo de calor sensível no *pixel* frio é definido como:

$$H_{\text{frio}} = R_{n_{\text{frio}}} - G_{\text{frio}} - 1,20ET_{\text{oh}} \quad (2.6)$$

O fator 1,20 é aplicado considerando que a ET do *pixel* frio é 20% maior que ET de referência para superfície em grama ( $ET_o$ ) (FOLHES et al., 2009). De acordo com Tasumi (2003), a razão entre  $ET_r$  e  $ET_o$  varia entre 1,20 e 1,40.

Para campos agrícolas com cobertura densa ( $IAF > 4$ ) a taxa de ET é tipicamente cerca de 5% maior que a  $ET_r$  (TASUMI, 2005; GIONGO 2011). A  $ET_o$  foi empregada por Folhes et al. (2009) para o cálculo de H no *pixel* frio, assumindo que  $ET \sim 1,20 ET_o$ . O fator 1,20 indica que a cultura agrícola no *pixel* frio tem taxas de ET cerca de 20% maiores que uma

superfície de referência em grama em condições ótimas de crescimento e disponibilidade hídrica. Assim, o valor de  $LE_{frio}$  é baseado em um *pixel* frio representativo selecionado na imagem, no qual assume-se que:

$$LE_{frio} = 1,20 \lambda ET_o \quad (2.7)$$

Também em cada imagem, alguns *pixels* quentes são selecionados, considerando áreas agrícolas que se encontram sem cobertura vegetal e com baixa ou nenhuma evaporação de água do solo. Para o *pixel* quente, pode-se aplicar o modelo de balanço hídrico descrito por Allen (1998), para verificar se a evaporação neste *pixel* é nula ou obter um valor de evaporação residual (CARRASCO-BENAVIDES et al., 2012; SCHERER-WARREN, 2011).

Em aplicações com dados MODIS, geralmente é difícil localizar *pixels* com dados de temperatura de 1 km que contenham vegetação homogênea com recobrimento do solo suficiente para representar o “*pixel* frio”, onde se tem que  $ET \sim 1,20 ET_o$ . Nessas condições, pode-se aplicar o METRIC e calibrá-lo utilizando imagens Landsat para determinar a  $ET_a$  e a fração de  $ET_o$  (F) para os *pixels* de resolução espacial do MODIS e para criar relações entre F e NDVI para uma região de interesse. Essa relação pode então ser utilizada para a calibração com imagens MODIS, onde não há *pixels* com  $F=1,20$  (ALLEN et al., 2007a).

ALLEN et al. (2008) compararam estimativas de  $K_c$  pelo modelo METRIC com dados MODIS e Landsat. Para as amostras de *pixels* de 500 m, o  $METRIC_{MODIS}$  subestimou o  $K_c$  em áreas de alto NDVI, devido à resolução espacial da banda termal do MODIS (1km), que contaminou o *pixel* de interesse com a temperatura de *pixels* vizinhos. Para áreas com baixo NDVI, a diferença em  $K_c$  não foi significativa, pois nessas áreas os *pixels* vizinhos tinham cobertura e temperatura de superfície similares, reduzindo o efeito de contaminação.

A extrapolação de ET instantânea para diária no METRIC não relaciona a ET com a fração evaporativa, que se baseia no balanço de radiação diário, uma vez que a ET pode exceder o balanço de radiação em locais áridos ou semi-áridos (ALLEN et al., 2011). Para

extrapolar a medida instantânea para diária, o METRIC considera que os valores instantâneos de  $F$  são constantes ao longo do dia, obtendo-se a ET real diária pela multiplicação de  $F$  pela  $ET_0$  medida em uma estação meteorológica de referência durante um dia, conforme descrito por Allen et al. (2007a) e Tasumi (2003).

De acordo com Allen et al. (2011), uma desvantagem da estimativa de LE como termo residual do balanço de energia é que a exatidão dessa medida depende das estimativas de  $R_n$ ,  $H$  e  $G$ . O METRIC busca superar essa limitação através de sua calibração interna na estimativa de  $H$ , de forma a absorver erros e viesamentos (CARRASCO-BENAVIDES et al., 2012). Giongo (2011) afirma que a ET estimada pelo modelo METRIC permite bom ajuste com dados obtidos em estação agrometeorológica de superfície.

O METRIC utiliza equações empíricas para estimar valores de diversos parâmetros das componentes do balanço de energia. Algumas aplicações do METRIC exigiram a modificação da equação empírica para o fluxo de calor no solo, devido às condições da superfície, como para áreas de deserto, onde a temperatura de superfície é maior do que em áreas de agricultura, devido ao menor fluxo de calor no solo (ALLEN et al., 2007a). Allen et al. (2007b) aplicaram o METRIC em uma área de deserto com vegetação esparsa, verificando que a calibração da relação  $T_s$  vs.  $dT$  realizada para áreas agrícolas na mesma imagem superestima o valor de  $H$  para as áreas de deserto, que possuem alta temperatura e rugosidade da superfície. Desse modo, o modelo empírico requer ajustes que melhorem a acurácia das estimativas de ET para diferentes usos e coberturas do solo.

## **2.6. Variáveis estimadas pelo METRIC**

### **2.6.1. Albedo de superfície ( $\alpha$ )**

O albedo da superfície ( $\alpha$ ) pode ser definido como a relação entre a irradiância solar refletida pela superfície terrestre e a irradiância solar nela incidente, integrada em todo o espectro solar, e sua alteração afeta de maneira direta os balanços radiativos e energéticos e, conseqüentemente, implica em mudanças no clima regional (ALLEN et al., 2007a; ALLEN et al., 2002; LIANG, 2000; PEREIRA et al., 2000).

As mudanças no albedo da superfície podem ser ocasionadas por diversos fatores, como alterações na umidade do solo e no crescimento da vegetação. Contudo, o principal fator que altera o albedo da superfície é a mudança do uso e cobertura da terra, causada por atividades antrópicas (HE et al., 2012). A alteração do albedo modifica as relações de absorção de radiação eletromagnética pela superfície e transforma de maneira direta o balanço de radiação, os fluxos de calor latente e sensível, o regime de ventos e de chuvas, culminando na alteração das condições do microclima da região (PEREIRA et al., 2009).

### 2.6.2. Índices de vegetação

Os índices de vegetação (IV) vêm sendo desenvolvidos para melhor compreensão das variáveis do dossel, propiciando uma das formas mais simples de relacionar dados de sensoriamento remoto com o índice de área foliar, permitindo que medidas pontuais deste parâmetro fossem expandidas para áreas inteiras, tornando possíveis estudos mais abrangentes e, portanto, permitindo o uso do sensoriamento remoto voltado para manejo de culturas (AHAMED et al., 2011; WEISS et al., 2004; TURNER et al., 1999).

O uso dos índices de vegetação permite a obtenção de informações sobre o crescimento e vigor da vegetação e podem ser utilizados na determinação de parâmetros biofísicos, destacando as características das plantas por sua interação com a radiação solar eletromagnética em cada banda espectral, minimizando efeitos do solo, atmosfera e variações abaixo do dossel (JENSEN, 2006). Os principais índices de vegetação combinam as informações de radiância refletidas pelos dosséis nas regiões do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010). Os índices de vegetação que foram utilizados neste estudo são apresentados na **Tabela 2.2.**

**Tabela 2 2.** Índices de vegetação gerados a partir dos dados de reflectância de superfície do produto MOD09GA.

|      | Nome  | Fórmula   | Referência          |
|------|---|---|---------------------|
| NDVI | Índice de vegetação por diferença normalizada | $\frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$             | Rouse et al. (1974) |
| SAVI | Índice de vegetação ajustado para o solo      | $(1 + L) \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red} + L}$ | Huete (1988)        |

em que  $\rho_{nir}$  é a reflectância na banda do infravermelho próximo,  $\rho_{red}$  é a reflectância na banda do vermelho e L é o fator de correção para o brilho do solo. O valor de L varia de acordo com a quantidade de vegetação sobre o solo, variando de L=0 (sem vegetação verde) até L=1 (cobertura vegetal intensa). Segundo Tasumi (2003), para sua área de estudo o padrão utilizado no METRIC é L=0,1.

O NDVI relaciona as reflectâncias do infravermelho próximo e do vermelho, baseando-se no contraste dessas duas reflectâncias para estimar a atividade de fotossíntese e alterações na estrutura dos dosséis (HUETE et al., 2002). Huete (1988) propôs o SAVI buscando um índice com o efeito do substrato minimizado.

### **2.6.3. Índice de área foliar (IAF)**

O índice de área foliar (IAF) é um dos principais parâmetros biofísicos que caracterizam a interface planta-atmosfera, sendo definido como a área das folhas em relação à área de solo abaixo destas mesmas folhas (DORAISWAMY et al., 2004). Ele tem um impacto direto no microclima dentro do dossel e também abaixo deste, controlando a interceptação de água, distribuição da radiação solar, da água e da troca de gases, sendo, portanto uma componente chave nos ciclos biofísicos em ecossistemas (BREDA, 2003). É um parâmetro muito utilizado em modelos de crescimento de vegetação e de ET, pois está relacionado à produção de biomassa (PICOLI, 2007).

O IAF é uma variável chave para a calibração de modelos de crescimento de culturas, pois representa a superfície foliar que intercepta a radiação utilizada no processo da fotossíntese. É importante na caracterização da interação solo/vegetação/atmosfera, relacionando-se com variáveis como a ET e a fotossíntese que estão diretamente ligadas com a produtividade e a produção de biomassa da vegetação (GONZÁLEZ-SANPEDRO et al., 2008).

De acordo com Ponzoni e Shimabukuro (2010), o conceito de índice de área foliar é utilizado para caracterizar o dossel com relação à quantidade de folhas em modelos teóricos de reflectância da vegetação, sendo uma representação equivalente às camadas sobrepostas de folhas na copa da vegetação. No caso das camadas, tem-se que quanto

mais camadas de folhas, maior é a absorção da radiação que ocorre de forma diferenciada nas faixas do visível e do infravermelho próximo. Na faixa do visível a radiação incidente é quase toda absorvida na primeira camada de folhas enquanto que na faixa do infravermelho próximo a radiação incidente é fortemente refletida através de sucessivas reflexões e transmissões da radiação pelo dossel, pois a energia transmitida por uma camada incide sobre a segunda, logo abaixo, resultando em mais uma componente de reflexão captada pelo sensor, assim como abaixo da segunda e demais camadas inferiores do dossel (JENSEN, 2006).

Técnicas de sensoriamento remoto têm se mostrado viáveis para estimar o IAF com rapidez e em escala regional, com níveis de exatidão aceitáveis e com o objetivo de extrair ou realçar a contribuição da vegetação verde no sinal detectado pelo campo de visada do sensor (WANG et al., 2004).

## **2.7. Sensor MODIS**

O sensor MODIS está a bordo de ambas as plataformas Terra e Aqua, que possuem órbita polar a uma altitude de cerca de 700 km, ângulo de imageamento de  $\pm 55^\circ$  e faixa imageada de 2330 km. A partir dos dados fornecidos pelo sensor MODIS são gerados diversos produtos voltados aos estudos da atmosfera e da superfície (oceanos e continentes). Os produtos são divididos em cinco níveis (0 a 4) e variam em função do grau de processamento (RUDORFF et al., 2007).

Com o lançamento de sistemas sensores como o MODIS, com imageamento quase diário, o monitoramento de propriedades e processos de superfície teve um novo impulso, permitindo o desenvolvimento de novas metodologias para a compreensão das características dos sistemas ambientais. Nesse contexto, o sensor MODIS apresenta uma vantagem, pela possibilidade de estimar fluxos de energia em escala regional, continental e global, com resolução temporal quase diária (RUHOFF et al., 2012). O impacto da resolução espacial dos produtos de sensoriamento remoto na estimativa de ET tem ganhado destaque por diversos estudos, que mostram que resoluções espaciais maiores contribuem com um aumento da precisão, ao contrário de resoluções espaciais mais grosseiras, que resultam em perda de informação para aplicações ambientais (CARMEL,

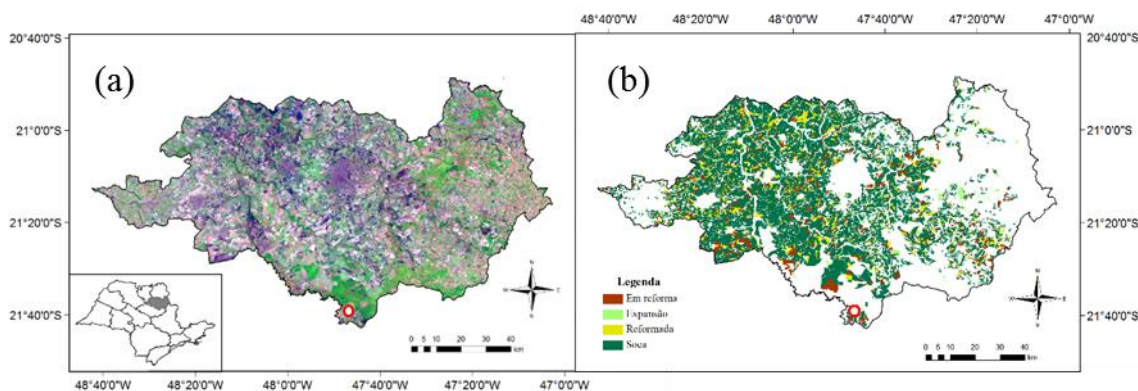
2004). Apesar da resolução espacial moderada do sensor MODIS acarretar um maior erro nas estimativas de ET, sua alta sensibilidade radiométrica, associada com as correções geométrica e atmosférica, apresenta vantagens para esse tipo de modelagem. Além disso, as estimativas de ET em escala continental e global com base em imagens de resolução espacial moderada se mostraram relativamente precisas (RUHOFF et al., 2012; MU et al., 2011; NISHIDA et al., 2003).



### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Área de estudo

As estimativas realizadas neste estudo compreenderam a Região Administrativa (RA) de Ribeirão Preto e o Estado de São Paulo (**Figura 3.1**). O modelo METRIC foi aplicado primeiramente para a RA de Ribeirão Preto (com produtos MODIS e dados meteorológicos de superfície), expandindo-se posteriormente a modelagem para o Estado de São Paulo (com produtos MODIS e dados meteorológicos espacializados gerados pelo modelo RegCM4, descrito adiante). A **Figura A.1** apresenta um fluxograma simplificado da metodologia aplicada.



**Figura 3.1** (a) Localização da RA de Ribeirão Preto no Estado de São Paulo (Composição colorida com imagem MODIS RGB 621); (b) áreas de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto no ano de 2006. O círculo vermelho indica a localização do sítio experimental em área de cana-de-açúcar. Fonte: INPE (2013).

##### 3.1.1 Estado de São Paulo

O Estado de São Paulo situa-se entre as latitudes  $19^{\circ}28'44''S$  e  $25^{\circ}10'24''S$  e longitudes  $44^{\circ}24'16''O$  e  $53^{\circ}51'21''O$ . De acordo com a Classificação climática de Köppen-Geiger, existem sete tipos climáticos em território paulista: Cwa, Cwb, Aw, Am, Cfa, Cfb e Af. A predominância é do clima tropical de altitude (Cwa), caracterizado por chuvas durante a estação do verão e períodos mais secos durante o inverno e com a temperatura média do mês mais quente ultrapassando  $22^{\circ}C$  (CEPAGRI, 2013).

A precipitação no Estado de São Paulo varia entre 1500 e 2000 mm ano<sup>-1</sup>, com os valores máximos ocorrendo no litoral. A estação seca ocorre no período de junho a agosto, enquanto a estação chuvosa ocorre entre dezembro e fevereiro (JUÁREZ, 2004). Para as regiões produtoras de cana-de-açúcar, as altitudes variam entre 200 e 800 m, de acordo com os dados obtidos pela missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (RABUS, 2003).

Os solos são predominantemente da classe dos Latossolos e dos Argissolos. Os Latossolos estão localizados na parte norte, leste e central do estado, com ocorrência também de Neossolos em algumas dessas áreas. O sul do estado apresenta áreas de Argissolos, Latossolos e Cambissolos, semelhante à região oeste, que apresenta predominância de Argissolos e Latossolos. (OLIVEIRA et al., 1999; SUGAWARA, 2010). A cultura da cana-de-açúcar apresenta uma boa capacidade de adaptação em solos de diferentes texturas, favorecendo a expansão da cultura pelo Estado de São Paulo (KOFFLER; DONZELI, 1987). Segundo INPE (2013), no ano de 2013 foram cultivados mais de 5,76 milhões de hectares da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, dos quais 5,9% corresponderam a expansão da cultura em relação ao ano anterior.

### **3.1.2 Região Administrativa de Ribeirão Preto**

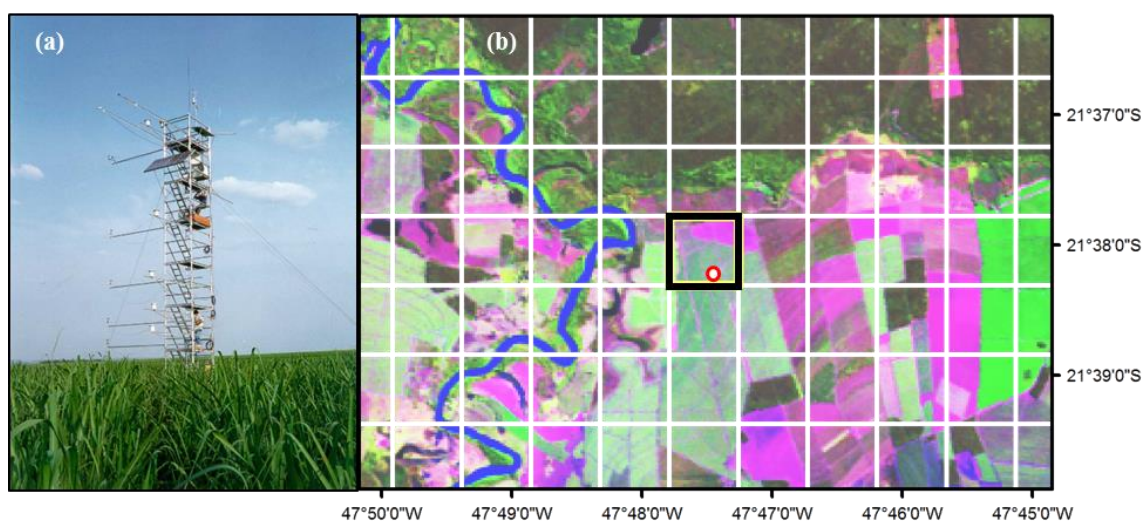
A RA de Ribeirão Preto localiza-se no centro-norte do Estado de São Paulo (**Figura 3.1**), sendo composta por 25 municípios, que ocupam uma área total de 934 800 ha, um total de 3,8% do território paulista, e população de 1.247.761 habitantes. Possui clima tropical, relevo suave e plano, com solos adequados ao desenvolvimento de agricultura tropical. Esses fatores favoreceram o desenvolvimento baseado na agroindústria, destacando-se a forte expansão da produção canavieira na região, o que gerou efeitos na estruturação do espaço regional, com a substituição de outras culturas pela cana-de-açúcar. O agronegócio sucroalcooleiro é o principal indutor de desenvolvimento da economia da RA, de segmentos industriais a ele relacionado, como o setor metal-mecânico ou o de turismo de negócios. (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2012).

Segundo o mapeamento do Projeto Canasat (INPE, 2013), a RA de Ribeirão Preto apresentou uma área cultivada de cana-de-açúcar de aproximadamente 433 mil ha na safra

2005 e 447 mil ha na safra 2006, representando respectivamente 12,88% e 12,21% da área total cultivada no Estado de São Paulo. Verifica-se ainda que a área cultivada de cana-de-açúcar nessas duas safras representa 46,36% e 47,85% da área total desta RA (INPE, 2013).

### 3.2. Sítio experimental

O sítio experimental em área de cana-de-açúcar, do qual foram obtidos os dados meteorológicos de superfície e os dados para validação das estimativas do METRIC está localizado município Luiz Antônio - SP, sobre uma plantação da Companhia Energética Santa Rita (USR). A plataforma instrumental de 7 m de altura situa-se nas coordenadas 21° 38' 13,4" S e 47° 47' 24,9" O (**Figura 3.2**), a 552 m de altitude. A área de cana (>400 ha) apresentava distância entre linhas de 1,4m e declividade menor que 2% e era rodeada por pasto, plantação de citrus e áreas de cerrado (CABRAL et al, 2012; GOMES, 2009).



**Figura 3. 2** (a) Torre de monitoramento de fluxos turbulentos USR – SP. Fonte: Adaptado de Rocha (2004); (b) localização da torre (círculo vermelho) na área de cana-de-açúcar da USR – Imagem Landsat 5 TM de 14/04/2006 (RGB543). A grade branca indica a posição dos *pixels* de 1 km do MODIS, com destaque para o *pixel* central em preto, utilizado na validação das estimativas do METRIC.

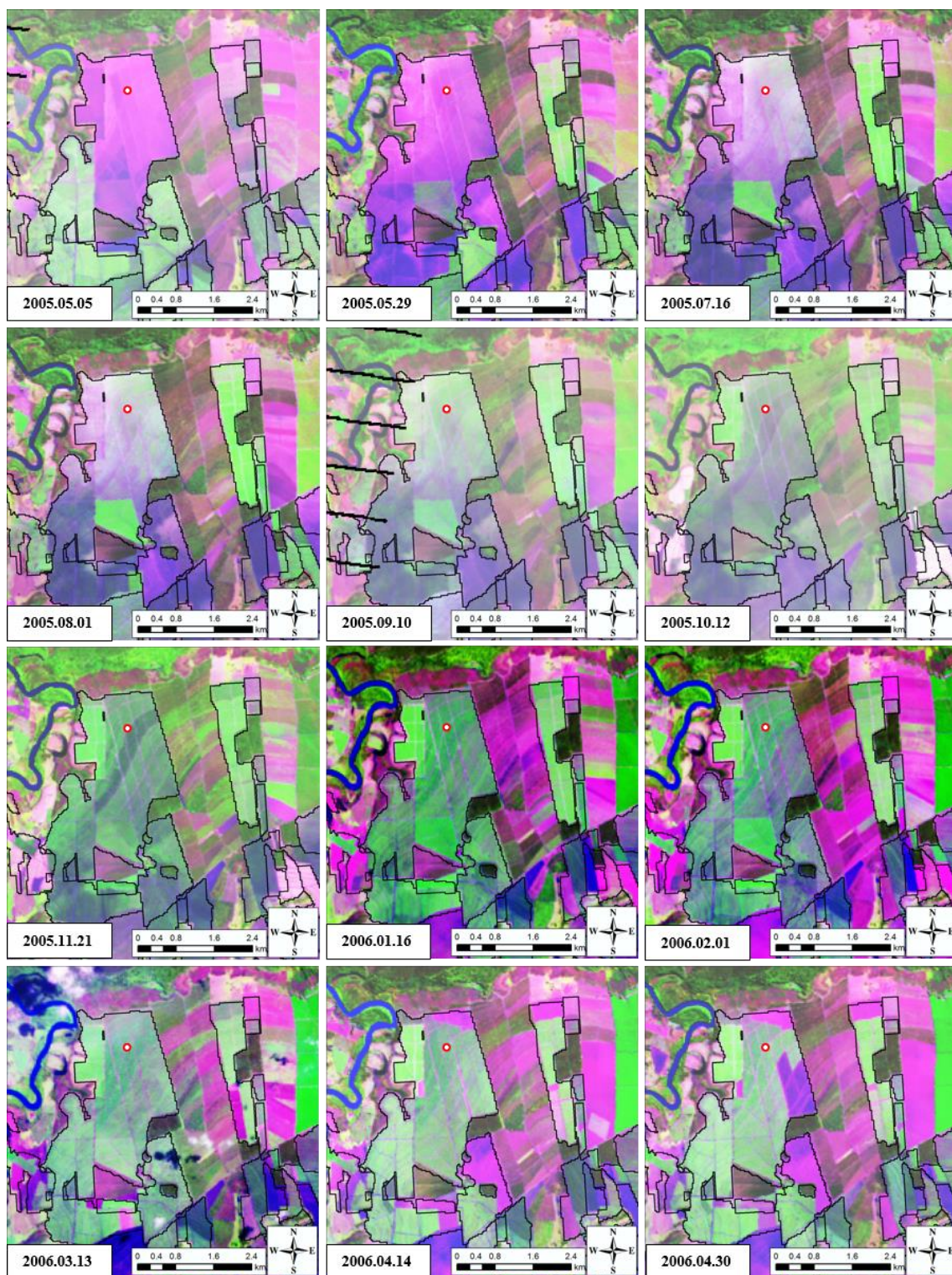
O solo da área é caracterizado como um Latossolo Vermelho-Amarelo, com composição textural de 22% argila, 74% areia e 3% silte. A densidade média a 2,6 m de profundidade é de 1500 kg m<sup>-3</sup>. Foi registrada compactação no solo decorrente de colheitas mecânicas anteriores, entre as profundidades de 10 e 25 cm ( $d_b=1636$  kg m<sup>-3</sup>). A quantidade de água

disponível no solo entre os potenciais de -0,01 kPa e -1500 kPa corresponde a 136 mm no primeiro metro de profundidade, durante período de estudo (CABRAL et al., 2012).

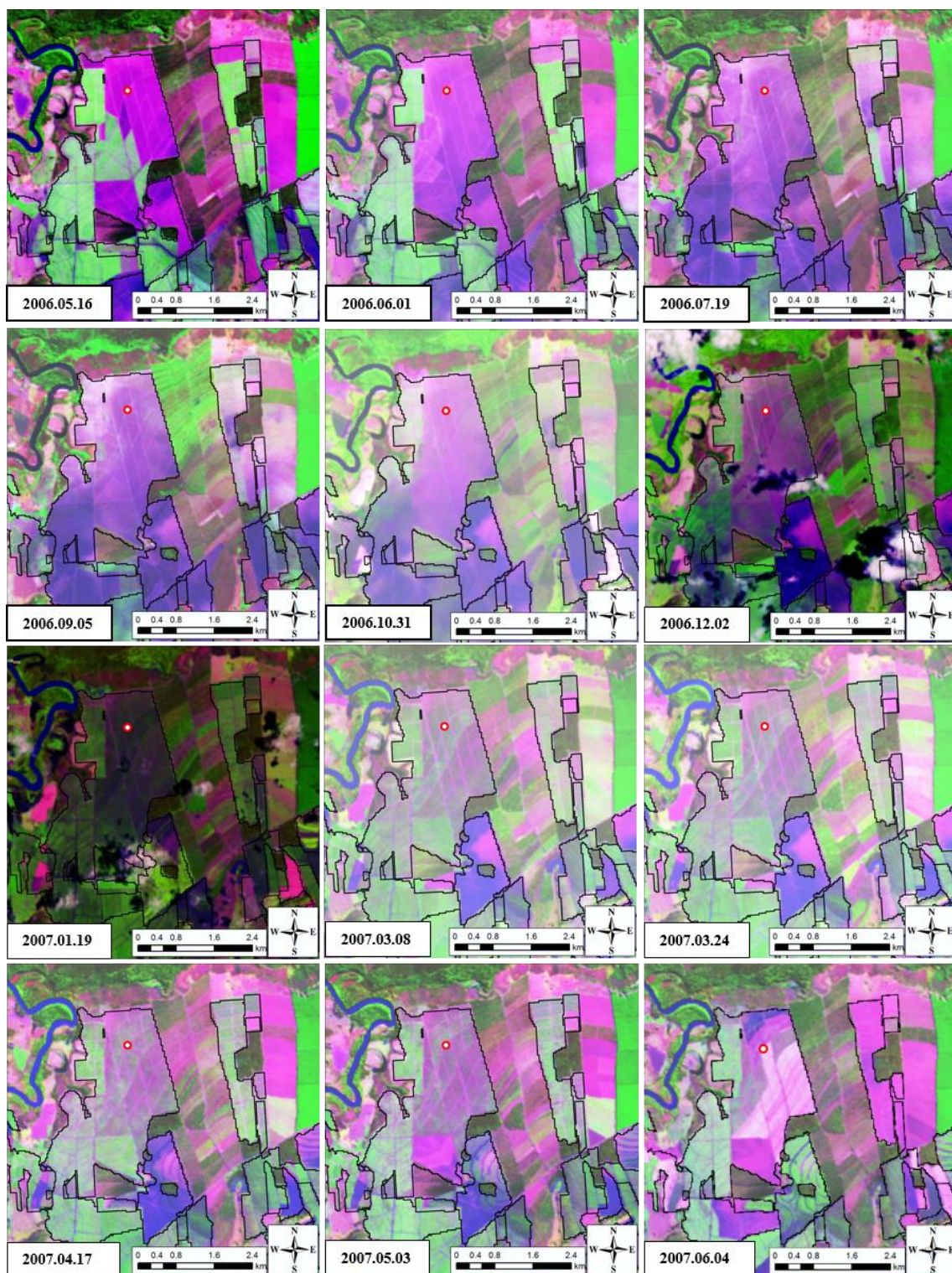
A precipitação anual média na área (entre 1971 e 2007) e desvio padrão corresponde a  $1517 \pm 274$  mm com o máximo em dezembro ( $274 \pm 97$  mm) e o mínimo em julho e agosto ( $27 \pm 34$  mm). A temperatura média anual é de 22°C, variando entre 25°C (janeiro) e 19°C (julho). A ET total na safra 2005 foi de 829 mm (representando 69%) da precipitação, enquanto na safra 2006 foi de 690 mm (CABRAL et al., 2012, TATSCH, 2006).

A cana-de-açúcar foi plantada em 2003, e houve anteriormente duas colheitas com queima da palha (2004 e 2005). Conforme descrito por Cabral et al. (2012), os dados utilizados correspondem ao primeiro ciclo da rebrota, com início em 14 de abril de 2005, estendendo-se até a colheita em 11 maio de 2006 (totalizando 393 dias), e ao segundo ciclo da rebrota, com colheita no dia 20 de maio de 2007 (totalizando 374 dias). As **Figuras 3.3 e 3.4** ilustram o desenvolvimento da cana-de-açúcar na área do sítio experimental durante os dois ciclos avaliados.

Segundo Folhes (2007), o conhecimento da distribuição espacial dos fluxos medidos (análise de pegada ou *footprint*) na torre micrometeorológica permite estimar a adequabilidade do *fetch* associado às direções do vento predominante durante as medidas. O *fetch* corresponde à distância contínua em que o vento pode atuar sobre uma superfície. A contribuição acumulada do fluxo em condições neutras indica que mais de 80% do fluxo medido na cana-de-açúcar provêm de 500 m de distância, considerando medições realizadas a 7 m de altura (RUHOFF, 2011; JUÁREZ, 2004). Segundo Cabral et al. (2012), para o mesmo sítio experimental em área de cana, o *fetch* ao redor da torre abrangia um raio de 500 m, alcançando uma contribuição maior que 90% em condições instáveis, nessa área. Assim, para a validação das estimativas de fluxos do METRIC, considerou-se um raio de 500m ao redor da torre, tornando possível a comparação do valor das estimativas no *pixel* (de resolução espacial 1km) com o valor medido *in situ*.



**Figura 3.3** Imagens TM-Landsat ao longo da safra 2005 (Composição RGB 543). O círculo vermelho indica o local da torre micrometeorológica e as linhas pretas correspondem ao mapeamento do Canasat.



**Figura 3. 4** Imagens TM-Landsat ao longo da safra 2006 (Composição colorida RGB 543). O círculo vermelho indica o local da torre micrometeorológica e as linhas pretas correspondem ao mapeamento do Canasat.

Fundamentando-se nas referências da FAO56 (Allen, 1998) e Evangelista (2011) para a duração das fases fenológicas da cana-de-açúcar, os dados obtidos no sítio experimental, os dados de sensoriamento remoto apresentados nas **Figuras 3.3 e 3.4** e os índices de vegetação e IAF calculados para a área, foram consideradas as fases fenológicas da cultura na área experimental nas safras 2005 e 2006, apresentadas na **Tabela 3.1**.

**Tabela 3.1** Fases fenológicas da cana-de-açúcar no sítio experimental no município de Luiz Antônio durante as safras 2005 e 2006.

| Fase fenológica      | Safrá 2005 |                | Safrá 2006 |                |
|----------------------|------------|----------------|------------|----------------|
|                      | Início     | Duração (dias) | Início     | Duração (dias) |
| <b>Brotação</b>      | 24/04/05   | 30             | 22/05/06   | 31             |
| <b>Perfilhamento</b> | 24/05/05   | 123            | 22/06/06   | 121            |
| <b>Crescimento</b>   | 24/09/05   | 158            | 22/10/06   | 160            |
| <b>Maturação</b>     | 01/03/06   | 72             | 01/04/07   | 50             |

### 3.3. Estimativa dos fluxos de energia e ET por medidas *in situ*

Os dados meteorológicos e de fluxos de energia foram disponibilizados pelo Departamento de Ciências Atmosféricas (IAG/USP), com as devidas correções, processamento e integração para a escala temporal utilizada no estudo. As componentes do balanço de energia foram estimadas com a técnica de correlação dos vórtices turbulentos (*eddy covariance*). Esse método permite a obtenção dos fluxos atmosféricos turbulentos de calor sensível, ET, fluxo de momentum e fluxo total de CO<sub>2</sub> (CARRASCO-BENAVIDES et al., 2012; GOMES, 2009; JUÁREZ, 2004). Segundo Tatsch (2006), os dados com falhas no primeiro e segundo ano totalizaram 20% e 18%, respectivamente. Nesses casos, para o preenchimento de pequenos *gaps* foi utilizado o método “*mean diurnal variation*” (FALGE et al., 2001). Quando o fluxo de calor sensível estava disponível, o fluxo de calor latente foi calculado como o termo residual do balanço de energia.

O método *eddy covariance* (EC) se baseia em medidas diretas do produto das flutuações verticais ( $w'$ ) e flutuações de concentração escalar ( $c'$ ) produzindo uma estimativa direta

de H e LE assumindo que a velocidade média vertical do fluxo é desprezível. Como o método EC estima H e LE separadamente de  $R_n$  e G, o fechamento do balanço de energia em geral não é atendido (TWINE et al., 2000). Dessa forma, para a validação das estimativas do METRIC com os fluxos de energia medidos *in situ*, os dados foram submetidos ao fechamento forçado do balanço de energia por razão de Bowen (EBBR). Esse método utiliza diretamente medidas de  $R_n$ , G, gradientes de temperatura e vapor de água na atmosfera para estimar LE e H, assumindo similaridade entre calor e transporte de vapor e conservação de energia. O erro de fechamento do balanço de energia consiste na diferença entre a soma dos fluxos de calor sensível e latente ( $H + LE$ ) e a energia disponível ( $R_n - G$ ) (TWINE et al., 2000). Erros menores que 10% são normalmente aceitos como um indicativo de medições consistentes dos fluxos turbulentos (FOLHES, 2007).

Foi realizada também uma comparação entre os dados meteorológicos medidos no sítio experimental com os dados horários da série histórica das estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizadas em São Carlos (21,97°S; 47,87°W; elevação 856 m) e São Simão (21,48°S; 47,55°W; elevação 617 m), ambas situadas a menos de 50km do sítio experimental. Como os dados se mostraram compatíveis, os dados meteorológicos observados no sítio experimental foram considerados adequados para a determinação da  $ET_o$  por meio do método Penman Monteith (ASCE-EWRI, 2005).

Os instrumentos utilizados no sítio experimental são apresentados na **Tabela 3.2**, havendo uma descrição mais detalhada em Tatsch (2006) e Cabral et al. (2012).



**Tabela 3.2** Variáveis medidas no sítio experimental, instrumentação e geometria.

| Variável  | Símbolo  | Sensor                                      | Posição (m) |
|---|--|---|-------------|
| Temperatura do ar                                 | T (°C)   | Psicrômetro CSI<br>HMP45C                   | 8,5         |
| Umidade relativa                                  | UR (%)   | Psicrômetro CSI<br>HMP45C                   | 8,5         |
| Precipitação                                      | Prec (mm)  | Pluviômetro<br>Hydrological<br>Services     | 8,5         |
| Velocidade do vento                               | U (m.s <sup>-1</sup> )   | Anemômetro RM<br>Young                      | 8,5         |
| Direção do vento                                  | Dir (°)  | Anemômetro RM<br>Young                      | 8,5         |
| Pressão atmosférica                               | P <sub>atm</sub> (hPa)   | Barômetro<br>Vaisala<br>PTB101B             | 1           |
| Irradiância solar global<br>incidente e refletida | K <sub>i</sub> e K <sub>r</sub> (W m <sup>-2</sup> )                                       | Piranômetro<br>Licor 200X                   | 8,5         |
| RFA incidente e<br>refletida                      | RFA <sub>i</sub> e RFA <sub>r</sub> (W m <sup>-2</sup> )                                   | PAR LITE Kipp<br>& Zonen<br>PAR             | 8,5         |
| Saldo de radiação                                 | R <sub>n</sub> (W m <sup>-2</sup> )  | Saldo-<br>Radiômetro<br>REBS                | 8,5         |
| Fluxo de calor no solo                            | G (W m <sup>-2</sup> )   | REBS HFT3                                   | 0,02        |
| Fluxo de calor latente<br>e CO <sub>2</sub>       | LE (W m <sup>-2</sup> ) Fc (μmol de<br>CO <sub>2</sub> .m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | Anemômetro<br>sônico Gill R2-A<br>e LI 6262 | 10,5        |
| Fluxo de calor<br>Sensível                        | H (W m <sup>-2</sup> )   | Anemômetro<br>sônico Gill R2-A              | 10,5        |

Fonte: Adaptado de Tatsch (2006).

### 3.4. Produtos MODIS

Os produtos MODIS utilizados são distribuídos de forma gratuita pelo *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LPDAAC). Eles foram obtidos no formato HDF (*Hierarchy Data Format*), com projeção Sinusoidal, e convertidos para o formato GEOTIFF (*Tagged Image File Format*) por meio da ferramenta MRT (*Modis Reprojection Tools*), desenvolvida pelo *Earth Resources Observation System Data Center* (EDC) e pelo LPDAAC. No processamento no MRT, definiu-se a saída para todos os produtos em Coordenadas Geográficas (Lat-Long) e Datum WGS84. A **Tabela 3.3**

apresenta os produtos MODIS utilizados e suas características. Para recobrir o Estado de São Paulo foram utilizados os tiles h13v10 e h13v11.

**Tabela 3.3** Produtos MODIS utilizados e suas características.

| Sigla          | Produto MODIS   | Tipo Raster | Res. Espacial | Res. Temporal |
|----------------|---|-------------|---------------|---------------|
| <b>MOD09GA</b> | Reflectância de superfície ( $\rho_s$ )                           | tile        | 500 m         | diário        |
| <b>MOD11A1</b> | Emissividade e temperatura de superfície ( $\epsilon_s$ , $T_s$ ) | tile        | 1000 m        | diário        |
| <b>MOD16A2</b> | Evapotranspiração (ET)  | tile        | 1000 m        | 8 dias        |

#### 3.4.1. Produto de reflectância de superfície

Segundo Vermote e Vermeulen (1999), o produto MOD09 é uma estimativa da reflectância de superfície, sendo computado a partir do nível 1A nas bandas 1 a 7 com os comprimentos de onda centrados em 0,648  $\mu\text{m}$ , 0,858  $\mu\text{m}$ , 0,470  $\mu\text{m}$ , 0,555  $\mu\text{m}$ , 1,240  $\mu\text{m}$ , 1,640  $\mu\text{m}$ , e 2,130  $\mu\text{m}$ , respectivamente. O produto MOD09GA disponibiliza as bandas de reflectância com resolução espacial de 500 m em projeção Sinusoidal e repetitividade diária.

Para a correção atmosférica, os procedimentos foram estabelecidos a partir do modelo denominado Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum Radiative Code (6S), desenvolvido por Vermote et al. (1997). Tal produto é utilizado como dado de entrada para obtenção de diversos outros produtos da superfície terrestre, tais como função de distribuição de reflectância bidirecional (BRDF), albedo, fração de radiação fotossinteticamente ativa (FPAR), IAF e índices de vegetação.

#### 3.4.2. Produto de emissividade e reflectância de superfície (MOD11A1)

Os dados de emissividade e temperatura de superfície utilizados são provenientes do produto MOD11A1 (*Land Surface Temperature and Emissivity*), Coleção 5, com resolução espacial de 1000 m, em Projeção Sinusoidal e repetitividade diária. O produto

MOD11 incorpora em seu algoritmo dados de emissividade, ângulo de visada (para corrigir os efeitos atmosféricos), informações sobre a reflectância da superfície, emissão, absorção e dispersão atmosférica, radiação solar do dia, além de incluir dados topográficos da superfície (WAN, 1999). A metodologia de estimativa de  $T_s$  pelo produto MOD11 é descrita por Scherer-Warren (2011).

Segundo Ruhoff (2011), a temperatura de superfície ( $T_s$ ) é muito importante para descrever os processos da superfície terrestre, sendo utilizado em estudos climáticos, hidrológicos e biológicos. Segundo Giongo (2011), para áreas com cobertura vegetal, as variações na temperatura de superfície podem ocorrer devido à diversos fatores como radiação incidente, umidade da folha, fatores intrínsecos a planta entre outros. As estimativas de  $T_s$  são realizadas para dias sem cobertura de nuvens, empregando-se a máscara de nuvens (MOD35L2) para excluir os *pixels* afetados.

A emissividade de superfície é a razão entre a energia eletromagnética emitida pela superfície a certa temperatura e a energia eletromagnética emitida por um corpo negro à mesma temperatura (ALLEN et al., 2002). A emissividade, em especial na região do infravermelho termal, desempenha um papel importante no estudo do clima, interação terra-atmosfera, balanço de radiação, clima e meio ambiente (OLIVEIRA, 2012).

### **3.4.3. Produto de evapotranspiração (MOD16A2)**

O algoritmo MOD16 (MU et al., 2007) utiliza dados do sensor MODIS (Terra e Aqua) para estimar a evapotranspiração de superfície em escala global com base na equação de Penman-Monteith, adaptada para a inserção de dados de sensoriamento remoto. As estimativas de ET do MOD16 são realizadas utilizando o algoritmo melhorado por Mu et al. (2011), com relação ao algoritmo antigo (MU et al., 2007).

A acurácia do produto MOD16 foi avaliada por Ruhoff (2011) para uma área do bioma Cerrado na região Sudeste do Brasil durante o ano de 2001. Nesse estudo foram comparadas as estimativas deste produto com dados observados em sistemas de monitoramento de vórtices turbulentos instalados em área de cerrado e de cana-de-açúcar, além de estimativas de um modelo hidrológico. Para as áreas de cana-de-açúcar o MOD16

subestimou a ET em 13% em comparação com a ET observada. Os melhores resultados foram obtidos para as estimativas em escala mensal e anual para grandes áreas.

### 3.5. Modelo numérico RegCM4

O modelo meteorológico RegCM4 (*Regional Climate Model System*) pode ser considerado como um modelo numérico de área limitada, caracterizado pela boa consistência na representação dos fenômenos meteorológicos (GIORGI et al., 2012). A eficácia do modelo depende das condições iniciais e de contorno lateral provenientes de modelos globais, necessárias para o pré-processamento. O modelo também necessita de dados de temperatura de superfície do mar, altimetria, índice de área foliar, uso e cobertura da terra, tipo funcional da vegetação, textura e cor do solo, entre outras (PEREIRA, 2012).

Este modelo foi utilizado para gerar dados meteorológicos espacializados, de forma a expandir as estimativas do modelo METRIC para o Estado de São Paulo, uma vez que os dados meteorológicos pontuais obtidos no sítio experimental limitam a validade das estimativas do METRIC em algumas centenas de quilômetros, dependendo das condições de relevo e cobertura do solo na área (ALLEN et al., 2007a).

As simulações com o RegCM4 foram iniciadas com a atualização dos mapas de uso do solo para os anos de 2005, 2006 e 2007 no modelo de superfície *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme* (BATS). Nesse processo, os mapas do projeto Canasat para o Estado de São Paulo foram compatibilizados no SPRING 4.3.3 e incorporados ao mapa de uso do solo do BATS. Então, juntamente com os dados de entrada que alimentam o RegCM4, o mapa de uso do solo atualizado foi inserido no modelo para a realização das simulações. A simulação no RegCM4 foi realizada para uma grade de 10 km de resolução espacial, fornecendo os dados das variáveis apresentadas na **Tabela 3.4**, utilizados como entrada no algoritmo adaptado do METRIC. Esses dados foram obtidos como *raster*, com resolução espacial de 10 km, Sistema de Projeção Geográfica e Datum WGS84.

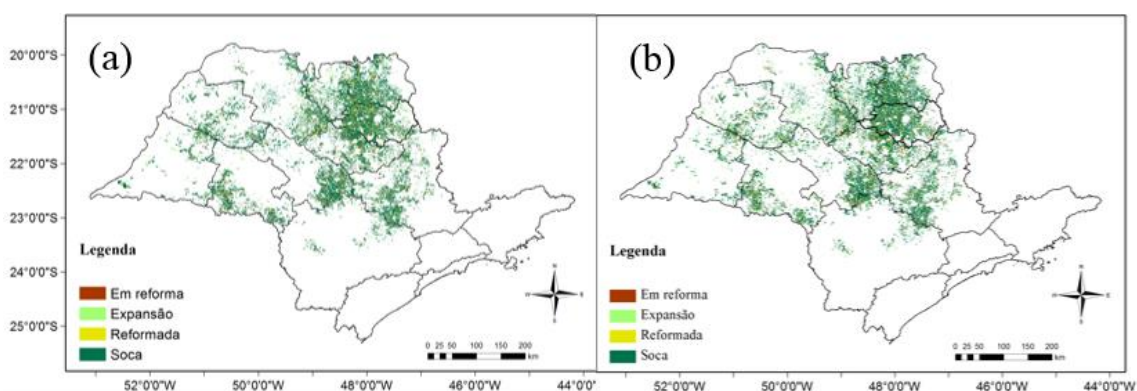
**Tabela 3.4** Dados simulados pelo modelo numérico RegCM4 para alimentação do modelo METRIC.

| <b>Símbolo</b>        | <b>Variável</b>          | <b>Unidade</b>       |
|-----------------------|--------------------------|----------------------|
| <b>u, v</b>           | Velocidade do vento      | m.s <sup>-1</sup>    |
| <b>T<sub>a</sub></b>  | Temperatura da atmosfera | K                    |
| <b>ET<sub>a</sub></b> | Evapotranspiração real   | mm dia <sup>-1</sup> |

### 3.6. Mapeamento do projeto Canasat

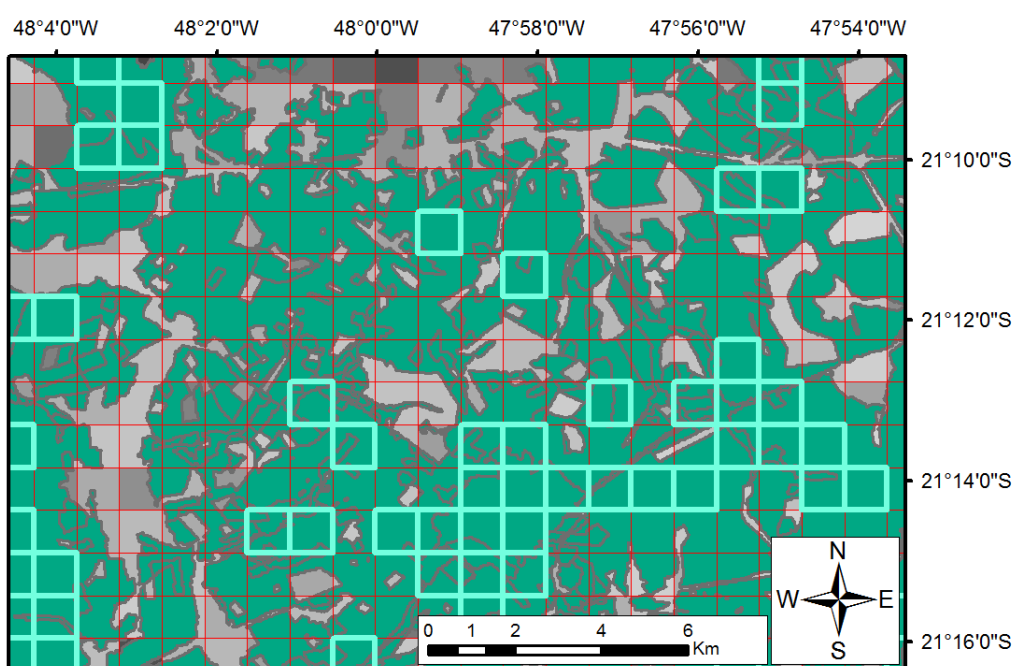
Considerando a rápida expansão e as características favoráveis da cultura da cana-de-açúcar para ser monitorada por imagens de satélite, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) realizou entre 2003 e 2013 o Projeto Canasat, com mapeamento anual das áreas cultivadas de cana-de-açúcar na região Centro-sul do Brasil utilizando principalmente as imagens dos satélites Landsat (RUDORFF et al., 2010). O Projeto foi desenvolvido e realizado pelo INPE em parceria com a União da Agroindústria Canavieira (UNICA), com o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e com o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA).

Os mapas temáticos de cultivo da cana-de-açúcar utilizados neste estudo correspondem às safras 2005 e 2006 (**Figura 3.5**), nos quais as classes “cana-planta”, “cana soca” e “reformada” foram agrupadas em uma única classe, enquanto a classe “em reforma” foi excluída. Dessa forma, a avaliação abrange a área total de cana-de-açúcar disponível para colheita em cada safra.



**Figura 3.5** Mapas temáticos das áreas de cultivo da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo para as safras de (a) 2005 e (b) 2006. Fonte: INPE (2013).

As estimativas do modelo METRIC na RA de Ribeirão Preto foram extraídas para os *pixels* puros em áreas de cana-de-açúcar, ou seja, para os *pixels* do MODIS (1km) totalmente preenchidos com áreas da cultura. Para tanto, foi realizado um procedimento no ArcGIS 10.1, com a ferramenta Hawth's Tools (BEYER, 2004), onde a grade das células da imagem MODIS foi vetorizada e cruzada com os polígonos do mapeamento do Canasat. Deste modo, calculou-se a proporção de área que os polígonos do Canasat representavam em cada célula, selecionando-se em seguida as células com 100% de proporção, conforme ilustrado pela **Figura 3.6**.

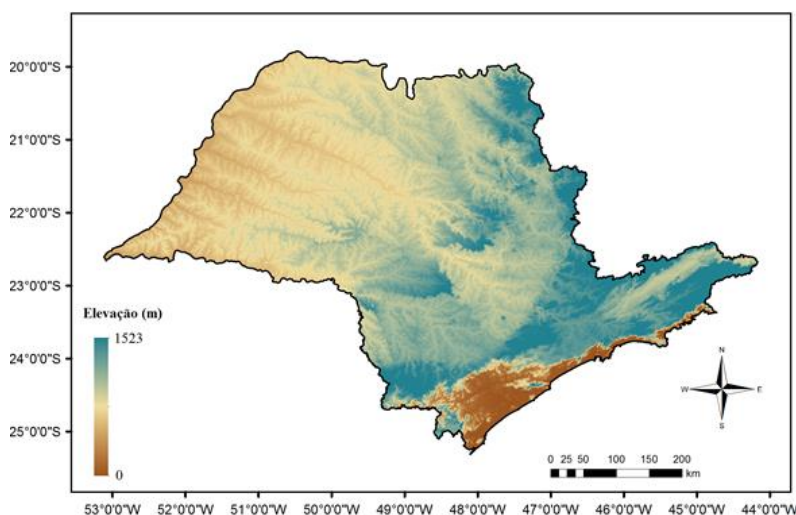


**Figura 3. 6** Seleção de *pixels* puros (células em ciano) do MODIS em áreas de cana-de-açúcar para extração dos valores das estimativas do modelo METRIC em imagens com resolução espacial de 1km. As linhas vermelhas indicam a grade das células do MODIS.

### 3.7. Modelo digital de elevação

O modelo digital de elevação (MDE) do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (MIRANDA, 2005), com aproximadamente 90 m de resolução espacial (**Figura 3.7**), foi utilizado para alimentar o modelo METRIC, com ajuste de sua resolução espacial à dos dados MODIS por meio do método de reamostragem por vizinho mais próximo. O MDE

foi utilizado no processamento do algoritmo do fluxo de calor sensível para o Estado de São Paulo. Nas estimativas de H para a RA de Ribeirão Preto, o valor de elevação utilizado foi o do *pixel* no qual encontrava-se o sítio experimental.



**Figura 3.7** Modelo digital de elevação obtido do SRTM para o Estado de São Paulo, com resolução espacial de 90m, em Coordenadas Geográficas, Datum WGS84.

### 3.8. Implementação do modelo METRIC

O modelo METRIC foi implementado no *Model Maker* do software *ERDAS IMAGINE 10*, sendo alimentado com dados meteorológicos e produtos MODIS. As estimativas simulações para a RA de Ribeirão Preto empregaram os dados meteorológicos da torre instalada em área de cana-de-açúcar no município de Luís Antônio-SP. Já para as estimativas realizadas para o Estado de São Paulo, os dados meteorológicos utilizados foram os simulados pelo RegCM4.

Os dados de sensoriamento remoto foram selecionados previamente de acordo com sua qualidade quanto à cobertura de nuvens, ângulo de visada do sensor sobre a área de interesse e condições de umidade do solo nas respectivas datas, avaliadas com o balanço hídrico descrito por Allen (1998). As datas selecionadas para o processamento do METRIC, seguindo os critérios acima descritos, são apresentadas na **Tabela 3.5**.

**Tabela 3.5** Datas das simulações com o METRIC para a RA de Ribeirão Preto e para o Estado de São Paulo.

| Safra 2005   |             | Safra 2006   |             |
|--------------|-------------|--------------|-------------|
| Data         | Dia juliano | Data         | Dia juliano |
| 05/05/2005   | 125         | 02/06/2006   | 153         |
| 04/06/2005   | 155         | 04/07/2006   | 185         |
| 13/07/2005   | 194         | 20/07/2006   | 201         |
| 02/08/2005   | 214         | 06/09/2006   | 249         |
| 10/09/2005   | 253         | 13/09/2006   | 256         |
| 03/10/2005 * | 276         | 29/10/2006 * | 302         |
| 13/11/2005   | 317         | 23/02/2007 * | 54          |
| 06/02/2006 * | 37          | 31/03/2007   | 90          |
| 01/03/2006   | 60          | 02/04/2007   | 92          |
| 01/04/2006   | 91          | 02/05/2007   | 122         |
| 21/04/2006   | 111         |              |             |
| 03/05/2006   | 123         |              |             |

\* datas das simulações para o Estado de São Paulo com dados meteorológicos do RegCM4.

O modelo METRIC foi desenvolvido originalmente para aplicação com imagens Landsat. Para a aplicação com produtos MODIS e dados meteorológicos espacializados do RegCM4, os algoritmos foram modificados e adaptados de acordo com as características desses dados. A descrição a seguir apresenta o modelo adaptado para este estudo.

### 3.8.1. Estimativa do balanço de radiação ( $R_n$ )

De acordo com Allen et al. (2007a), o cálculo do balanço de radiação na superfície ( $R_n$ ) é realizado segundo a **Equação 2.2**, sendo o albedo e emissividade da superfície estimados conforme descrição a seguir:

- **Albedo ( $\alpha$ ):** O albedo foi calculado segundo o modelo proposto por Liang (2000) para as bandas de reflectância do produto MOD09GA.

$$\alpha = 0.160 \rho_1 + 0.291 \rho_2 + 0.243 \rho_3 + 0.116 \rho_4 + 0.112 \rho_5 + 0.081 \rho_7 - 0.0015 \quad (3.1)$$



- **Emissividade da superfície ( $\epsilon_s$ ):** Para a emissividade da superfície foi utilizada a média aritmética entre as emissividades das bandas 31 e 32 do produto MOD11A1.
- **Radiação solar incidente ( $K_{\downarrow}$ ):** é o fluxo de radiação solar direta e difusa que incide na superfície terrestre integrado no espectro eletromagnético (ALLEN et al., 2007a), calculado conforme a **Equação 3.2**:

$$K_{\downarrow} = G_{sc} \times \cos\theta_z \times \left(\frac{d_m}{d}\right)^2 \times \tau \quad (3.2)$$

em que  $G_{sc}$  é a constante solar ( $1367 \text{ W m}^{-2}$ ),  $\theta_z$  corresponde ao ângulo zenital solar (rad),  $d_m$  e  $d$  são, respectivamente, as distâncias média e instantânea entre a Terra e o Sol (km) e  $\tau$  é a transmitância atmosférica no instante da passagem do satélite.

O ângulo zenital solar é calculado a partir do ângulo solar  $\beta$ , obtido no cabeçalho das imagens MODIS.

$$\cos\theta_z = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \quad (3.3)$$

O quadrado da razão entre as distâncias média e instantânea entre a Terra e o Sol pode ser obtido conforme apontado por Duffie e Beckman (1980), em que  $d_j$  é o dia ocorrido no ano, a partir de um calendário Juliano:

$$\left(\frac{d_m}{d}\right)^2 = 1 + 0,33 \cos\left(\frac{2\pi d_j}{365}\right) \quad (3.4)$$

A transmitância atmosférica é calculada da seguinte forma:

$$\tau = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z \quad (3.5)$$

em que  $z$  corresponde a altitude (m).

- **Radiação de ondas longas incidente na superfície ( $L_{w\downarrow}$ ):** é a radiação infravermelho termal incidente na superfície decorrente do aquecimento da atmosfera (ALLEN et al., 2007a). É calculada utilizando a equação de Stefan-Boltzman:

$$L_{w\downarrow} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (3.6)$$

em que  $\varepsilon_a$  é a emissividade da atmosfera,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ) e  $T_a$  é a temperatura do ar (K) próxima à superfície.

A emissividade atmosférica é calculada como descrito por Allen et al. (2007a).

$$\varepsilon_a = 0,85 (-\ln \tau)^{0,09} \quad (3.7)$$

- **Radiação de ondas longas emitida pela superfície ( $L_{w\uparrow}$ ):** é o fluxo de radiação infravermelho termal emitido pela superfície terrestre (ALLEN et al., 2002). A emissividade e a temperatura de superfície utilizadas nesse cálculo foram obtidas do produto MOD11A1. O cálculo é realizado através da equação de Stefan-Boltzmann, aplicando o produto de emissividade e temperatura da superfície do produto MOD11A1:

$$L_{w\uparrow} = \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (3.8)$$

em que  $\varepsilon_s$  é a emissividade da superfície e  $T_s$  é a temperatura da superfície (K).

### 3.8.2. Estimativa do fluxo de calor no solo (G)

Conforme observado por Bastiaanssen (2000), as medidas de fluxo de calor no solo necessitam de dados do gradiente de temperatura entre o solo e a atmosfera, dificultando a descrição desse gradiente com base em dados orbitais. Dessa forma, para estimar o fluxo de calor no solo utilizando dados de sensoriamento remoto, faz-se uma aproximação empírica utilizando o balanço de radiação.

$$G = R_n \left[ \frac{T_s}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2)(1 - 0,98 \text{ NDVI}^4) \right] \quad (3.9)$$

em que  $R_n$  é o balanço de radiação ( $\text{W m}^{-2}$ ),  $T_s$  é a temperatura da superfície (em  $^{\circ}\text{C}$ ),  $\alpha$  é o albedo calculado segundo Liang (2000) e NDVI foi calculado segundo apresentado na **Tabela 2.2**.

### 3.8.3. Estimativa do fluxo de calor sensível (H)

A estimativa de H se realiza conforme a **Equação 2.4**. Para as estimativas de H com o modelo METRIC, deve-se escolher dois *pixels* da cena, denominados “*pixels* âncoras”, para se determinar a variação de temperatura ( $dT$ ), entre dois níveis de referência ( $z_1$  e  $z_2$ ), assim como a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $r_a$ ) em cada *pixel* (ALLEN et al., 2007a, GOMES, 2009).

Inicialmente calcula-se o coeficiente de rugosidade ( $Z_{0m}$ ) da estação meteorológica, utilizando os dados de velocidade do vento e altura média da vegetação, conforme a **Equação 3.10** (Brutsaert, 1982).

$$Z_{0m} = 0.12 h \quad (3.10)$$

em que  $h$  é a altura média da vegetação (m).

O algoritmo calcula inicialmente a velocidade de fricção do vento ( $u^*$ ), considerando-se a condição de estabilidade neutra.

$$u^* = \frac{k u}{\ln\left(\frac{z}{Z_{0m}}\right)} \quad (3.11)$$

em que  $k$  é a constante de Von Karman ( $k=0,41$ ),  $u$  é a velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) medida a uma altura  $z$  (m).

Considerando-se a atmosfera em equilíbrio neutro, é estimada a velocidade do vento para o nível em que já não há interferência da rugosidade de superfície, o que torna possível assumir que a velocidade do vento é constante para toda a imagem de satélite (ALLEN et

al., 2007a). Esse nível é alcançado a  $z=100$  m, mas em regiões montanhosas tem sido proposto  $z=200$  m (GOMES, 2009).

$$u_{200} = u^* \frac{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right)}{k} \quad (3.13)$$

Aplicando a velocidade do vento a 200 m, a velocidade de fricção será:

$$u^* = \frac{k u_{200}}{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right)} \quad (3.14)$$

O coeficiente de rugosidade ( $z_{0m}$ ) para cada *pixel* é calculado conforme apresentado por Tasumi (2003).

$$z_{0m} = 0.0018 \text{ IAF} \quad (3.15)$$

em que o IAF é calculado em função do SAVI (ALLEN et al., 2007a), determinado para cada *pixel* com os dados do produto MOD09GA. A resistência aerodinâmica ( $r_a$ ) é determinada por um processo iterativo, conforme descrito por Allen et al. (2007a).

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u^* k} \quad (3.16)$$

em que  $z_1$  e  $z_2$  são alturas acima do plano zero de deslocamento em relação à superfície vegetada. Foram considerados os valores de  $z_1=0,1$  m e  $z_2=2,0$  m conforme utilizado por Gomes (2009).

O passo seguinte consiste em calcular a diferença de temperatura próxima à superfície ( $dT$ ) para cada *pixel*, obtida através da relação linear entre  $dT$  e  $T_s$ , apresentada na **Equação 3.17**.

$$dT = a + bT_s \quad (3.17)$$

Os coeficientes  $a$  e  $b$  são determinados a partir dos *pixels* quente e frio. O processo de escolha dos *pixels*-âncora é importante e deve ser feito com critério, de modo que os *pixels*

representem as condições extremas dos fluxos de calor (OLIVEIRA, 2012). Devido à dificuldade que a resolução espacial das imagens MODIS proporciona na escolha dos *pixels* âncoras, foram utilizadas imagens Landsat TM e ETM+ de datas próximas como referência para selecionar áreas adequadas como candidatas a *pixel* quente ou frio.

Para o *pixel* quente, Allen et al. (2007a) propõe escolher um *pixel* em área agrícola sem cobertura vegetal, de forma a anular o fluxo de calor latente e maximizando o fluxo de calor sensível. O balanço hídrico diário proposto pela FAO-56 (ALLEN, 1998) foi aplicado para verificar se a ET é nula no *pixel* quente, ou se há uma componente de evaporação devido a precipitação ou outro evento (GOMES, 2009). Nesse caso, H no *pixel* quente será:

$$H_{\text{quente}} = (R_n - G)_{\text{quente}} - LE_{\text{quente}} \quad (3.18)$$

em que  $R_{n\_quente}$  é o balanço de radiação ( $W\ m^{-2}$ ) e  $G_{quente}$  é o fluxo de calor no solo ( $W\ m^{-2}$ ), obtidos no *pixel* quente da imagem.

Para o *pixel* frio, tem-se que:

$$H_{\text{frio}} = (R_n - G)_{\text{frio}} - LE_{\text{frio}} \quad (3.19)$$

O termo  $LE_{frio}$  é assumido como  $1,20\ ET_o$ , conforme descrito por Tasumi (2003). O gradiente de temperatura no *pixel* frio é calculado como:

$$dT_{\text{frio}} = \frac{H_{\text{frio}} r_{ah\_frio}}{\rho_{ar} C_p} \quad (3.20)$$

E para o *pixel* quente:

$$dT_{\text{quente}} = \frac{H_{\text{quente}} r_{ah\_quente}}{\rho_{ar} C_p} \quad (3.21)$$

Assim, os coeficientes a e b da relação linear entre dT e  $T_s$  são calculados através do sistema:

$$dT_{\text{quente}} = b + aT_{s_{\text{quente}}} \quad (3.22)$$

$$dT_{\text{frio}} = b + aT_{s_{\text{frio}}} \quad (3.23)$$

em que  $T_{s_{\text{quente}}}$  e  $T_{s_{\text{frio}}}$  correspondem à temperatura do *pixel* quente e do *pixel* frio, respectivamente.

Após a determinação da relação linear entre  $dT$  e  $T_s$ , aplica-se um procedimento iterativo que resulta na condição de estabilidade da atmosfera em todos os *pixels*, segundo a teoria de Monin-Obukhov. O procedimento é detalhado em Allen et al. (2007a).

### 3.8.4. Fluxo de calor latente (LE) e ET

Dado que o fluxo de calor latente o termo residual do balanço de energia, seu cálculo é realizado segundo a **Equação 2.1**.

O METRIC estima a  $ET_{a\_M}$  considerando que a  $F_{i\_M}$  é igual à média de  $F$  durante o dia, supondo que  $F$  se mantém constante ao longo do dia (8:00 às 18:00) (ALLEN et al., 2007a), segundo a **Equação 3.24**:

$$ET_{a\_M} = ET_o \cdot F_{i\_M} \quad (3.24)$$

em que  $ET_{a\_M}$  é a ET diária calculada para cada *pixel* pelo METRIC ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $ET_o$  é a ET de referência acumulada em 24 horas ( $\text{mm dia}^{-1}$ ),  $F_{i\_M}$  é a fração da  $ET_o$  no momento da passagem do satélite, estimada pelo METRIC. A  $ET_o$  foi calculada segundo o método Penman Monteith (ASCE-EWRI, 2005), pelo software Ref-ET v3.1 (ALLEN, 2013).

$$ET_o = \sum_{i=1}^{24} ET_{oh} \quad (3.25)$$

em que  $ET_{oh}$  é a ET de referência horária. O método ASCE Penman Monteith aplica a **Equação 3.26**.

$$ET_{oh} = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_{n_o} - G_o) + \gamma \cdot \frac{37}{T_{a_o} + 273.16} \cdot u_2 \cdot VPD}{\Delta + \gamma \cdot (1 + C_d \cdot u_2)} \quad (3.26)$$

em que  $R_{n_o}$  é o saldo de radiação na superfície de referência ( $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ),  $G_o$  é o fluxo de calor no solo na superfície de referência ( $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ),  $\gamma$  é a constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $T_{a_o}$  é a temperatura do ar na superfície de referência ( $^\circ\text{C}$ );  $u_2$  é a velocidade do vento a 2m ( $\text{m s}^{-1}$ );  $VPD$  é o déficit de pressão de vapor ( $\text{kPa}$ );  $\Delta$  é a inclinação da curva de saturação ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) e  $C_d$  é um fator de correção (0.24 para dia e 0.96 para noite).

O valor de  $F_{i_M}$  é calculado como:

$$F_{i_M} = K_{c_M} = \frac{ET_{i_M}}{ET_{oh_i}} \quad (3.27)$$

em que  $ET_{i_M}$  é a ET instantânea calculada pelo METRIC para cada *pixel* no momento da passagem do satélite ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  $ET_{oh_i}$  é a ET de referência no momento da passagem do satélite e  $F_{i_M}$  é o mesmo que o coeficiente da cultura ( $K_c$ ), pois o modelo assume que  $F_{i_M}$  é constante ao longo do dia, sendo portanto igual a média de valores de  $F$  durante o dia (TASUMI et al., 2005; ALLEN, 2007a; CARRASCO-BENAVIDES et al., 2012).

No instante da passagem do satélite, a ET é calculada para cada *pixel* pela **Equação 3.28**.

$$ET_{i_M} = 3600 \frac{LE}{\lambda \rho} \quad (3.28)$$

Em que  $\rho$  é a densidade da água,  $\lambda$  é o calor latente de vaporização (**Equação 3.29**) e 3600 converte segundos para hora.

$$\lambda = [2.501 - 0.00236(T_s - 273.15)] \times 10^6 \quad (3.29)$$

### 3.9. Estimativas com o RegCM4

Os dados meteorológicos espacializados gerados com o RegCM4 foram inseridos no METRIC, de modo a superar a limitação de estimativas locais que as medidas *in situ*

proporcionam e, dessa forma, obter estimativas de  $ET_a$  para o Estado de São Paulo. Foram realizadas adaptações no algoritmo do METRIC no software *ERDAS IMAGINE*, inserindo a velocidade do vento ( $u_{200}$ ) como *raster* no cálculo de H, e a temperatura da atmosfera ( $T_a$ ) como *raster* no cálculo de  $R_n$ . Os procedimentos seguintes, até se chegar aos mapas de  $ET_a$ , foram os mesmos realizados para as estimativas com dados meteorológicos observados no sítio experimental.

As estimativas de  $ET_a$  utilizando os dados do RegCM4 foram restritas a duas datas para cada safra avaliada (**Tabela 3.5**), pois este procedimento encontra-se em fase de teste e espera-se em trabalhos futuros melhorar o método para estimativas de ET em escalas maiores. As datas foram selecionadas na época da transição entre a estação seca e a chuvosa e no período onde a cultura já apresenta maior desenvolvimento, na estação chuvosa.

### **3.10. Validação das estimativas**

O valor das estimativas das variáveis simuladas pelo METRIC foi obtido do *pixel* em que a torre de monitoramento de fluxos turbulentos estava situada (**Figura 3.2**). Dessa forma, a validação se deu por comparação entre os valores simulados pelo modelo e os observados *in situ*, por meio de análise de regressão. Para as componentes do balanço de energia, a comparação se deu para os valores registrados no momento da passagem do satélite.

A avaliação das estimativas de  $ET_a$  e F (ou  $K_c$ ) se deu por comparação dos valores diários, coeficiente de determinação ( $R^2$ ), Raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e erro absoluto médio (MAE) (MAYER; BUTLER, 1993). Além disso, foi realizado o teste *t* para verificar se a relação entre as estimativas é significativamente diferente de 1, com um nível de confiança de 95%.

Para as estimativas realizadas pelo METRIC para o Estado de São Paulo com dados meteorológicos do RegCM4, a comparação foi feita com os valores observados *in situ*, com os resultados obtidos pelo METRIC com dados meteorológicos de superfície, com



as estimativas de ET do produto MOD16 (composições de 8 dias) e também com a estimativa de ET do modelo RegCM4.

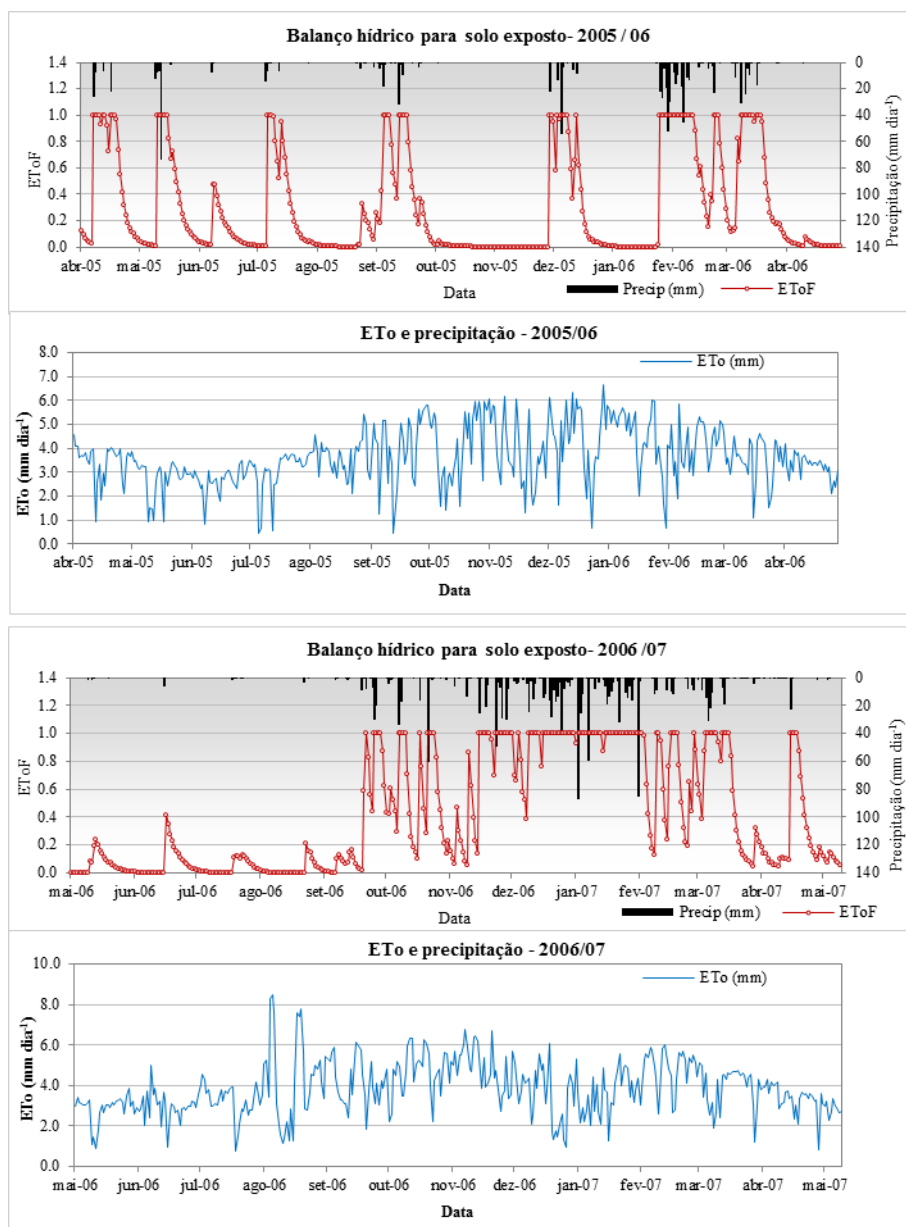


## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Balanço hídrico no sítio experimental

O balanço hídrico no sítio experimental foi realizado segundo o método da FAO56 (ALLEN, 1998), através da obtenção da condição de umidade do solo ao longo dos dois ciclos avaliados. A **Figura 4.1** apresenta o balanço hídrico resultante para o solo exposto e a variação de  $ET_0$  e da precipitação durante cada ciclo da cana-de-açúcar. Em alguns períodos ocorreu ausência de dados como precipitação, temperatura do ar ou irradiância solar. Assim optou-se, na seleção das datas de processamento do METRIC, as datas distantes destes períodos sem dados, e com isto as incertezas associadas ao cálculo de  $ET_0$  e da umidade residual no solo foram evitadas.

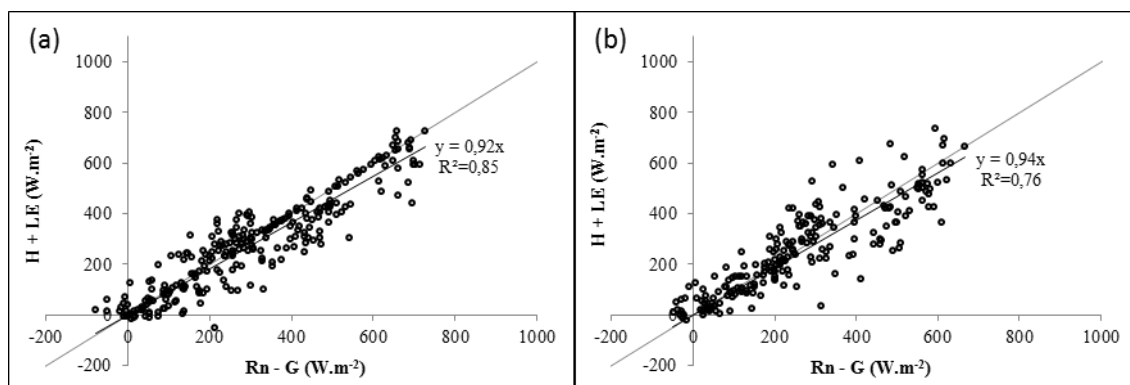
A **Figura 4.1** mostra como a safra 2006 teve uma maior e mais distribuída incidência de precipitação, comparando com a safra 2005. Na safra 2005 o total de precipitação foi de 1194 mm, enquanto em 2006 o total foi de 1353 mm, segundo Cabral et al. (2012). Dessa forma, tem-se que o solo esteve em condições de umidade inadequadas para aplicação do modelo METRIC durante grande parte do período chuvoso do segundo ciclo da cultura, dificultando assim a aplicação do modelo em várias datas nesse período, pois não havia *pixels* quentes adequados para a calibração interna do modelo.



**Figura 4.1** Balanço hídrico e variação da ET<sub>0</sub> para os ciclos 2005 e 2006 no sítio experimental, realizado segundo o método Penman-Monteith (ASCE-EWRI, 2005).

#### 4.2. Correção das medidas de fluxos turbulentos

A **Figura 4.2** apresenta o fechamento do balanço de energia (medições horárias para o período diurno) para as datas de processamento do METRIC nas duas safras avaliadas, destacando-se que os fluxos turbulentos (H+LE) foram 8% menores que a energia disponível (R<sub>n</sub> - G) na safra de 2005 e 6% na safra 2006.

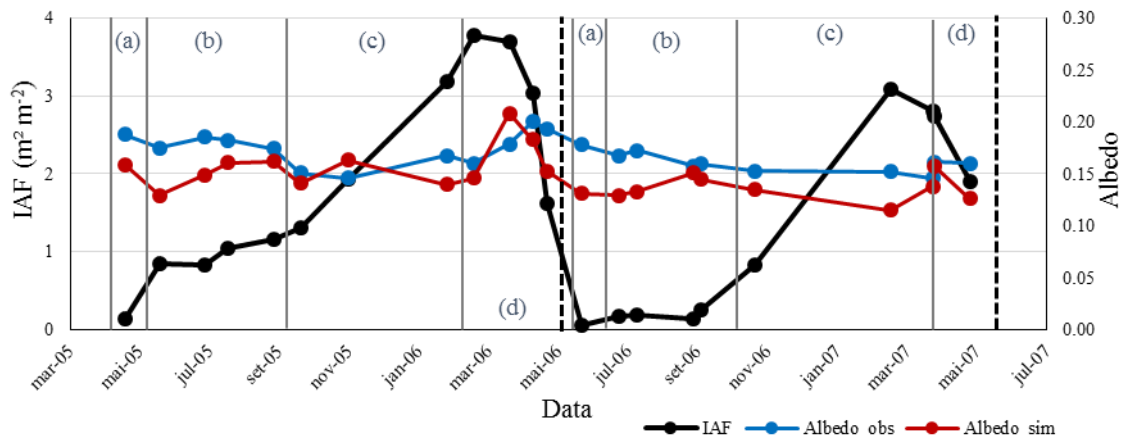


**Figura 4. 2** Relação entre os fluxos turbulentos horários (LE+H) e a energia disponível (Rn-G) obtidas pelo sistema de *eddy covariance* (EC) para os períodos diurnos na área de cana-de-açúcar nos dias de processamento do modelo METRIC durante as safras (a) 2005 e (b) 2006.

O uso de fluxos medidos em superfície na validação de estimativas por modelos exige que a conservação de energia seja atendida. As medidas de H e LE tendem a ser subestimadas pelos sistemas de EC devido a fontes de erro como: cobertura não homogênea da superfície, fontes incompatíveis de H e LE, características do solo, erros instrumentais, topografia, divergência ou dispersão dos fluxos, entre outras (TEIXEIRA, 2010; TWINE et al., 2000). Portanto, os fluxos de energia medidos *in situ* foram submetidos ao fechamento forçado do balanço de energia, conforme descrito por Balbontín-Nesvara et al. (2011), pelo método da razão de Bowen. Posteriormente, os fluxos corrigidos foram utilizados na validação dos fluxos de energia modelados pelo METRIC.

### 4.3. Albedo de superfície

A variação do albedo de superfície ao longo das duas safras é apresentada na **Figura 4.3**, que mostra o albedo medido no sítio experimental e modelado através da equação de Liang (2000). Os mapas de albedo e dos outros parâmetros estimados de todas as datas apresentadas na **Tabela 3.5** para a RA de Ribeirão Preto encontram-se no Apêndice A.



**Figura 4.3** Albedo da superfície observado (azul), modelado (vermelho) e índice de área foliar (preto) para a área de cana-de-açúcar do sítio experimental. As linhas verticais indicam o limiar das fases fenológicas da cana-de-açúcar: (a) brotação, (b) perfilhamento, (c) crescimento e (d) maturação. As linhas verticais pontilhadas indicam as datas de colheita.

Verifica-se que o albedo medido na torre varia ao longo de cada ciclo da cultura, com os maiores valores ocorrendo próximo da colheita e durante o início do ciclo seguinte. No início do ciclo a reflectância aumenta devido à contribuição do solo, assim como descrito por Tatsch (2006). Com o final da estação chuvosa a cultura entra na fase de maturação, ocasionando a redução do IAF devido à presença de folhas senescentes, o que altera o padrão de reflectância do dossel vegetal. Dessa forma, o albedo volta a subir, como é observado nos últimos meses da safra 2005. Com a colheita e início do novo ciclo, o padrão se repete, com o albedo sendo reduzido com o crescimento da cultura e crescendo novamente antes da colheita. Esse padrão está de acordo com o descrito por Georgescu et al. (2013), que assume valores próximos a 0,20 logo após a colheita, chegando a valores próximos de 0,15 na fase de crescimento da cultura (estação chuvosa) e voltando a subir no final do ciclo. Utilizando o modelo METRIC com dados Landsat, Gomes (2009) obteve valores de albedo entre 0,16 e 0,20 para cana-de-açúcar, observando também valores maiores (até 0,22) em algumas áreas da cultura. Tatsch (2006) discute o efeito da maior umidade superficial do solo no albedo, devido a chuvas isoladas, como ocorre um mês após o início ciclo em maio de 2005. Domingues et al. (2011) obtiveram resultados de albedo variando em função do tipo de solo e método de colheita. No caso de Latossolo

Vermelho-Amarelo com tipo de colheita híbrido (mecânica e com queima) o albedo variou entre 0,14 e 0,19, não apresentando a mesma amplitude de variação que foi observada quando a colheita foi realizada somente com queima em Latossolo Vermelho (entre 0,10 e 0,22).

Salienta-se que durante a maior parte das duas safras, a equação de Liang (2000) subestimou o albedo no sítio experimental, o que impacta diretamente o saldo de radiação e conseqüentemente os outros fluxos modelados pelo METRIC para essa área. O modelo para cálculo de albedo com dados MODIS proposto por Tasumi et al (2008) foi testado como uma alternativa ao método de Liang (2000), porém optou-se por este último por ser o modelo que apresentou melhor desempenho. Considerando as fases de crescimento e maturação da cana-de-açúcar, os modelos de Liang (2000) e Tasumi et al.(2008) subestimaram o albedo em 9% e 16%, respectivamente. Cabe ressaltar que a não utilização do produto de albedo do MODIS se deve a sua resolução temporal, ou seja, porque este é representativo de cada 16 dias.

Os maiores erros nas estimativas de albedo pela equação de Liang (2000) foram encontrados no início de cada safra, com o solo dominando a resposta de reflectância. No início da safra 2005, segundo Gomes (2009), foi realizada queima da palha acumulada da colheita anterior, aragem do solo e adubação. Esses procedimentos no solo geraram impactos na resposta de reflectância do mesmo, afetando os valores de albedo nessa época. Na safra 2006 verifica-se o mesmo padrão, sendo possível que se tenha realizado um manejo semelhante ao da safra anterior na área. Cabe ressaltar a dificuldade do modelo de Liang (2000) em representar o albedo nessas condições.

A partir do mês de julho de 2005 o albedo calculado se aproxima do observado. Nesse período a cana-de-açúcar encontra-se em fase de perfilhamento, havendo resposta de reflectância da vegetação, como pode-se observar na **Figura 3.3**. Ainda destaca-se na **Figura 4.3** que em 03/10/2005 há uma redução acentuada no albedo, devido a ocorrência de precipitação na área na semana anterior, o que reduz a reflectância da superfície (**Figura 4.1**). No dia 13/11/2005 o albedo estimado é maior que o observado, possivelmente devido às condições atmosféricas e interferência de nuvens na área do sítio

experimental, como pode-se observar no mapa dessa data (**Figura B.3**). O mesmo fator pode ter interferido para o dia 01/04/2006, pois na imagem de satélite nota-se uma nuvem a poucos quilômetros do sítio experimental. Já no final da fase de maturação, o albedo é subestimado, possivelmente devido ao ângulo de imageamento do *pixel* em relação à geometria de iluminação e a presença de umidade no solo.

Durante a safra 2006 o albedo calculado segue o mesmo padrão em cada fase da cultura (**Figura 4.3**), sendo subestimado pelo modelo de Liang (2000) mais intensamente no início do cultivo. Com o desenvolvimento da cultura, as estimativas aproximam-se dos valores observados, exceto em 23/02/2007, data em que a subestimativa sofreu influência devido à condição de umidade do solo, ocasionada pela precipitação ocorrida em dias anteriores.

Outra possível fonte de erro na estimativa de albedo é o ângulo de visada do sensor MODIS, uma vez que a cultura não é lambertiana. O algoritmo do MOD09 propõe uma aproximação da superfície para uma superfície lambertiana, porém não elimina o efeito do ângulo de visada, além do fato de a correção atmosférica do produto não levar em conta alguns parâmetros atmosféricos locais (GOLTZ, 2007). Ainda tratando-se do produto MODIS, a resolução espacial de 1km gera erros na resposta de reflectância, uma vez que na área da torre pode haver mistura espectral, como pode-se notar na **Figura 3.2b**.

Nas datas 31/03/2007 e 02/04/2007 (**Figura 4.3**) foram obtidos valores diferentes de albedo, embora o intervalo de tempo seja curto. Essa diferença pode ser decorrente do efeito do ângulo de visada do sensor, que em 31/03/2007 foi de 12° em relação ao nadir, enquanto em 02/04/2007 foi -15°, ou seja, condições diferentes de visada em relação à fonte de iluminação. Considerando que a cultura no campo para estas datas encontrava-se nas mesmas condições de distribuição espacial e praticamente com a mesma geometria de iluminação, a radiação refletida em 02/04/2007 foi maior, implicando portanto num maior valor de albedo.

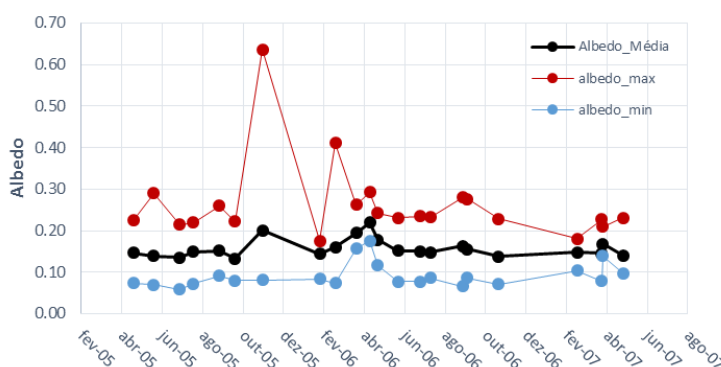
Outro fator que pode ter influenciado essa diferença de albedo em datas próximas é a umidade do solo. Devido a incidência de precipitação em semanas anteriores a essas



datas, o balanço hídrico indica que em 31/03/2007 o solo não estava totalmente seco, havendo ainda uma umidade residual, maior do que a de 02/04/2007, o que pode ter afetado também a resposta de reflectância da superfície.

Além disso, é possível que existam problemas nas medições de campo de radiação solar refletida. Assim como apontado por Gomes (2009), o manual do sensor Licor 200X recomenda que não se use esse sensor para medidas de radiação refletida, especificando que a largura de banda com que o sensor trabalha está entre 400 nm e 1100 nm (MANUAL DO LICOR 200X, 2010). Dessa forma, a estimativa de albedo de superfície com os dados de superfície pode ser comprometida, uma vez que as medidas não abrangem todo o espectro solar.

A **Figura 4.4** apresenta o valores médios, mínimos e máximos de albedo estimados pelo método de Liang (2000) com dados MODIS para os *pixels* puros em áreas de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto.

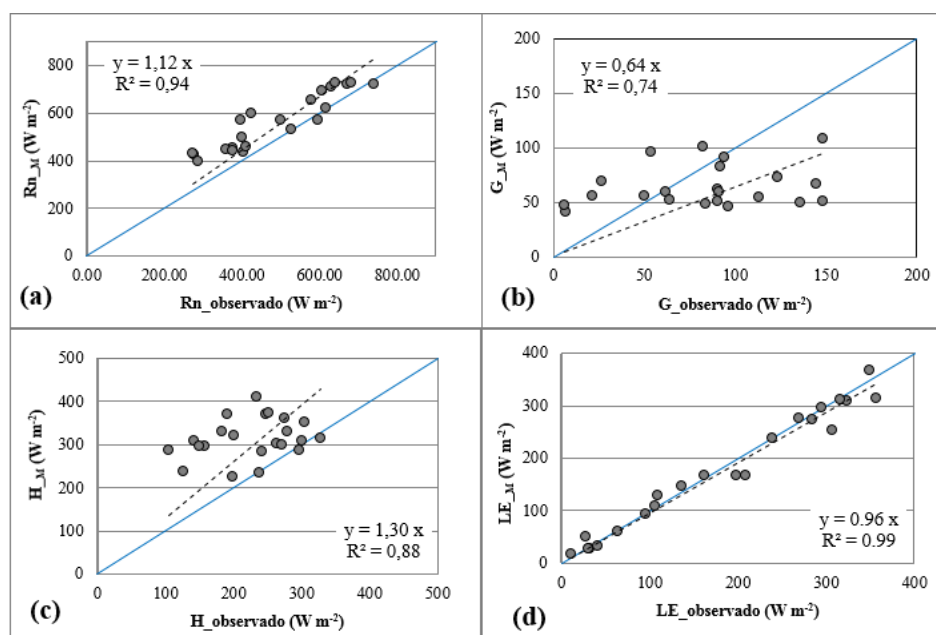


**Figura 4.4** Variação do albedo estimado pelo método de Liang (2000) nos pixels puros (1km x 1km) em áreas de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto – SP.

Os valores médios de albedo estimados nos *pixels* (1km) totalmente ocupados por cana-de-açúcar variaram entre 0,14 e 0,22, aproximando-se dos valores indicados por Gomes (2009) e Georgescu et al. (2013). É importante considerar que em cada *pixel* a cultura pode se encontrar em diferentes condições fenológicas, como em fase de maturação ou já colhida, ocasionando a maior variação entre os valores mínimos e máximos obtidos. Na **Figura 4.4** pode-se notar valores extremos de albedo, nos dias 13/11/2005 e 01/03/2006, sendo verificado nas respectivas imagens que esses valores correspondem a influência de nuvens na área do *pixel*.

#### 4.4. Estimativas das componentes do balanço de energia

A comparação entre as estimativas de  $R_n$ ,  $G$ ,  $H$  e  $LE$  realizadas com o METRIC e aquelas medidas no sítio experimental no momento da passagem do satélite são apresentadas na **Figura 4.5**.



**Figura 4.5** Comparação entre as estimativas observadas e calculadas com o METRIC: (a) saldo de radiação ( $R_n$ ), (b) fluxo de calor no solo ( $G$ ), (c) fluxo de calor sensível ( $H$ ) e (d) fluxo de calor latente ( $LE$ ). A linha azul representa a proporção 1:1.

##### 4.4.1. Saldo de radiação

O saldo de radiação (**Figura 4.5a**) foi superestimado em 12%, com um coeficiente de determinação  $R^2=0,94$ . Esse resultado se deve principalmente às subestimativas de albedo no início das safras, que ocasionaram a superestimativa do  $R_n$  para essas datas. Nas fases de crescimento e maturação da cultura, o  $R_n$  foi modelado mais adequadamente para as duas safras, porém ainda superestimado. A temperatura da superfície do produto MOD11 foi subestimada em até 10% nas datas em que o  $R_n$  foi superestimado, o que reduz o fluxo de radiação de ondas longas emitido pela superfície. Considerando as estimativas realizadas para as duas safras, o  $R_n$  variou entre  $399 \text{ W m}^{-2}$  e  $727 \text{ W m}^{-2}$ , valores próximos aos obtidos por Gomes (2009) para a área de cana-de açúcar nesse período. Deve-se levar

em consideração ainda a resolução espacial das imagens MODIS, que no caso do *pixel* onde se encontra a torre de monitoramento pode haver mistura na resposta espectral, por diferentes alvos.

Como essas estimativas são obtidas no momento da passagem do satélite Terra (~10:30), e uma vez que as medidas por sensoriamento remoto são possíveis na ausência de nuvens, os resultados para as datas avaliadas representam os instantes de maior disponibilidade de energia aos diversos processos biofísicos no período (GOMES, 2009).

Os mapas de  $R_n$  para a RA de Ribeirão Preto são apresentados nas **Figuras B.5 e B.6**. Nestes, nota-se um padrão sazonal do  $R_n$ , no qual a variável é fortemente controlada pelo padrão de  $K_i$ , conforme descrito por Tatsch (2006). Variáveis como albedo e temperatura de superfície também apresentam influência direta no  $R_n$ , sendo a influência albedo mais visível nos mapas, onde para maiores valores de albedo, se tem menores valores de  $R_n$ . Nos *pixels* puros em áreas de cana-de-açúcar o  $R_n$  variou em média entre  $395 \text{ W m}^{-2}$  e  $723 \text{ W m}^{-2}$ , valores próximos aos observado no sítio experimental.

#### **4.4.2. Fluxo de calor no solo**

O fluxo de calor no solo (**Figura 4.5b**) é a estimativa que apresenta os maiores problemas de precisão em modelagem com dados de sensoriamento remoto (BASTIAANSEN, 2000; GOMES, 2009; RUHOFF, 2011; OLIVEIRA, 2012). De maneira geral, o METRIC subestimou em aproximadamente 36% o fluxo de calor no solo, com índice de determinação  $R^2= 0,74$ , indicando a menor eficiência do modelo em representar esse fluxo. Apesar do índice de determinação obtido, a dispersão dos pontos mostra baixa correlação entre os valores observados e estimados. O valor estimado de  $G$  varia entre  $40 \text{ W m}^{-2}$  e  $109 \text{ W m}^{-2}$  nas datas de processamento do METRIC, embora as medidas de campo tenham chegado a  $148 \text{ W m}^{-2}$ . Gomes (2009) aponta para valores acima de  $80 \text{ W m}^{-2}$  após a colheita da cana-de-açúcar (solo exposto). Nas datas do período seco (brotação e perfilhamento),  $G$  foi subestimado em até 66%, sendo influenciado diretamente pelos valores subestimados de albedo e de  $T_s$  pelo produto MOD11. Para os *pixels* puros em áreas de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto (**Figuras B.7 e B.8**) a média de fluxo de calor no solo variou entre  $28 \text{ W m}^{-2}$  e  $132 \text{ W m}^{-2}$ .

#### 4.4.3. Fluxo de calor sensível

O fluxo de calor sensível (**Figura 4.5c**) foi superestimado pelo METRIC em 30%, com coeficiente de determinação  $R^2=0,88$ . Apesar do índice de determinação obtido, a dispersão dos pontos mostra baixa correlação entre os valores observados e estimados. Esse é um resultado esperado, pois a calibração de duas condições extremas (seco e úmido) leva essa variável a absorver o erro das estimativas de  $R_n$  e  $G$ , reduzindo o erro em LE (CARRASCO-BENAVIDES et al., 2012; SCHERER-WARREN, 2011). Assim é observado que os desvios na estimativa de  $H$  induzem à obtenção de LE próximo ao observado. De acordo com Gomes (2009), maiores valores de  $H$  no período úmido estão relacionados com maiores valores de  $R_n$ , enquanto que na estação seca o estado da vegetação favorece a troca de energia por calor sensível, principalmente devido ao menor IAF.

Para as datas de processamento do METRIC, o  $H$  estimado no *pixel* da torre varia entre  $225 \text{ W m}^{-2}$  e  $455 \text{ W m}^{-2}$ . Nas imagens do período seco, por ausência de *pixels* frios, houve dificuldade para obter uma calibração eficaz de  $H$ , o que interferiu diretamente nas estimativas de LE,  $F$  e  $ET_a$  para essas datas. Durante o período chuvoso, no crescimento da cultura, o erro relativo de  $H$  variou entre -1% a 18%. Gomes (2009) obteve erros relativos de até 70% nas estimativas do fluxo de calor sensível com o SEBAL/METRIC.

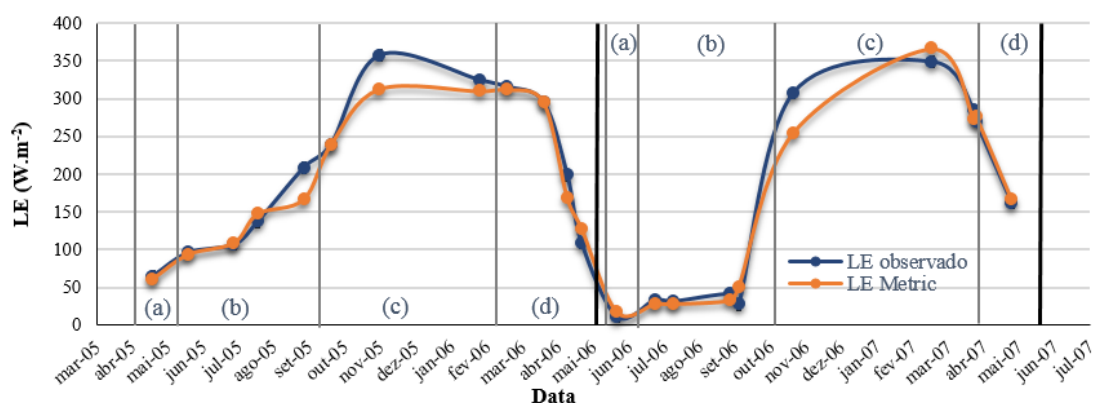
Os mapas de  $H$  para a RA de Ribeirão Preto são apresentados nas **Figuras B.9 e B.10**. Para os *pixels* puros em áreas de cana-de-açúcar (**Figura C.1**) na RA, a média do fluxo de calor sensível variou entre  $214 \text{ W m}^{-2}$  e  $522 \text{ W m}^{-2}$ .

#### 4.4.4. Fluxo de calor latente

Como se observa na **Figura 4.5d**, o fluxo de calor latente foi subestimado em 4% pelo METRIC, com coeficiente de determinação  $R^2=0,99$ . Esse resultado mostra que os erros na estimativa de  $R_n$  e  $G$  são absorvidos pela calibração de  $H$ , conforme afirmado por Carrasco-Benavides et al. (2012). Ao longo das duas safras avaliadas, LE varia de acordo com o desenvolvimento da cultura (**Figura 4.6**) e a disponibilidade de energia na superfície, assumindo valores mais baixos logo após o corte e crescendo à medida que a

cana-de-açúcar se desenvolve. A tendência de redução de LE no final de cada ciclo segue o amadurecimento da cultura, quando se tem uma redução na transpiração e aumento do fluxo de calor sensível (CABRAL et al., 2003).

Durante as duas safras, o LE estimado pelo METRIC variou entre  $15 \text{ W m}^{-2}$  e  $366 \text{ W m}^{-2}$ , com os maiores erros relativos ocorrendo nas datas do período seco, impacto direto da calibração de H e dos erros nas estimativas de  $R_n$  e G para essas datas.



**Figura 4.6** Fluxo de calor latente observado pelo sistema de eddy covariance ( $LE_{\text{observado}}$ ) e estimado pelo METRIC ( $LE_{\text{Metric}}$ ) no sítio experimental de cana-de-açúcar durante as safras 2005 e 2006. As linhas verticais indicam as fases fenológicas da cana-de-açúcar: (a) brotação, (b) perfilhamento, (c) crescimento e (d) maturação.

Os mapas de LE para a RA de Ribeirão Preto são apresentados nas **Figuras B.11 e B.12**. Nas áreas de cana-de-açúcar (**Figuras C.1**) o METRIC estimou valores de LE entre  $9 \text{ W m}^{-2}$  e  $315 \text{ W m}^{-2}$  em média. Valores negativos de LE foram verificados para áreas de cana-de-açúcar com palha pós-colheita deixada sobre o solo. Nesses *pixels* a alta temperatura da superfície levou a valores superestimados de H, causando os valores negativos de LE, assim como observado por Allen et al. (2007b) e discutido adiante nas estimativas de  $ET_a$  para a RA de Ribeirão Preto.

#### 4.5. Avaliação da Fração da evapotranspiração de referência (F)

O modelo METRIC supõe que a fração da  $ET_o$  é constante ao longo do dia, e portanto  $K_{c\_M} = K_c$ , conforme a **Equação 3.27**. Dessa forma, foi realizada a comparação (**Tabela 4.1**) entre as médias de  $F_{i\_ec}$  (no momento da passagem do satélite) com as

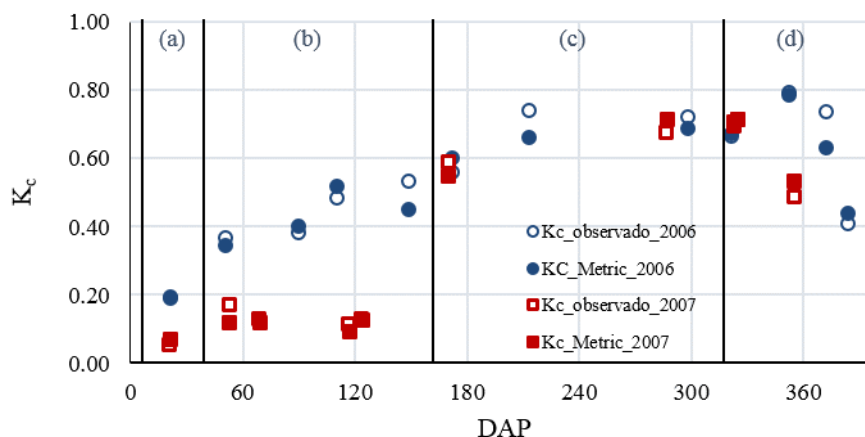
médias de F durante o dia ( $F_{\text{média}}$ ), entre as médias de  $K_{c\_ec}$  e  $F_{i\_ec}$  e entre as médias de  $K_{c\_M}$  e  $K_{c\_ec}$ , assim como realizado por Carrasco-Benavides et al. (2012). Para cada caso foi realizado o teste t com nível de confiança de 95%, com a hipótese  $H_0: b=1$ , sendo b a relação entre as duas médias comparadas.

**Tabela 4.1** Avaliação da fração de evapotranspiração de referência (F).  $F_{i\_ec}$  é o F instantâneo obtido em campo,  $F_{\text{médio}}$  é a média de F no período diurno (8:00 às 18:00),  $K_{c\_ec}$  é o  $K_c$  obtido em campo,  $K_{c\_M}$  é o  $K_c$  estimado pelo METRIC. MAE é o erro absoluto médio, RMSE é a raiz quadrada do erro quadrático médio, b é a razão entre a variável estimada e a observada,  $R^2$  é o coeficiente de determinação, V é aceitação da hipótese nula ( $b=1$ ).

| Teste                              | MAE  | RMSE | b    | $R^2$ | Teste t |
|------------------------------------|------|------|------|-------|---------|
| $F_{\text{médio}}$ vs. $F_{i\_ec}$ | 0,10 | 0,13 | 0,89 | 0,89  | V       |
| $F_{i\_ec}$ vs. $K_{c\_ec}$        | 0,06 | 0,07 | 0,93 | 0,94  | V       |
| $K_{c\_M}$ vs. $K_{c\_ec}$         | 0,03 | 0,04 | 0,98 | 0,95  | V       |

Dessa forma, provou-se que o valor de F no momento da passagem do satélite pode ser usado para expandir as estimativas instantâneas para a escala diária, validando a suposição do METRIC. Considerando as duas safras, de maneira geral o METRIC subestimou o  $K_c$  em 2%, com MAE=0,03 e RMSE=0,04 (**Tabela 4.1**), valor considerado aceitável (< 20%) para estimativas de  $K_c$  por sensoriamento remoto, segundo Carrasco-Benavides et al. (2012).

Os valores de  $K_c$  estimados pelo METRIC ao longo das duas safras são apresentados na **Figura 4.7** agrupados de acordo com a fase fenológica da cana-de-açúcar. Os valores médios de  $K_c$  obtidos pelo METRIC foram inferiores aos citados pelo manual da FAO-56 para a cana-de-açúcar (ALLEN, 1998), obtendo-se os valores médios de 0,13 para a fase da brotação, 0,27 no perfilhamento, 0,65 no crescimento e 0,62 na maturação, enquanto o manual da FAO-56 indica valores de 0,40 para o início do ciclo, 1,25 para a fase intermediária e 0,75 para o final do ciclo. Os desvios obtidos na estimativa de  $K_c$  podem ter ocorrido por contaminação do *pixel* de validação pelos *pixels* vizinhos, conforme descrito por Allen et al. (2008), já que a  $T_s$  tem resolução espacial de 1 km e os *pixels* vizinhos nas imagens MODIS podem não apresentar as mesmas condições de temperatura e uso e cobertura da terra e temperatura (**Figura 3.2b**).

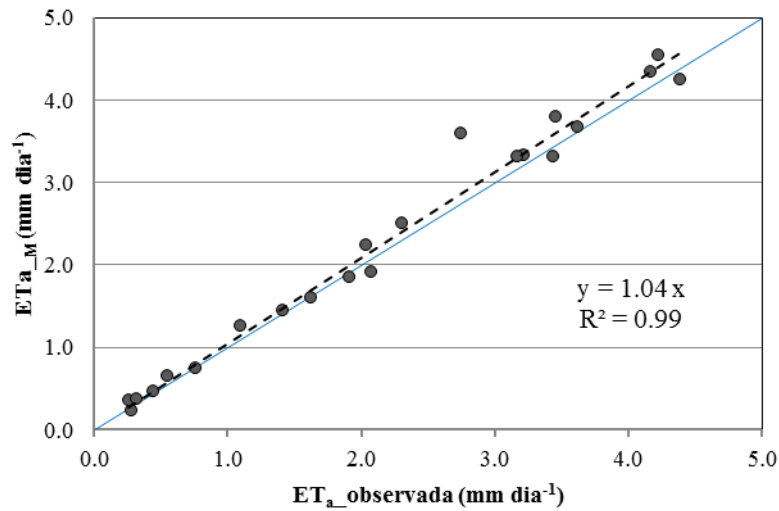


**Figura 4.7** Valores diários de  $K_c$  obtidos nas safras 2005 e 2006 pelo sistema de eddy covariance e pelo METRIC para as fases fenológicas da cana-de-açúcar: (a) brotação, (b) perfilhamento, (c) crescimento e (d) maturação. DAP representa a contagem de dias após o plantio.

As estimativas de  $K_c$  se aproximaram mais dos valores observados nas fases do crescimento e da maturação, enquanto para a brotação e perfilhamento o modelo mostrou maior dificuldade em estimar essa variável, devido à interferência do solo nas estimativas e à dificuldade de calibração do modelo nessa época, que corresponde ao período seco (sem *pixels* frios). Para solos de textura fina e em condições de plantio tardio, Lyra et al. (2012) estimam o  $K_c$  no início do ciclo, isto é, até 50 DAP (ALLEN, 1998) entre 0,35 e 0,40, valor próximo ao obtido pelo METRIC para a data de 04/06/2005. Nesse ciclo houve incidência de precipitação na área de estudo durante os meses iniciais depois do corte, o que aumentou a disponibilidade hídrica no solo e possibilitou um crescimento acelerado da cultura, que então se comportou como cana com plantio tardio, com crescimento acelerado no início do ciclo (LYRA et al., 2012).

#### 4.6. Evapotranspiração real diária ( $ET_a$ )

As estimativas diárias obtidas pelo METRIC para  $ET_a$  foram comparadas com os valores observados pelo sistema de *eddy covariance* (sítio experimental), conforme apresentado na **Figura 4.8** e **Tabela 4.2**. O teste t indicou que a relação entre a  $ET_a$  modelada pelo METRIC e a observada foi igual a 1 ( $b=1$ ), com um nível de confiança de 95%,  $R^2=0,99$ ,  $MAE=0,16 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $RMSE=0,24$ .



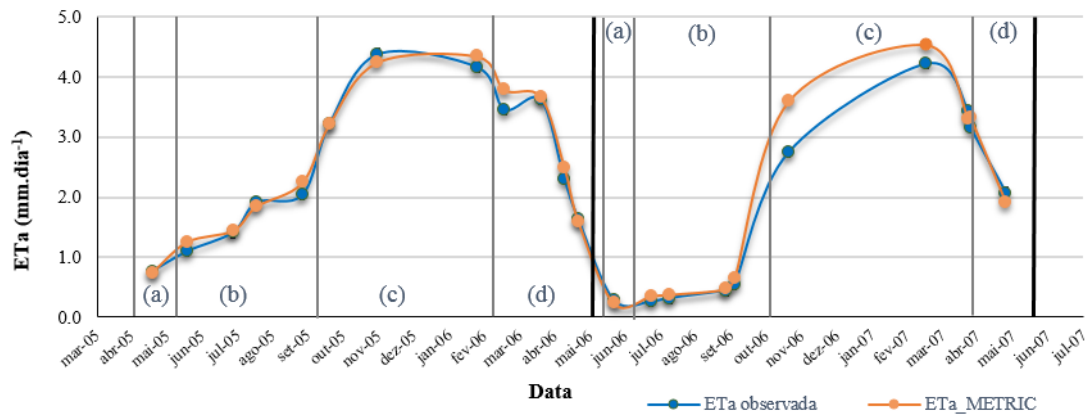
**Figura 4.8** Comparação entre as estimativas diárias de  $ET_a$  do METRIC e valores observados pelo sistema de eddy covariance no sítio experimental em área de cana-de-açúcar para as safras 2005 e 2006.

**Tabela 4.2** Avaliação estatística da Evapotranspiração real ( $ET_a$ ).  $ET_{a\_Metric}$  é a estimativa realizada pelo METRIC,  $ET_{a\_observada}$  é o valor medido em campo pelo sistema de *eddy covariance*. MAE é o erro absoluto médio, RMSE é a raiz quadrada do erro quadrático médio,  $b$  é a razão entre a variável estimada e a observada,  $R^2$  é o coeficiente de determinação,  $V$  é aceitação da hipótese nula ( $b=1$ )

| Teste                                    | MAE                       | RMSE | $b$  | $R^2$ | Teste $t$ |
|--|---------------------------|------|------|-------|-----------|
| $ET_{a\_Metric}$ vs. $ET_{a\_observada}$ | 0,15 mm dia <sup>-1</sup> | 0,23 | 1,04 | 0,99  | V         |

A  $ET_a$  variou ao longo das safras 2005 e 2006 de acordo com o crescimento da cultura e da incidência de precipitação, notando-se um aumento mais acentuado na transição da estação seca para a chuvosa (**Figura 4.9**).





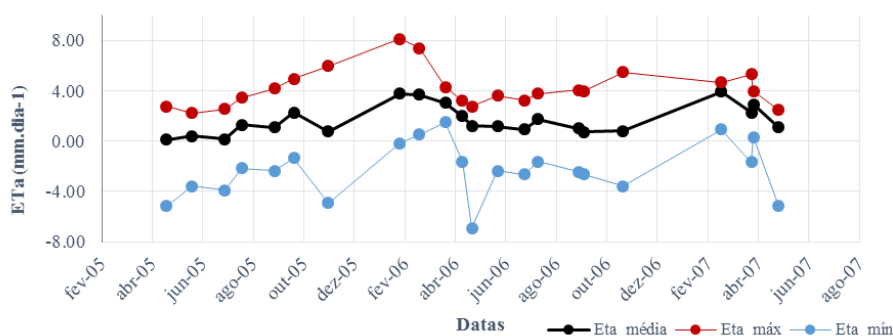
**Figura 4.9** Variação da ETa estimada pelo METRIC e observada pelo sistema de eddy covariance, ao longo das safras 2005 e 2006 no sítio experimental em área de cana-de-açúcar. As linhas verticais indicam as fases fenológicas da cana-de-açúcar: (a) brotação, (b) perfilhamento, (c) crescimento e (d) maturação.

Os menores valores de ET são observados logo após a colheita, com aumento gradual de acordo com o desenvolvimento da cultura, com maior intensidade na transição da estação seca para a chuvosa. Gomes (2009) obteve uma acentuada variabilidade sazonal nas estimativas de ET<sub>a</sub> para cana-de-açúcar, com pequenos valores logo após a colheita e aumento gradual principalmente na transição para a estação chuvosa, onde foram observados valores máximos de 5,5 mm dia<sup>-1</sup>, no período de maior crescimento da cultura e maior consumo de água. Tatsch (2006) também relaciona a colheita da cana-de-açúcar com pequenas taxas de ET (~1mm dia<sup>-1</sup>) e altos valores de H, devido ao solo descoberto. Em áreas de cana-de-açúcar colhidas no início da safra, a ET tende a diminuir na transição da estação chuvosa para a seca (CABRAL et al., 2001; JUÁREZ, 2004; DOMINGUES et al., 2011).

Lira (2008) avaliou a ET em cana-de-açúcar com o SEBAL/METRIC e dados TM-Landsat 5, relacionando os menores valores de ET com áreas com pouca ou nenhuma vegetação, e valores de ET nas áreas com a cultura vigorosa chegando a 5,01 mm dia<sup>-1</sup>. Em medições por meio de sistema de vórtices turbulentos em um talhão de cana-de-açúcar no município de Sertãozinho – São Paulo, Cabral et al. (2003) obtiveram os valores extremos de ET<sub>a</sub> próximos a 0,5 mm dia<sup>-1</sup> e a 7 mm dia<sup>-1</sup>, que ocorreram durante a estação seca e durante o verão, respectivamente.

Percebe-se pela **Figura 4.9** que entre os dois ciclos há diferença no comportamento da  $ET_a$  durante a fase do perfilhamento. Nessa fase, o primeiro ciclo avaliado apresenta maiores valores de  $ET_a$ , variando entre 1,0 e 2,0  $mm\ dia^{-1}$ , enquanto no segundo ciclo a  $ET_a$  foi de 0,40  $mm\ dia^{-1}$  em média. Essa diferença pode ser decorrente da incidência de precipitação durante a estação seca na safra 2005, enquanto na safra 2006 houve menor quantidade de precipitação na área (**Figura 4.1**). Assim, a resposta da cultura à incidência de precipitação foi diferenciada nas duas épocas, com um crescimento precoce da cultura na safra 2005. Comportamento diferenciado entre dois anos devido à maior incidência de precipitação também foi observado por Juárez (2004), que destaca diferenças nos padrões de fluxos de energia ocasionado pela maior quantidade de frentes frias em sua área de estudo em um dos anos avaliados. Na fase de crescimento (**Figura 4.9c**) a safra 2005 apresentou  $ET_a$  média de 4,27  $mm\ dia^{-1}$ , enquanto para a safra 2006 a média foi de 3,47  $mm\ dia^{-1}$ . A transição entre a estação seca e a chuvosa foi a época em que a cultura apresentou o aumento mais notável na  $ET_a$ , acompanhando o aumento do IAF e dos índices de vegetação. O aumento gradual da energia disponível na superfície ( $R_n - G$ ), juntamente com o desenvolvimento da cultura nessa época, favorece o aumento do fluxo de calor latente e, conseqüentemente, o aumento da  $ET_a$ .

Utilizando a máscara de *pixels* puros nas áreas de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto, os valores de  $ET_a$  foram extraídos, mostrando o comportamento da variável nas áreas de cana-de-açúcar segundo o modelo METRIC (**Figura 4.10**).



**Figura 4.10** Valores de  $ET_a$  ( $mm\ dia^{-1}$ ) para os *pixels* puros em área de cana-de-açúcar durante as safras 2005 e 2006 na RA de Ribeirão Preto –SP.

Os valores observados para os *pixels* puros apresentaram alta variabilidade na RA de Ribeirão Preto, devido às diferentes condições e características fisiológicas que a cana-de-açúcar pode apresentar em cada data de processamento do METRIC. A colheita da cana-de-açúcar ocorre entre abril e dezembro, havendo simultaneamente nesse período áreas com a cultura colhida e não colhida, como nota-se pelos valores máximos a mínimos de  $T_s$ , IAF e índices de vegetação nos *pixels* puros em cana-de-açúcar (**Figura C.2**). Nos meses de abril a outubro de 2005 os valores médios de  $ET_a$  para a área são baixos, pois nesse período parte das áreas de cana já foi ou está sendo colhida, com solo exposto ou coberto com palhada, como pode-se observar nas composições coloridas das **Figuras B.1** e **B.2**. No entanto, existem áreas com a cultura em pé, onde a  $ET_a$  atinge os valores máximos em cada data, chegando até  $8,1 \text{ mm dia}^{-1}$  no dia 06/02/2006. Verifica-se também pela **Figura 4.10** que a média de  $ET_a$  acompanha a variação da  $ET_o$  ao longo do período avaliado (**Figura 4.1**), com os menores valores no período seco.

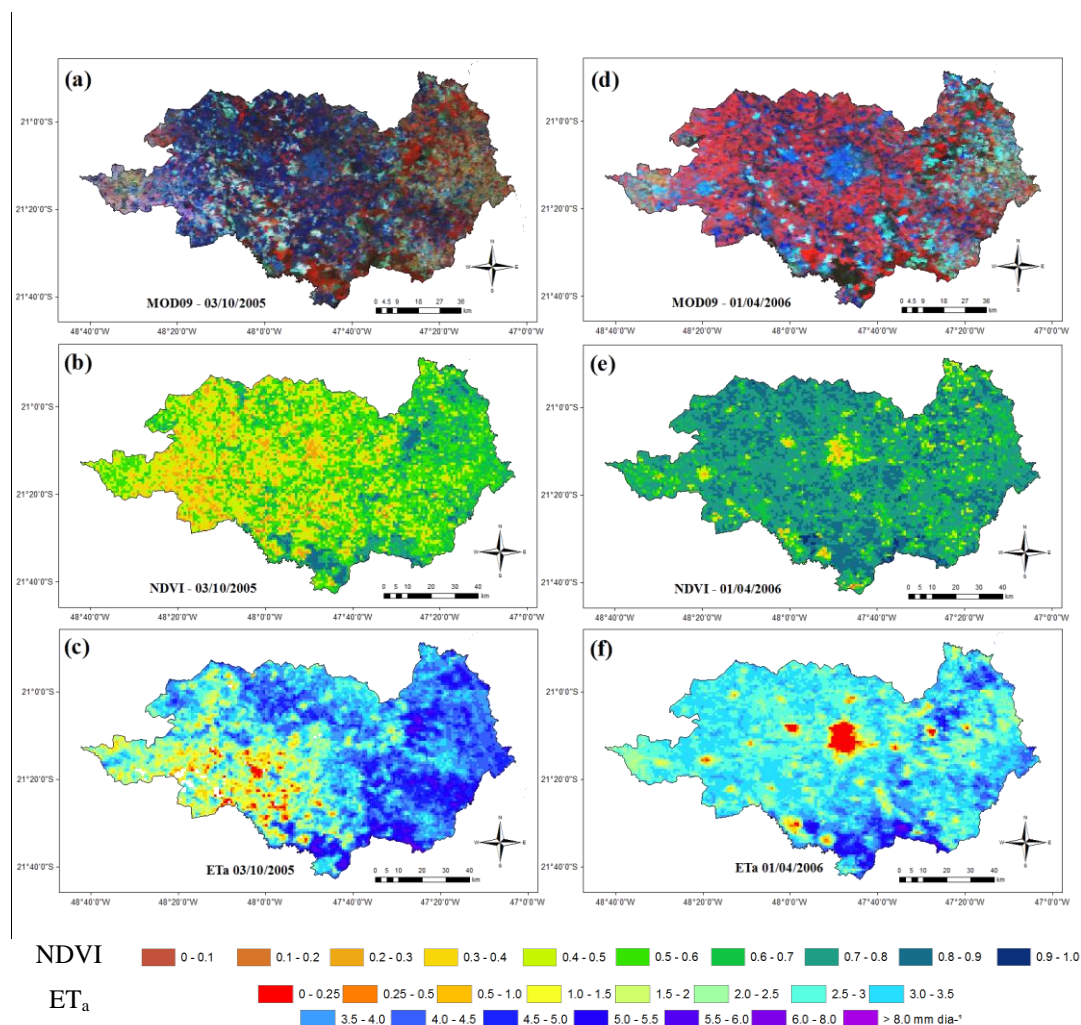
Para algumas datas o modelo forneceu resultados satisfatórios no *pixel* de validação, porém para o restante da área não foi eficaz em simular os fluxos de H e LE, com impacto direto nas estimativas de  $ET_a$ . Esse problema foi mais intenso nas datas do período seco e na transição para o período chuvoso, em que ocorreram os maiores erros na estimativa de  $R_n$ . No período seco ocorre a colheita da cana-de-açúcar, havendo portanto mais áreas com solo exposto ou palha sobre o solo e, deste modo, menores valores de  $ET_a$ . A ocorrência de valores negativos de  $ET_a$  se deve a problemas na calibração H com os *pixels* âncora, por ausência de *pixels* frios que atendessem aos critérios indicados por Tasumi (2003) ou pela presença de *pixels* em área colhida com palha sobre o solo (com alto albedo e  $T_s$ ), que não forneceram bons resultados quando empregados como *pixel* quente na calibração. Assim, muitas vezes os *pixels* quentes selecionados (em área de solo exposto) apresentavam  $T_s$  menor que os *pixels* em áreas com palha sobre o solo, gerando valores de H maiores do que  $H_{\text{quente}}$  e, portanto, valores de LE menores do que  $LE_{\text{quente}}$  (próximo a zero). Além disso, é possível que as condições de umidade do solo nas demais áreas da RA tenha influenciado o resultado, uma vez que pode interferir na medida de temperatura e emissividade da superfície. Ressaltando que uma vez que estimativas de ET são

geralmente menos confiáveis que as de  $R_n$ , é imprescindível que se tenha estimativas precisas de saldo de radiação (SU et al., 2007).

O valor médio de  $ET_a$  aumenta a partir de outubro de 2005, quando começa a estação chuvosa na região, atingindo o máximo em fevereiro de 2006. A partir do mês de março a  $ET_a$  decresce, em função da diminuição de energia disponível, da  $ET_o$  e da diminuição da precipitação, que reduz a quantidade de água no solo e induz a cultura a entrar na fase de maturação, mudando a forma de interação da cana-de-açúcar com a atmosfera.

As **Figuras 4.11 e 4.12** apresentam mapas de  $ET_a$  na RA de Ribeirão Preto para datas próximas ao início e final da época chuvosa, nas safras 2005 e 2006. São apresentados também os mapas de NDVI e composições coloridas falsa cor em cada data, para melhor interpretação dos resultados. As áreas de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto apresentadas na **Figura 3.1** ocupam predominantemente a parte central e oeste dessa RA. Os mapas de  $ET_a$  e NDVI para as demais datas são apresentados nas **Figuras B.13, B.14, B.15 e B.16**.

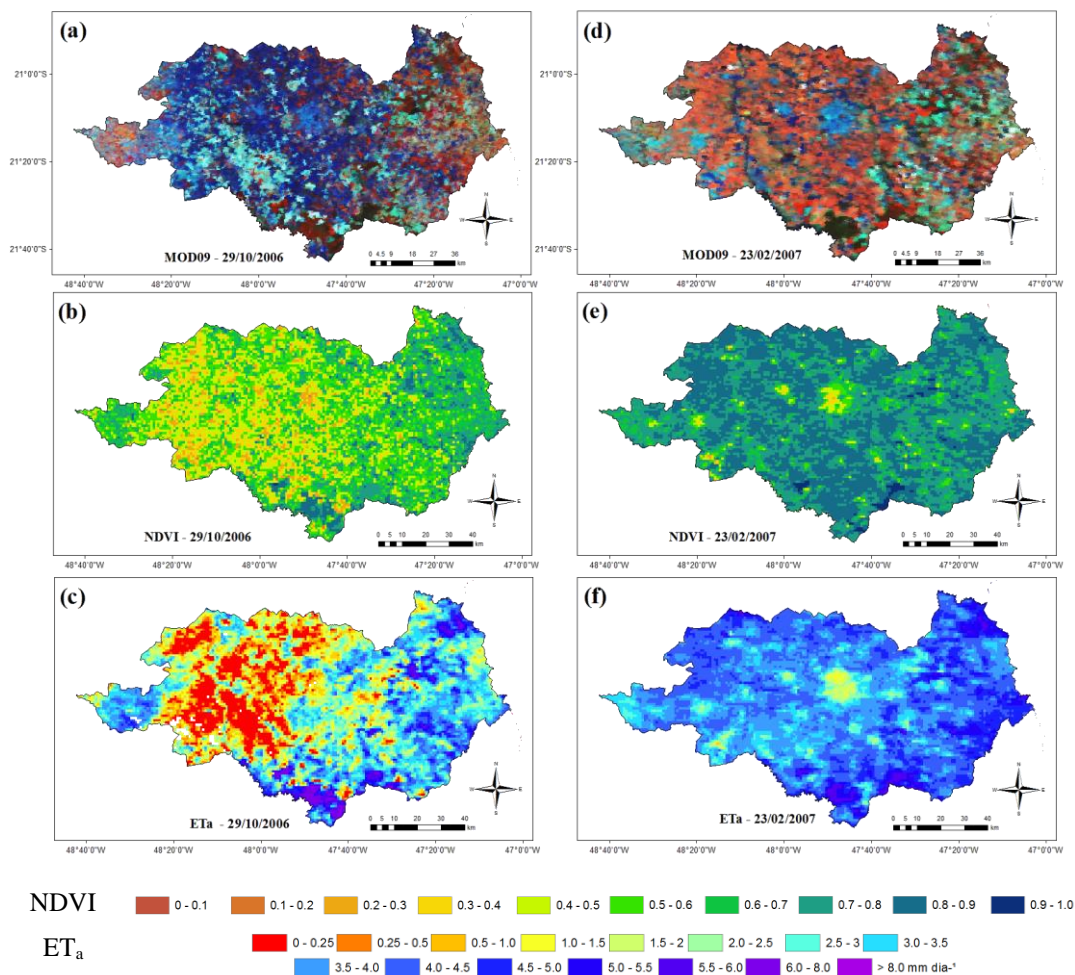
Na análise dos mapas gerados pelo METRIC para a RA de Ribeirão Preto, é necessário considerar que as datas de plantio e colheita na área da torre de monitoramento (**Tabela 3.1**) não são equivalentes às das áreas de cana-de-açúcar da RA, pois a época de colheita é iniciada no mês de abril e segue até dezembro. Nos mapas apresentados nas **Figuras B.1 e B.2** observa-se que no mês de maio, em ambas as safras, enquanto na área da torre a cana está recém-colhida (**Figuras 3.3 e 3.4**), no restante da RA muitas áreas encontram-se com a cultura em pé (coloração vermelha). Somente nos meses de outubro, para as duas safras avaliadas, se tem a maior quantidade de áreas colhidas na RA (coloração azul escura e ciano). Dessa forma, no decorrer do crescimento da cultura, o comportamento médio da  $ET_a$  nos *pixels* referentes a áreas de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto pode se diferenciar daquele encontrado para o ponto de validação.



**Figura 4.11** Mapas com composições coloridas falsa cor (MOD9 – RGB261), NDVI e evapotranspiração real ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) estimada pelo METRIC para a RA de Ribeirão Preto, nas datas 03/10/2005 (a, b, c) e 01/04/2006 (d, e, f).

Nota-se nos mapas que o padrão de  $ET_a$  nas áreas de cana-de-açúcar se diferencia nas duas estações, refletindo a condição da cultura, com aumento da  $ET_a$  quando a cultura está mais desenvolvida no campo. No início da estação chuvosa (outubro) a maior parte das áreas de cana-de-açúcar encontra-se em solo exposto ou coberta com palha (coloração azul escura ou ciano na **Figura 4.11a**), ocorrendo nessas áreas os menores valores de  $ET_a$  na RA de Ribeirão Preto (**Figura 4.11c**). O NDVI (**Figura 4.11b**) médio para as áreas de cana-de-açúcar (*pixels* puros) é de 0,45 e a  $ET_a$  (**Figura 4.11c**) média equivale a 2,28  $\text{mm dia}^{-1}$ . Já em 01/04/2006, data mais próxima ao final da estação chuvosa, em que a cultura encontra-se no máximo desenvolvimento, observa-se na **Figura 4.11d** mais áreas com a

vegetação vigorosa (coloração vermelha), o que também é evidenciado pelos maiores valores de NDVI (média de 0,75 para as áreas de cana-de-açúcar). A  $ET_a$  média nas áreas de cana foi de 3,05 mm dia<sup>-1</sup>, com valor máximo de 4,29 mm dia<sup>-1</sup>.



**Figura 4.12** Mapas com composições coloridas falsa cor (MOD09 – RGB261), NDVI e evapotranspiração real (mm dia<sup>-1</sup>) estimada pelo METRIC para a RA de Ribeirão Preto, nas datas 29/10/2006 (a, b, c) e 23/02/2007 (d, e, f).

O padrão da  $ET_a$  no início e fim do período chuvoso da safra 2006 foi semelhante ao observado na safra 2005. Em 29/10/2006 as áreas de cana-de-açúcar se encontram em solo exposto ou coberta com palha (**Figura 4.12a**), verificando para tais áreas menores valores de NDVI (**Figura 4.12b**) e de  $ET_a$  (**Figura 4.12c**). Nessa data o NDVI médio nos *pixels* puros em áreas de cana-de-açúcar foi de 0,47, com uma  $ET_a$  média de

0,79 mm dia<sup>-1</sup>. Em 23/02/2007, com a cultura na fase de crescimento, o NDVI médio nos *pixels* puros foi 0,82, enquanto a média de ET<sub>a</sub> foi de 3,91 mm dia<sup>-1</sup>.

#### 4.7. Estimativas de ET<sub>a</sub> com dados meteorológicos do RegCM4

Utilizando os dados de velocidade do vento e temperatura do ar gerados pelo RegCM4, o modelo digital de elevação e os produtos MODIS, o METRIC foi executado para as quatro datas indicadas na **Tabela 3.5**, situadas no início e final da estação chuvosa em cada safra avaliada. A **Tabela 4.3** apresenta os valores das estimativas de ET<sub>a</sub> do METRIC alimentado com dados de superfície, do METRIC alimentado com dados do RegCM4 (METRIC\_RegCM4), do produto MOD16 e também a ET<sub>a</sub> simulada pelo RegCM4. É importante destacar que as composições de 8 dias do MOD16 (mm 8dias<sup>-1</sup>) foram convertidas para valores diários (mm dia<sup>-1</sup>) para fins de comparação espacial e no *pixel* da validação, supondo que a ET no período de 8 dias seja estável.

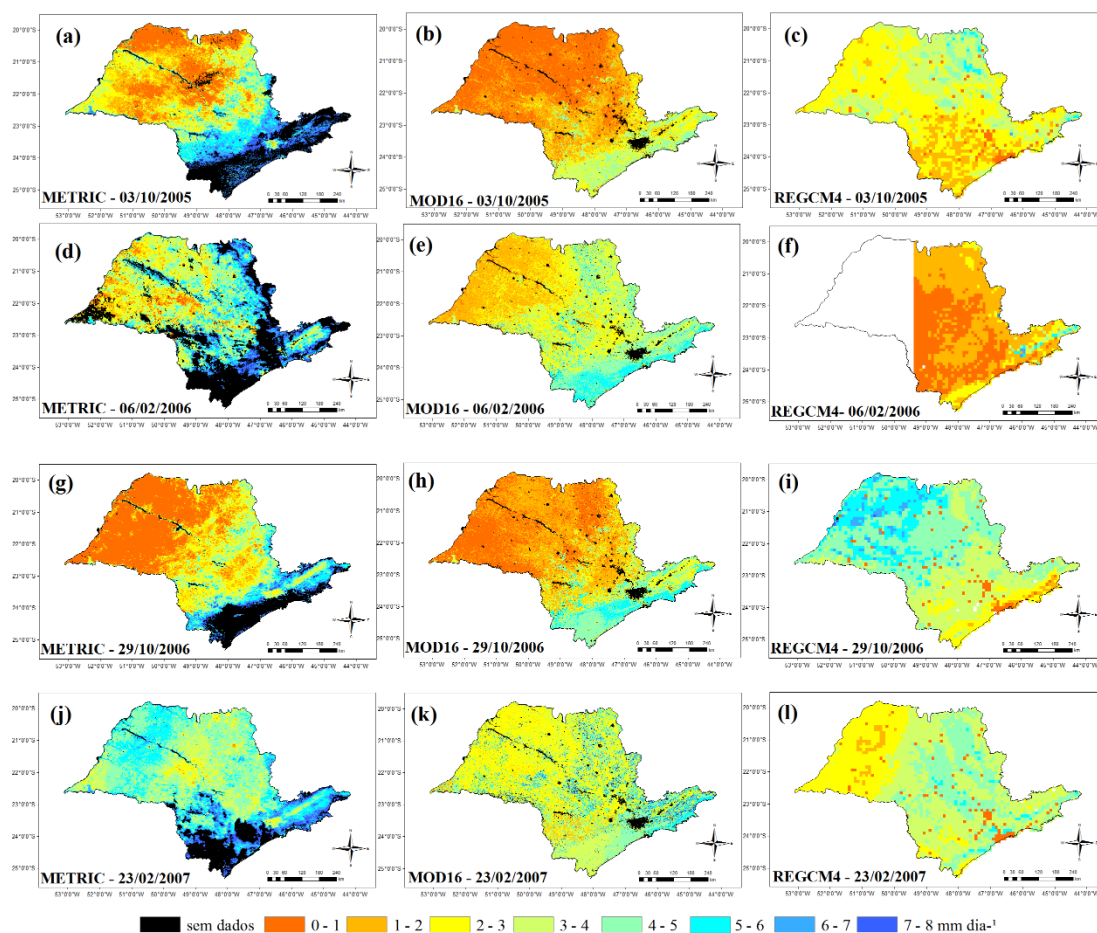
**Tabela 4.3** Estimativas de evapotranspiração real (mm dia<sup>-1</sup>) no *pixel* da torre de monitoramento em área de cana-de-açúcar, segundo o modelo METRIC com dados meteorológicos de superfície (ET<sub>a</sub>-METRIC) e dados meteorológicos fornecidos pelo modelo RegCM4 (ET<sub>a</sub>-METRIC\_RegCM4), o MOD16 e o modelo RegCM4.

| Data       | ET <sub>a</sub><br>observada | ET <sub>a</sub><br>METRIC | ET <sub>a</sub><br>METRIC_RegCM4 | ET <sub>a</sub><br>MOD16 | ET <sub>a</sub><br>RegCM4 |
|------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 03/10/2005 | 3,22                         | 3,21                      | 3,57                             | 1,31                     | 10,21                     |
| 06/02/2006 | 4,16                         | 4,34                      | 4,33                             | 4,09                     | 1,09                      |
| 29/10/2006 | 2,75                         | 3,60                      | 3,88                             | 0,70                     | 4,07                      |
| 23/02/2007 | 4,23                         | 4,54                      | 4,75                             | 3,55                     | 4,04                      |

No *pixel* de validação, as estimativas de ET<sub>a</sub> do METRIC com dados meteorológicos do RegCM4 apresentaram desvio máximo de 11% em relação às estimativas realizadas com dados meteorológicos de superfície. Destaca-se ainda que o produto MOD16 subestimou a ET em 59% no dia 03/10/2005 e em 75% no dia 29/10/2006. Para as demais datas os erros do produto não ultrapassaram 16% para o *pixel* de validação. As estimativas ET<sub>a</sub> do RegCM4 apresentaram altos desvios em relação aos valores observados, chegando a um erro relativo de 217% em 03/10/2005 e de -74% em 06/02/2006.

Assim, a etapa seguinte foi a expansão das estimativas para o Estado de São Paulo, cujos resultados são apresentados na **Figura 4.13**. As estimativas de  $ET_a$  fornecidas pelo produto MOD16 e pelo RegCM4 também são apresentadas para cada data.

De maneira geral, as estimativas do METRIC seguem o padrão espacial apresentado pelo produto MOD16, com menores valores de  $ET_a$  no centro-norte e noroeste do Estado de São Paulo nas simulações dos meses de outubro, e valores maiores de  $ET_a$  nas simulações dos meses de fevereiro.



**Figura 4.13** Mapas de Evapotranspiração real ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) para o Estado de São Paulo nas datas de 03/10/2005, 06/02/2006, 29/10/2006 e 23/02/2007. Estimativas realizadas pelo METRIC com dados meteorológicos do RegCM4 e produtos MODIS, com resolução espacial de 1 km (a), (d), (g) e (j); dados do produto MOD16, com resolução espacial de 1 km (b), (e), (h) e (k); estimativas do RegCM4, com resolução espacial de 10 km (c), (f), (i) e (l). As áreas em preto ou branco no mapa indicam ausência de dados ou cobertura de nuvens.



Em 03/10/2005, o METRIC (**Figura 4.13a**) estimou valores mais baixos de  $ET_a$  ( $< 1,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ) para o centro-norte e extremo norte do Estado de São Paulo. Nessas áreas ocorrem maiores temperaturas de superfície, o que influencia diretamente no saldo de radiação e no fluxo de calor sensível. Assim o fluxo de calor latente e a ET diminuem, em função também do uso e ocupação da terra. O MOD16 (**Figura 4.13b**) apresenta valores abaixo de  $1 \text{ mm dia}^{-1}$  em uma área maior que a estimada pelo METRIC, enquanto o RegCM4 (**Figura 4.13c**) superestima a  $ET_a$  para a mesma parte do estado.

Já na simulação realizada para 06/02/2006, o METRIC (**Figura 4.13d**) ainda estima valores relativamente baixos de ET no noroeste do estado, em comparação com outras áreas, como a RA de Ribeirão Preto. Porém nota-se de maneira geral valores de  $ET_a$  maiores distribuídos pelo Estado de São Paulo, efeito da maior disponibilidade de energia para troca de calor latente e maior disponibilidade hídrica no período. Nessa data houve ocorrência de nuvens em algumas áreas do estado, pois trata-se de um período mais sujeito a nebulosidade, o que dificulta a seleção de imagens livres de nuvens. O padrão espacial da  $ET_a$  no Estado de São Paulo nessa data se aproxima do fornecido pelo MOD16 (**Figura 4.13e**), com valores menores de  $ET_a$  no noroeste e maiores no nordeste do estado, onde há maior concentração do cultivo da cana-de-açúcar. Nessa data o RegCM4 (**Figura 4.13f**) não apresentou dados de  $ET_a$  referentes à superfície na parte oeste do Estado de São Paulo, pois para essa área a simulação do modelo projetou ocorrência de nuvens. Por esse motivo o mapa apresentado na **Figura 4.13f** contém informações somente da parte leste do estado, onde os valores de  $ET_a$  foram inferiores aos obtidos pelo METRIC e pelo MOD16.

O comportamento da simulação do METRIC (**Figura 4.13g**) para 29/10/2006 se aproximou do produto MOD16 (**Figura 4.13h**), no que diz respeito a menores valores de  $ET_a$  para o noroeste do Estado de São Paulo, com valores menores que  $1 \text{ mm dia}^{-1}$ . Porém o MOD16 estima valores menores de  $ET_a$  para o nordeste do estado, discordando da estimativa do METRIC para essa área. O RegCM4 apresentou um resultado contrário, com maiores valores de  $ET_a$  no noroeste do estado (chegando a valores entre  $7,1$  e  $8 \text{ mm dia}^{-1}$ ). Para a data de 23/02/2007, o METRIC (**Figura 4.13j**) simula valores maiores de  $ET_a$  para o Estado de São Paulo, em comparação com as outras datas

analisadas. Considerando as regiões do Estado de São Paulo onde a cana-de-açúcar está distribuída, (**Figura 3.5**) os maiores valores de  $ET_a$  foram observados no noroeste do estado, chegando a valores entre 6,1 e 7 mm dia<sup>-1</sup>. O MOD16 (**Figura 4.13k**) apresentou valores entre 2,1 e 3 mm dia<sup>-1</sup> na maior parte da porção norte do Estado de São Paulo, seguindo um comportamento diferente do obtido pelo METRIC. O RegCM4 (**Figura 4.13l**) simulou menores valores de  $ET_a$  no noroeste do Estado de São Paulo, não concordando com a estimativa do METRIC para essa área.

Segundo Ruhoff et al. (2011), a obtenção da ET por sensoriamento remoto depende de parâmetros também estimados por dados de satélite, como índice de área foliar e temperatura de superfície. Logo, as estimativas de ET dependem diretamente da qualidade desses dados de entrada. O produto MOD16 utiliza em seu algoritmo dados de outros produtos como o MOD15 (IAF) e o MCD12 (uso e cobertura da terra), que são fonte de incertezas, contribuindo significativamente com os erros na estimativa de ET. Ruhoff et al. (2011b) descrevem o desafio de um algoritmo de ET global, que deve ser simples o suficiente para a obtenção de dados a nível global ao mesmo tempo que deve ser complexo o suficiente para capturar os processos de transferência de massa e energia em todos os biomas da superfície terrestre. Salienta-se ainda que o algoritmo não envolve outros parâmetros envolvidos na estimativa de ET, como a resistência da camada limite para a evaporação do solo.

A acurácia do MOD16 foi avaliada por Ruhoff (2011) para cana-de-açúcar no sudeste de São Paulo, onde o produto subestimou a  $ET_a$  em 13%, comparado a ET observada por um sistema de monitoramento de vórtices turbulentos. O produto apresenta melhor desempenho para as estimativas em escala mensal e anual para grandes áreas. Kim et al. (2012) também avaliaram o produto em diferentes climas e tipos de cobertura do solo, validando as estimativas com dados de 17 torres de fluxo distribuídas pela Ásia. Nesse caso, o produto apresentou melhor desempenho em áreas de floresta, não sendo encontradas variações significativas sob as diversas condições climáticas avaliadas.

SU et al. (2007) aplicaram dados meteorológicos espacializados da base global GLDAS (*Global Land Data Assimilation System*) e dados MODIS em simulações do balanço de

energia e ET com o modelo SEBS para áreas de diferentes climas e uso cobertura do solo, para testar o desempenho do modelo independente de medições de superfície. Os erros obtidos foram atribuídos a resolução espacial dos dados meteorológicos (~25km), que podem não se mostrar representativos em áreas com cobertura da superfície heterogênea.

O METRIC também estima parâmetros biofísicos com base em dados de sensoriamento remoto, além de fazer a calibração interna para o fluxo de calor sensível, que pode não se adequar a todas as áreas do Estado de São Paulo, que por sua vez possui diversas características de relevo e cobertura da terra. Outros fatores como a variação do ângulo de visada do sensor na extensão do Estado de São Paulo também podem afetar a estimativa de variáveis como o albedo e índices de vegetação, reduzindo a qualidade do resultado final da modelagem. Substituir os dados meteorológicos de superfície por dados simulados traz incertezas às estimativas, porém para os casos testados neste estudo, a velocidade do vento e a temperatura de superfície do RegCM4 se mostraram próximas aos valores observados em superfície para as respectivas datas, propiciando resultados de  $R_n$ , H e LE próximos aos obtidos com dados meteorológicos de superfície. Além disso, a aplicação do modelo digital de elevação do SRTM permite uma melhor descrição do terreno na modelagem, melhorando a qualidade dos resultados obtidos para grandes áreas.

Um refinamento na resolução espacial das variáveis meteorológicas simuladas pelo RegCM4 pode proporcionar uma distribuição mais representativa das mesmas na área de estudo, assim como discutido por Su et al. (2007) para os dados GLDAS utilizados em seu estudo.



## 5. CONCLUSÕES

Os fluxos do balanço de energia e a evapotranspiração, ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, foram marcados pela sazonalidade com dependência direta da energia disponível na superfície e dos parâmetros da cultura como albedo e índice de área foliar.

O albedo modelado foi influenciado pela contribuição do solo na reflectância da superfície, pelo ângulo de visada do sensor e pela precipitação. Resultados mais precisos do balanço de radiação foram observados para fases mais adiantadas do crescimento da cultura, quando os valores estimados de albedo se aproximaram dos observados. A calibração do METRIC permitiu que os erros oriundos das estimativas de  $R_n$  e  $G$  fossem absorvidos por  $H$ , mostrando-se eficiente na modelagem de  $LE$  e da  $ET_a$ , cujos valores estimados no sítio experimental foram compatíveis com os descritos na literatura.

A fração da evapotranspiração de referência estimada pelo METRIC foi equivalente ao coeficiente da cultura ( $K_c$ ), permitindo que a  $ET_a$  instantânea fosse extrapolada para valores diários. Também foi possível gerar curvas de  $K_c$  para a cana-de-açúcar, mostrando a aplicabilidade da técnica de sensoriamento remoto na geração de estimativas de produtividade.

As estimativas de  $ET_a$  na RA de Ribeirão Preto seguiram o mesmo comportamento verificado no sítio experimental e em média atingiram os mesmos valores ( $\sim 4,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ). Como a distribuição espacial da cana-de-açúcar ocorre em diferentes estádios fenológicos, as estimativas de  $ET_a$  referem-se à cultura desde a fase inicial de crescimento até o pleno desenvolvimento.

Gerar estimativas de evapotranspiração em escala estadual é desafiador, porém a incorporação dos dados meteorológicos do RegCM4, produtos MODIS e o modelo digital de elevação na aplicação do METRIC se mostrou viável, possibilitando superar as limitações espaciais deste modelo, além de melhorar a qualidade de suas estimativas em larga escala. O padrão espacial apresentado pelas estimativas do METRIC para o Estado de São Paulo mostrou concordância com o produto MOD16, evidenciando o potencial da metodologia. No sítio experimental os valores de  $ET_a$  estimados pelo METRIC com

dados do RegCM4 se aproximaram daqueles simulados pelo modelo com os dados meteorológicos de superfície, com desvio máximo de 11%. Em comparação com a  $ET_a$  observada *in situ*, na estação chuvosa o desempenho do METRIC com dados do RegCM4 foi semelhante ao do MOD16, porém na transição da estação seca para a chuvosa o METRIC apresentou maior precisão em suas estimativas, com erro até 5 vezes menor que o do produto MODIS.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Sugere-se melhorar o modelo para estimativa do albedo, que pode ser adaptado para áreas de cana-de-açúcar, gerando coeficientes ajustados para a cultura. Além disso, recomenda-se incorporar ao modelo outras informações espacializadas, como incidência de precipitação, fator de grande importância na modelagem do balanço de energia e da evapotranspiração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; SILVA, W. F.; ADAMI, M.; MELLO, M. P. Remote sensing images in support of environmental protocol: monitoring the sugarcane harvest in São Paulo State, Brazil. **Remote Sensing**, v. 3, n. 12, p. 2682–2703, 2011.
- AHAMED, T.; TIAN, L.; ZHANG, Y.; TING, K. C. A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. **Biomass and Bioenergy**, v.35, n.7, p. 2455-2469, 2011.
- ALLEN, R., IRMAK, A.; Trezza, R.; HENDRICKX, J. M. H.; BASTIAANSSEN, W.; KJAERGAARD, J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 26, p. 4011–4027, 2011.
- ALLEN, L. G.; PEREIRA, L. S; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and drainage paper 56).
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) advanced training and user's manual - Idaho implementation**. Idaho: Idaho University, 2002. 98 p.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. **Journal of irrigation and drainage**. v.133, n.4, p. 380-394, 2007a.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Applications. **Journal of Irrigation and drainage**, v.133, n.4, p. 395–406, 2007b.
- ALLEN, R. G., 2013. **Manual of RefET: Reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations Version 3.1**, University of Idaho Disponível em: < <http://extension.uidaho.edu/kimberly/files/2013/03/Ref-ET-V3.1-Users-Manual.pdf>>. Acesso em: 01 set. 2013.
- ALLEN, R.G.; ROBISON, C.; TREZZA, R.; GARCIA, M.; KJAERGAARD, J. H. Comparison of evapotranspiration images from MODIS and Landsat along the Middle Rio Grande of New Mexico. In: WILLIAM T. PECORA MEMORIAL REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 17, 2008, Denver, Colorado. **Proceedings...** Denver: [s.n], 2008. 13p.
- ALVALÁ, R. C. S. **Estudo da partição de energia em terrenos complexos (áreas desflorestadas e florestadas)**. 1993. 177 p. (INPE-5522-TDI/519). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1993.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS ENVIRONMENTAL / WATER RESOURCES INSTITUTE (ASCE/EWRI). **Standardized reference evapotranspiration equation**. Reston, VA, 2005. p. 147.

- BALBONTÍN-NESVARA C.; CALERA-BELMONTE, A.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; CAMPOS-RODRÍGUEZ, I.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, M. L.; TORRES-PRIETO, E. Vineyard evapotranspiration measurements in a semiarid Environment: eddy covariance and Bowen ratio comparison. **Agrociencia**, v. 45, n. 1, p. 87–103, 2011.
- BASTIAANSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. 1995. 273 p. Tese (Ph.D.) - Wageningen Agricultural University, Wageningen, 1995.
- BASTIAANSEN, W. G. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, n. 1-2, p. 87-100, 2000.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C., **Manual de irrigação**. 7. ed. Viçosa: Editora UFV, 2005.
- BEYER, H. L. **Hawth's analysis tools for ArcGIS**. 2004. Disponível em: <<http://www.spatial ecology.com/htools>> Acesso em: 16 jan. 2014.
- BRAY, S. C. **A cultura da cana-de-açúcar no Vale do Paranapanema: um estudo de geografia agrária**. 1980. 304p. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.
- BRÉDA, N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of experimental botany**, v. 54, n. 392, p. 2403-17, 2003.
- BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications**. Dordrecht, Netherlands: D. Reidel, 1982. 299p.
- CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; GASH, J. H.; LIGO, M. A. V.; TATSCH, J. D.; FREITAS, H. C.; BRASILIO, E. Water use in a sugarcane plantation. **GCB Bioenergy**, v. 4, n. 5, p. 555-565, 2012.
- CABRAL, O.M.R., ROCHA, H.R., LIGO, M.A.V.; BRUNINI, O.; SILVA-DIAS, M.A.F. Fluxos turbulentos de calor sensível, vapor de água e CO<sub>2</sub> sobre plantação de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*) em Sertãozinho-SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, V. 18, n. 1, p. 61-70, 2003.
- CABRAL. **O Sistema solo-vegetação-atmosfera: observação e modelagem da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**. 2001, 97p. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- CARRASCO-BENAVIDES; M.; ORTEGA-FARÍAS, S.; LAGOS, L. O.; KLEISSL, J.; MORALES, L.; POBLETE-ECHEVERRÍA, C.; ALLEN, R. G. Crop coefficients and actual evapotranspiration of a drip-irrigated Merlot vineyard using multispectral satellite images. **Irrigation Science**, v. 30, n. 6, p. 485–497, 15 ago. 2012.
- CARMEL, Y. Controlling data uncertainty via aggregation in remotely sensed data. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v.1, p.39-41, 2004.
- CENTRO DE PESQUISA METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA (Cepagri). **A classificação climática de Koeppën para o Estado de**



São Paulo. Disponível em: <<http://www.cepagri.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>. Acesso em: 16 fev. 2013.

COSTA, M. C. **Estimativa da evapotranspiração regional considerações teóricas**. Primeira versão. Ano 1, nº 122, Porto Velho: UFRO, set 2002.

DOMINGUES L. M.; ROCHA, H. R.; CABRAL, O.; TATSCH, J. D.; FREITAS, H. Padrões micrometeorológicos da plantação de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17. 2011, Guarapari. Riscos Climáticos e cenários agrícolas futuros: **Anais...** Guarapari: Incaper, 2011. 1 CD-ROM.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979. 193p. (FAO-Irrigation and Drainage Paper n. 33).

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

DORAISWAMY, P.C.; HATFIELD, J.L.; JACKSON, B.; AKHMEDOV, B.; PRUEGER, J.; STERN, A. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v.92, p.548-559, 2004.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York: John Wiley and Sons, 109p., 1980.

EVANGELISTA. B. A. **Projeção de cenários atuais e futuros de produtividade de cana-de-açúcar em ambiente de cerrado**. 2011, 164p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

FALGE, E.; BALDOCCHI, D.; OLSON, R.; ANTHONI, P.; AUBINET, M.; BERNHOFER, C.; BURBA, G.; CEULEMANS, R.; CLEMENT, R.; DOLMAN, H.; GRANIER, A.; GROSS, P.; GRUNWALDE, T.; HOLLINGER, D.; JENSEN, N. O.; KATUL, G.; KERONEN, P.; KOWALSKI, A.; LAI, C. T.; LAW, B. E.; MEYERS, T.; MONCRIEFF, J.; MOORS, E.; MUNGER, J. W.; PILEGAARD, K.; RANNIK, U.; REBMANN, C.; SUYKER, A.; TENHUNEN, J.; TU, K., K.; VERMA, S.; VESALA, T.; WILSON, K.; WOFSY, S. Gap filling strategies for long term energy flux data sets. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 107, n. 1, p. 71–77, 2001.

FOLHES, M. T.; RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Remote Sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. **Agricultural Water Management**, v.96, n.10, 1398-1408, 2009.

FOLHES, M. T. **Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos**. 2007. 186p. (INPE-14804-TDI/1256). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I. D.; PEET, M. M. (Ed.). **Crop-water relations**. New York: Wiley-Interscience, p. 445-479, 1983.

GEORGESCU, M.; LOBELL, D. B.; FIELD, C. B.; MAHALOV, A. Simulated hydroclimatic impacts of projected Brazilian sugarcane expansion. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 5, p. 972–977, 2013.

GIONGO, P. R. **Mapeamento do balanço de energia e evapotranspiração diária por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. 2009. 123p. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo, 2011.

GIORGI et al. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. **Climate Research**, v. 52, p. 7–29, 22 mar. 2012.

GOLTZ, E. **Avaliação do produto MOD09 (Reflectância da superfície) fornecido pelo sensor MODIS/Terra através de radiometria de campo em uma área de soja**. 2007, 133p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

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.

GONZÁLEZ-SANPEDRO, M. C.; TOAN, T. LE; MORENO, J.; KERGOAT, L.; RUBIO, E. Seasonal variations of leaf area index of agricultural fields retrieved from Landsat data. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 3, p. 810-824, 2008.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Caracterização socioeconômica das regiões do Estado de São Paulo**: Região Administrativa de Ribeirão Preto. Disponível em: <[http://www.planejamento.sp.gov.br/noti\\_anexo/files/uam/trabalhos/Ribeir%C3%A3o%20Preto.pdf](http://www.planejamento.sp.gov.br/noti_anexo/files/uam/trabalhos/Ribeir%C3%A3o%20Preto.pdf)> Acesso em: 15 jan. 2013.

GOWDA, P.; CHAVEZ, J.; COLAIZZI, P.; EVETT, S.; HOWELL, T.; TOLK, J. ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. **Irrigation Science** 26, p.223-237, 2008.

HE, T.; LIANG, S.; WANG, D.; WU, H.; YU, Y.; WANG, J. Estimation of surface albedo and directional reflectance from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) observations. **Remote Sensing of Environment**, v. 119, n. 1, p. 286-300, 2012.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote sensing of environment**, v. 25, p.295-309, 1988.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G.; Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR). **Canasat** - Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra. 2013. Disponível em <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/index.html>> Acesso em: 10 nov. de 2013.

IRMAK, A. **Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling**. InTech, Rijeka Croatia. 526 p., 2011.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an Earth resource perspective**. 2 ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall, 2006. 608 p. (Prentice Hall series in geographic information science).

JIN, Y.; RANDERSON, J. T.; GOULDEN, M. L. Continental-scale net radiation and evapotranspiration estimated using MODIS satellite observations. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 9, p. 2302-2319, set. 2011.

JUNG, M.; REICHSTEIN, M.; CIAIS, P.; SENEVIRATNE, S. I.; SHEFFIELD, J., GOULDEN, M. L.; BONAN, G.; CESCATTI, A.; CHEN, J.; DE JEU, R.; DOLMAN, A. J.; EUGSTER, W.; GERTEN, D.; GIANELLE, D.; GOBRON, N.; HEINKE, J.; KIMBALL, J.; LAW, B. E.; MONTAGNANI, L.; MU, Q.; MUELLER, B.; OLESON, K.; PAPALE, D.; RICHARDSON, A. D.; ROUPSARD, O.; RUNNING, S.; TOMELLERI, E.; VIOVY, N.; WEBER, U.; WILLIAMS, C.; WOOD, E.; ZAEHLE, S.; ZHANG, K.; Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. **Nature**, v.467, n. 7318, p. 951-954, 2010.

JUÁREZ, R. I. N. **Variabilidade climática regional e controle da vegetação no Sudeste: Um estudo de observações sobre cerrado e cana-de-açúcar e Modelagem Numérica da atmosfera**. 2011. 185p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

KOFFLER, N. F.; DONZELI, P. L. Avaliação dos solos brasileiros para cultura da cana-de-açúcar. In: Paranhos, S. B. (coord.) **Cana-de-açúcar. Cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 19-41.

KIM, H. W.; HWANG, K.; MU, Q.; LEE, S. O.; CHOI, M. Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 2, p. 229-238, 2012.

LIANG. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 76 n.1, p. 213–238, 2000.

LYRA, G.B; SILVEIRA, E. L.; LYRA, G. B.; PEREIRA, C.R.; SILVA, L.D.B.; SILVA, G. M. Coeficiente da cultura da cana-de-açúcar no estágio inicial de desenvolvimento em campos dos Goytacazes, RJ. **Irriga Botucatu**, v.17, n.1, p 102-113, 2012.

LIRA, V. M. DE. **Obtenção de parâmetros biofísicos e evapotranspiração da cana-de-açúcar mediante imagens orbitais na região do Sub Médio São Francisco**. 2008. 161p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

LOARIE, S. R.; LOBELL, D. B.; ASNER, G. P.; MU, Q.; FIELD, C. B. Direct impacts on local climate of sugar-cane expansion in Brazil. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 2, p. 105-109, 2011.

MACHADO, E. C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. 1981, 115p. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1981.

MANUAL DO LICOR 200X – **Instruction Manual - LI200X Pyranometer Revision:** 6/10. Disponível em <<http://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/li200x.pdf>> Acesso em 22 jan. 2014.

MAYER D. G.; BUTLER D. G. Statistical validation. **Ecological Modelling**, v.68, p.21–32, 1993.

MEDINA, J.L.; CAMACHO, E.; RECA, J., LÓPEZ, R.; ROLDÁN, J. Determination and analysis of regional evapotranspiration in Southern Spain based on Remote Sensing and GIS. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 23, n. 4, p.427-432, 1998.

MEIRELES, M., **Estimativa da evapotranspiração real pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagem Landsat 5-TM na bacia do Acaraú-CE.** 2007. 89 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo.** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 10 de julho. 2013.

MU, Q., HEINSCH, F.A., ZHAO, M., RUNNING, S.W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, n. 4, p. 519-536, 2007.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 1781-1800, 2011.

NISHIDA, K.; NEMANI, R.R.; RUNNING, S.W.; GLASSY, J.M. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. 9, p. 4270, 2003.

NORMAN, J. M.; KUSTAS, W. P.; HUMES, K. S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. **Agricultural and Forestry Meteorology**, v.77, p. 263-293, 1995.

OLIVEIRA, G.; MORAES, E. C.; Validação do balanço de radiação obtido a partir de dados MODIS/TERRA na Amazônia com medidas de superfície do LBA. *Acta Amazonica*, v.43, n.3, p.353-363, 2013.

OLIVEIRA, J. B. CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo.** Campinas: Instituto Agrônomo; Rio de Janeiro: Embrapa - Solos, 1999, 64 p + Mapa 1.500.000.

OLIVEIRA, G. **Modelagem do Balanço de Energia e Evapotranspiração na Amazônia brasileira com uso de imagens MODIS e ASTER.** 2012. 227p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

PAIVA, C. M.; TSUKAHARA, R. Y.; FRANÇA, G. B.; NICACIO, R. M. Estimativa da evapotranspiração via sensoriamento remoto para fins de manejo de irrigação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 101-107. DVD, Internet. ISBN

978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em:  
<<http://urlib.net/3ERPFQTRW/39UL4E2>>. Acesso em: 16 set. 2012.

PEREIRA, E.B., MARTINS, F.R., ABREU, S.L., COUTO, P., STUHLMANN, R.; COLLE, S. Effects of burning of biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil. **Solar Energy**, v. 68, n. 1, p. 91-107, 2000.

PEREIRA, G.; CARDOZO, F. S.; MORAES, E. C.; PRADO, B. R.; SILVA, G. B. S.; ARAI, E. Estudo preliminar do impacto do cultivo da cana-de-açúcar: alterações no albedo e liberação de energia radiativa através das queimadas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos, INPE, 2009. p. 325-332. Disponível em:  
<<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.00.30/doc/325-332.pdf>>. Acesso em 16 fev. 2013.

PEREIRA, G. **Impactos das atualizações do uso e cobertura da terra e das características físico-químicas da vegetação na América do Sul em modelos climáticos**. 2012. 105p. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas – Universidade de São Paulo, 2012.

PICOLI, M. C. A. **Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais: estudo de caso Usina Catanduva**. 2007. 90p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007.

PONZONI, F.J.; SHUMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**, São José dos Campos: Ed. A Silva Vieira, 2010, 127p.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 57, n. 4, p. 241-262, 2003.

ROCHA, H. R. **Relações Funcionais de Clima e Biosfera no Brasil**. 2004. 79p. Tese (Livre Docência) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., Washington, D. C., 1973. **Proceedings...** Washington, D. C.: NASA. Goddard Space Flight Center, 1973. v. 1, p. 309-317. (NASA SP-351).

RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. **Sensor Modis e Suas Aplicações Ambientais no Brasil**. São Jose dos Campos, SP: Editora Parêntese, 2007.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D.A.; SILVA, W.F.; SUGAWARA, L.M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M.A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010.

RUHOFF, A. L.; PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W.; ARAGÃO, L.E.O.C.; ROCHA, H.R., MALHI, Y.S. A MODIS-based energy balance to estimate evapotranspiration for

clear-sky days in brazilian Tropical Savannas. **Remote Sensing**, v. 4, n. 12, p. 703-725, 12 mar. 2012.

RUHOFF, A. L. **Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais**. 2011. 162p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RUHOFF, A. L. et al. MOD16: Desafios e limitações para a estimativa global de evapotranspiração. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 15., 2011, Curitiba. **Anais eletrônicos...** Curitiba: INPE, 2011, Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0673.pdf>> Acesso em: 21 jan 2014.

RUHOFF, A. L.; SALDANHA, C. B.; COLLISCHONN, W. Análise multivariada do processo de evapotranspiração em áreas de Cerrado e cana-de-Açúcar. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 4, p. 137-146, 2009.

SCARDUA, R.; ROSENFELD, V. **Irrigação de cana-de-açúcar**. In: PARANHOS, S. B. (coord.) cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas, Fundação Cargill, v.1, cap. 3, p. 373- 431. 1987.

SCHERER-WARREN. **Metodologia para construção de séries temporais de evapotranspiração por técnicas de Sensoriamento Remoto**. 2011. 150p. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília,, Brasília, 2011.

SCHERER-WARREN. Desmembramento de estimativas de evapotranspiração obtidas por sensoriamento remoto nas componentes de evaporação e transpiração vegetal. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 02, p. 361–373, 2012.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E. NÓBREGA, J. C. M. (org.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 19-36.

SELLERS, P.; DICKINSON, R.; RANDALL, D. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. **Science**, v. 275, n. 5299, p.502-509, 1997.

SILVA, E. M. P.; SAKATSUME, F. **A política brasileira de biocombustíveis**. 2007. Disponível em: <[http://www.conservation.org.br/publicacoes/files/7\\_Politica\\_Biocombust\\_E\\_Mirra.pdf](http://www.conservation.org.br/publicacoes/files/7_Politica_Biocombust_E_Mirra.pdf) >. Acesso em: 23 de janeiro de 2014.

SU, Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.6, n.1, p.85-99, 2002.

SU, H.; WOOD, E.F.; MCCABE, M.F.; SU, Z. Evaluation of remotely sensed evapotranspiration over the CEOP EOP-1 Reference sites. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, V. 85A, p. 439-459, 2007.

SUGAWARA, L. M. **Variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar por meio de um modelo agrônomico**. 2007. 92 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

- TASUMI, M.; ALLEN, R.; TREZZA, R. At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. **Journal of Hydrologic Engineering**, n. February, p. 51–63, 2008.
- TASUMI et al. Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 131, n. February, p. 94–109, 2005.
- TASUMI, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery**. 2003, 357p. Tese (PhD. *Biological and Agricultural Engineering*). University of Idaho, Idaho, 2003.
- 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. D. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated crops and natural vegetation in the São Francisco River Basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, n. 5, p. 1287–1319, 6 maio. 2010.
- TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; KIEHL, J. Earth's global energy budget. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 90, n. 3, p. 311-323, 2009.
- TURNER, D.P.; COHEN, W.B.; KENNEDY, R.E.; FASSNACHT, K.S.; BRIGGS, J.M. Relationships between leaf area index and Landsat TM Spectral Vegetation Indices across three temperate zone sites. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.70, p.52-68, 1999.
- TWINE et al. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, n. 3, p. 279–300, jun. 2000.
- ÚNICA – União das indústrias de cana-de-açúcar, 2014. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/>>. Acesso em: 21 jan. 2014.
- VAREJÃO-SILVA, M. A., **Meteorologia e Climatologia** – Brasília: INMET, Gráfica e Editora PAX, 2001. 532p.
- VERMOTE, E.F.; VERMEULEN, A. **Algorithm technical background document – Atmospheric correction algorithm: Spectral reflectance (MOD09)**. Maryland: University of Maryland, abr. 1999. 107p. (NAS5-96062)
- VERMOTE, E.; TANRÉ, D.; DEUZÉ, J. L.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J. J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, p. 675-686, 1997.
- WAN, Z. **MODIS land-surface temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD)**, National Aeronautics and Space U.S. Department of Commerce, Washington, 1999.
- WANG, Y.; WOODCOCK, C. E.; BUERMANN, W.; STENBERG, P.; VOIPIO, P.; SMOLANDER, H.; HÄME, T.; TIAN, Y.; HU, J.; KNYAZIKHIN, Y.; MYNENI, R.B.

Evaluation of the MODIS LAI algorithm at a coniferous forest site in Finland. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 1, p. 114-127, 2004.

WEISS M., BARET, F., SMITH, G.J., JONCKHEERE, I., AND COPPIN, P. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.121, n.1, p.37-53, 2004.



## APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA

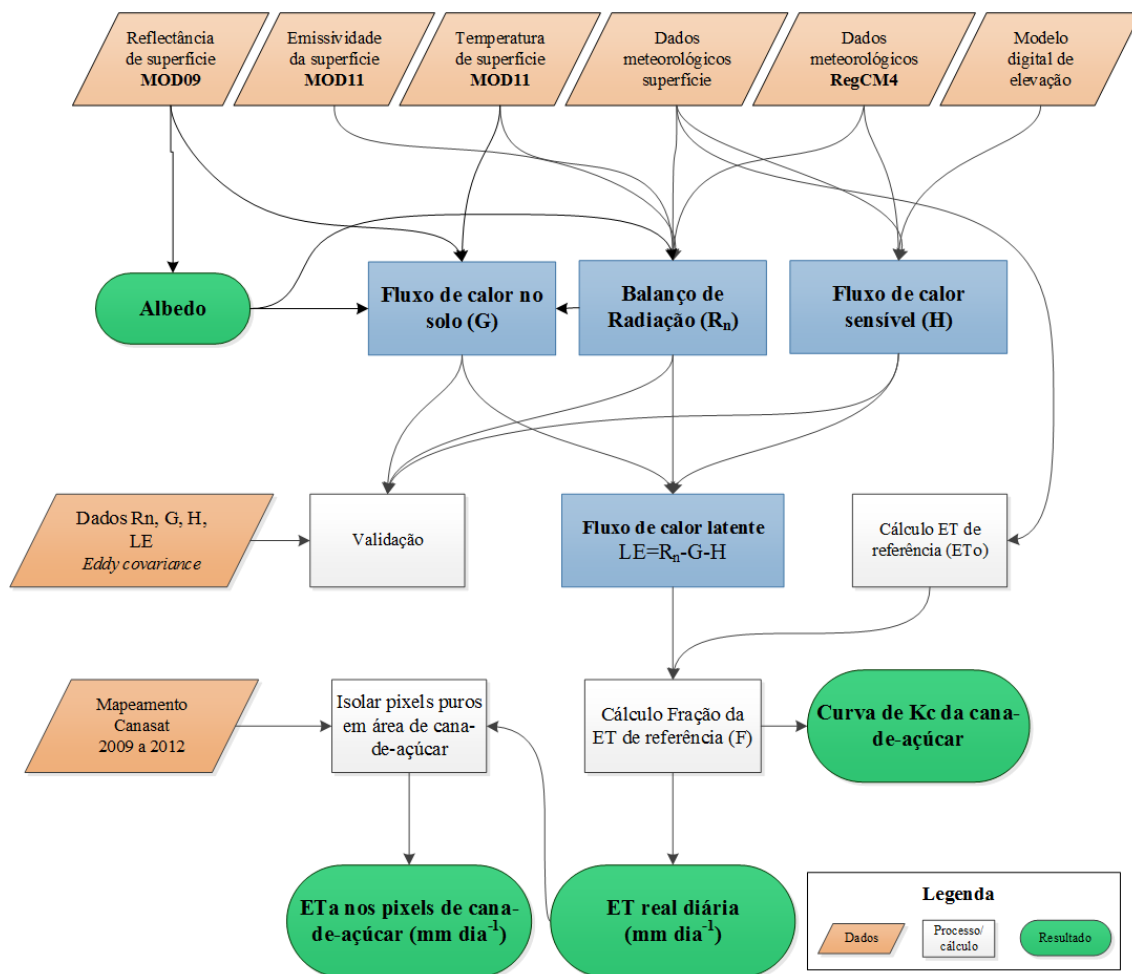
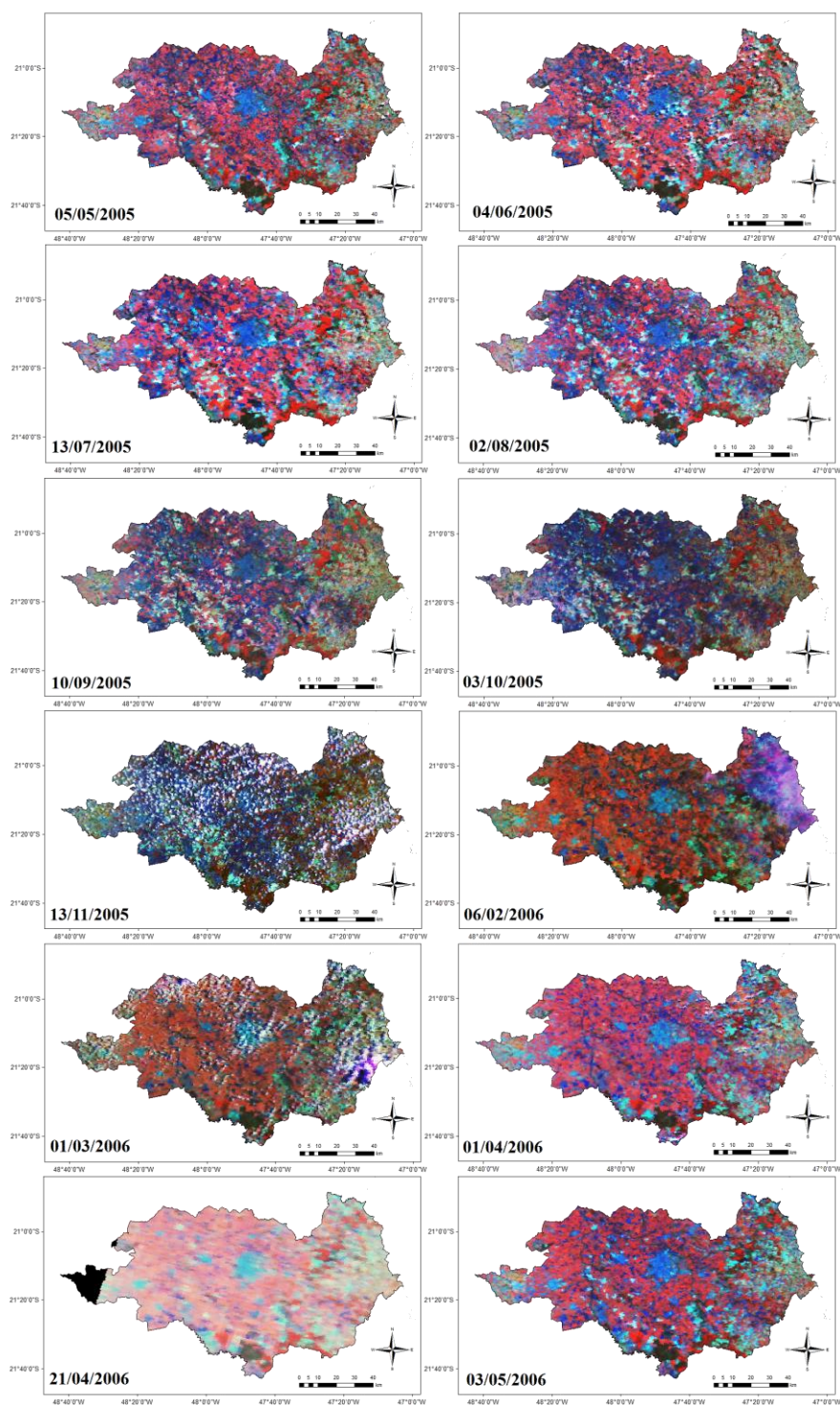


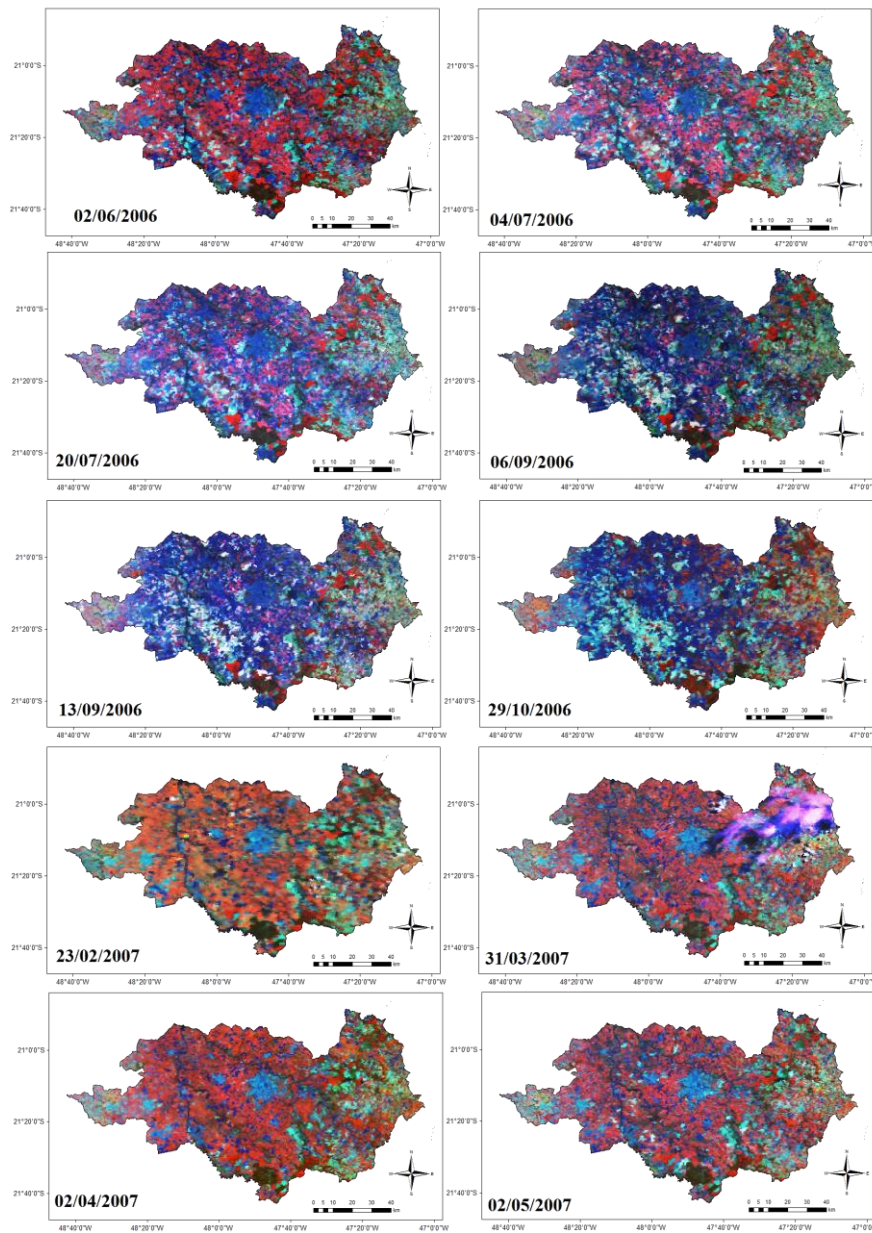
Figura A. 1 Fluxograma da metodologia.



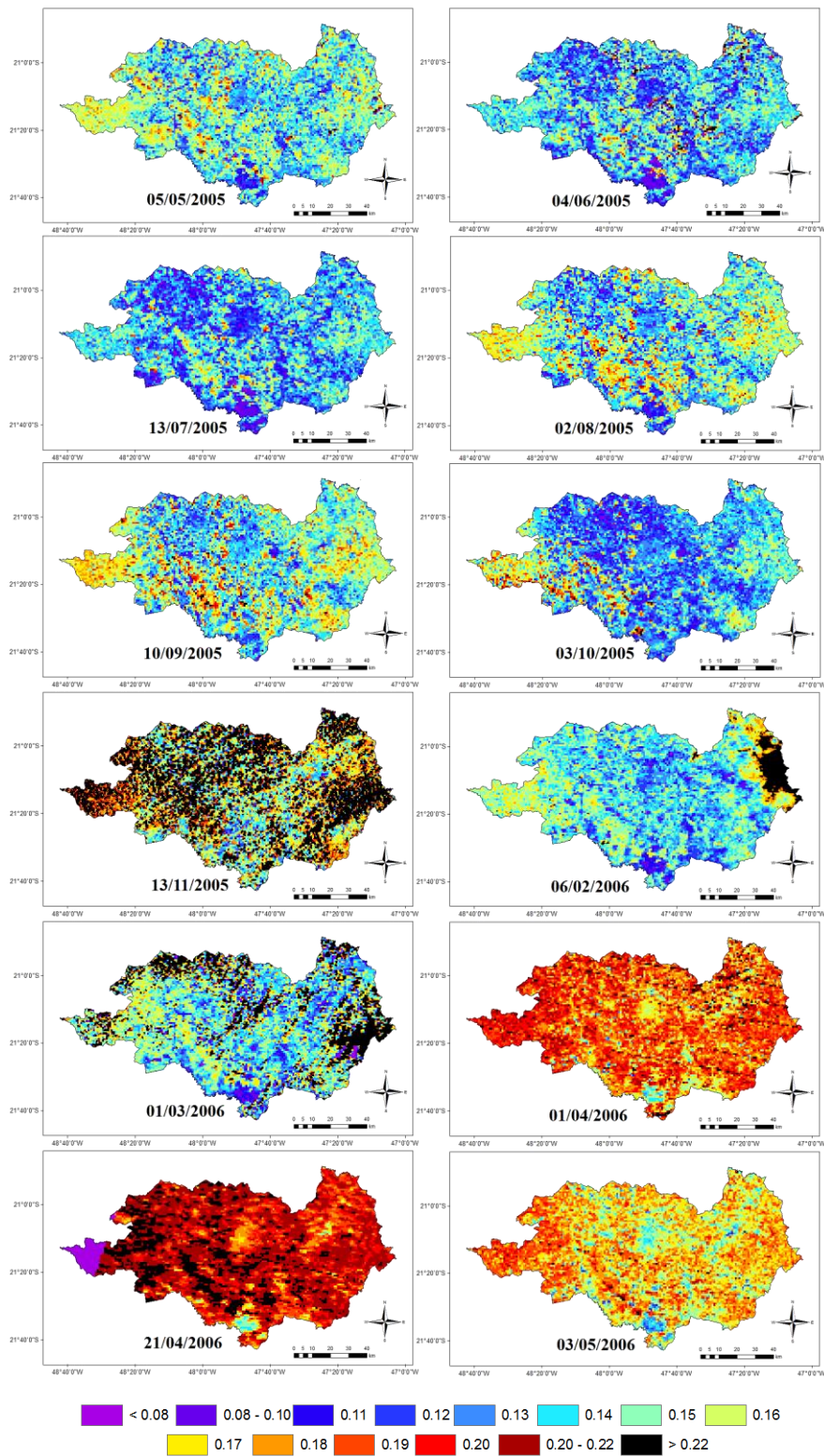
## APÊNDICE B – MAPAS



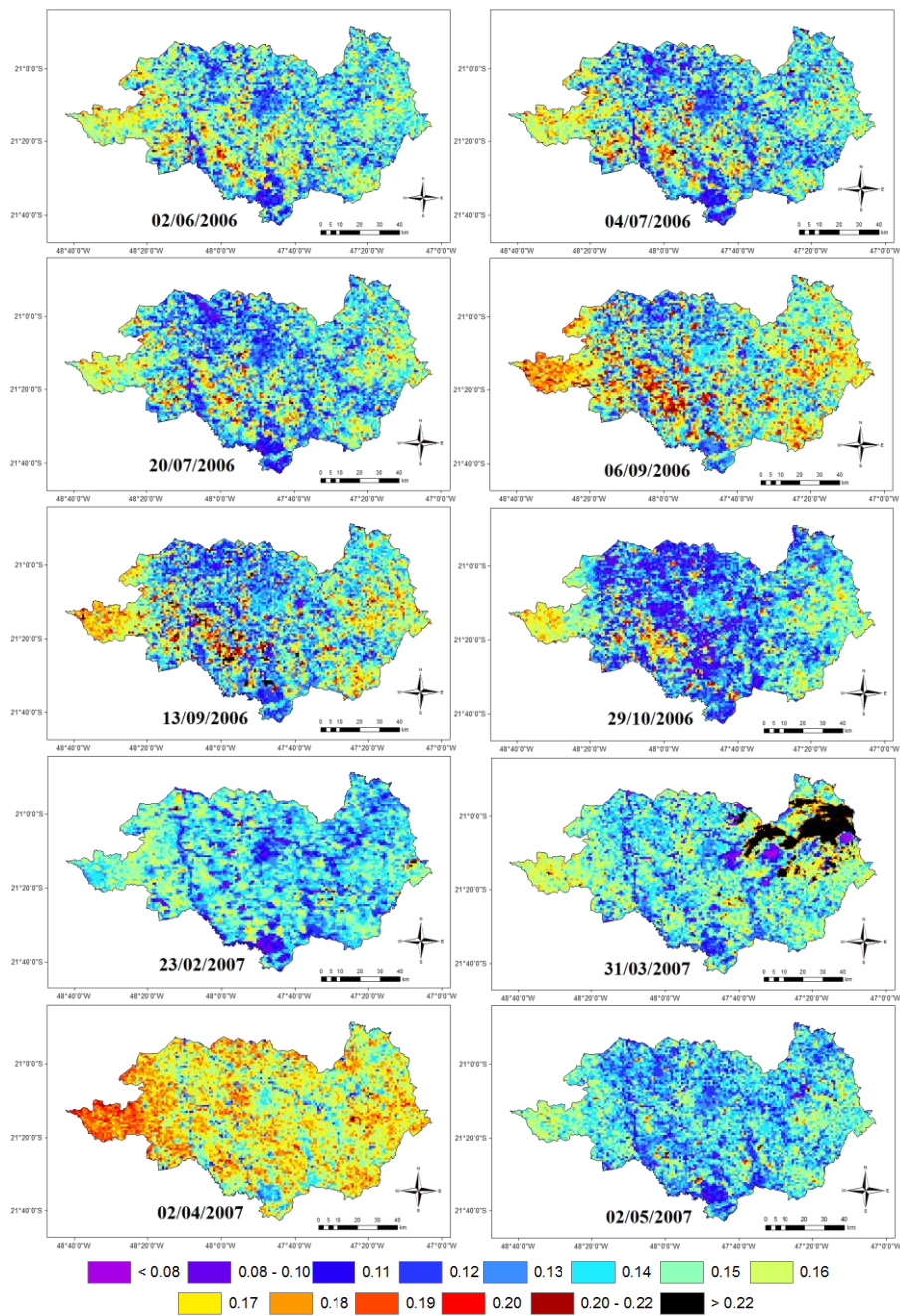
**Figura B. 1** Mapas da Região Administrativa de Ribeirão Preto - Produto MOD09 – Reflectância de superfície – Composições coloridas RGB 261. – Safra 2005.



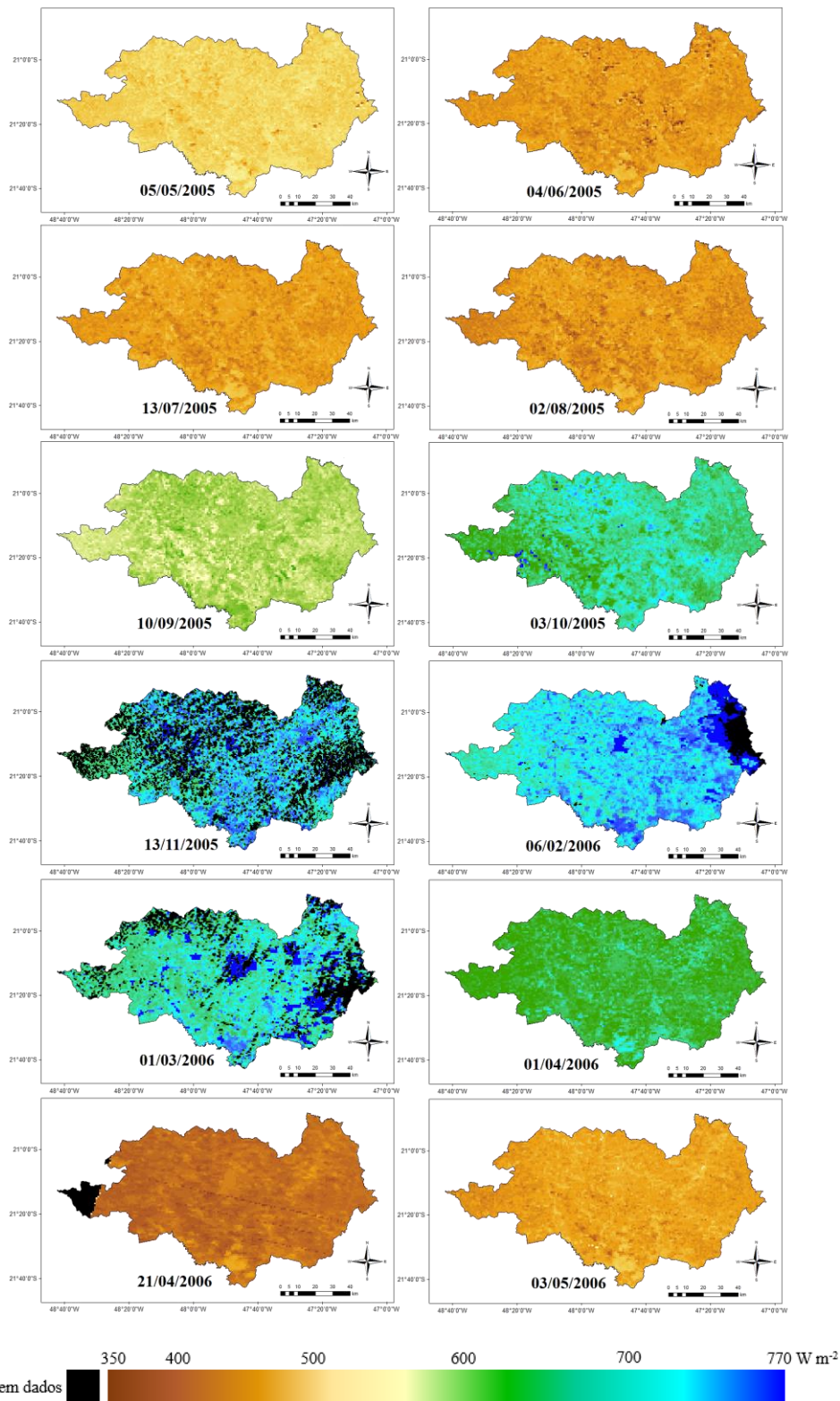
**Figura B. 2** Mapas da Região Administrativa de Ribeirão Preto - Produto MOD9 - Reflectância de superfície – Composições coloridas RGB 261. – Safra 2006.



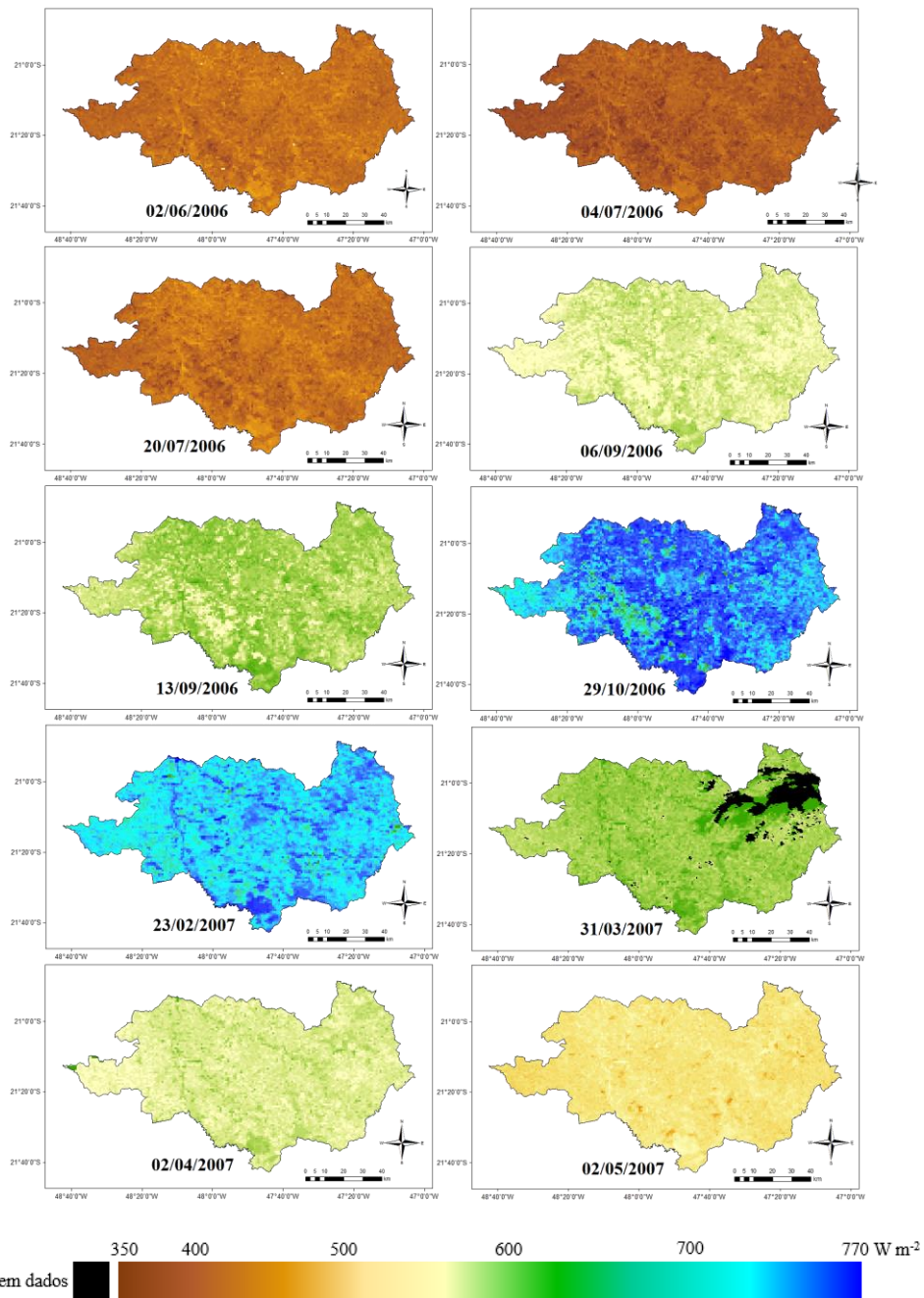
**Figura B. 3** Mapas de albedo de superfície na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2005.



**Figura B. 4** Mapas de albedo de superfície na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2006.

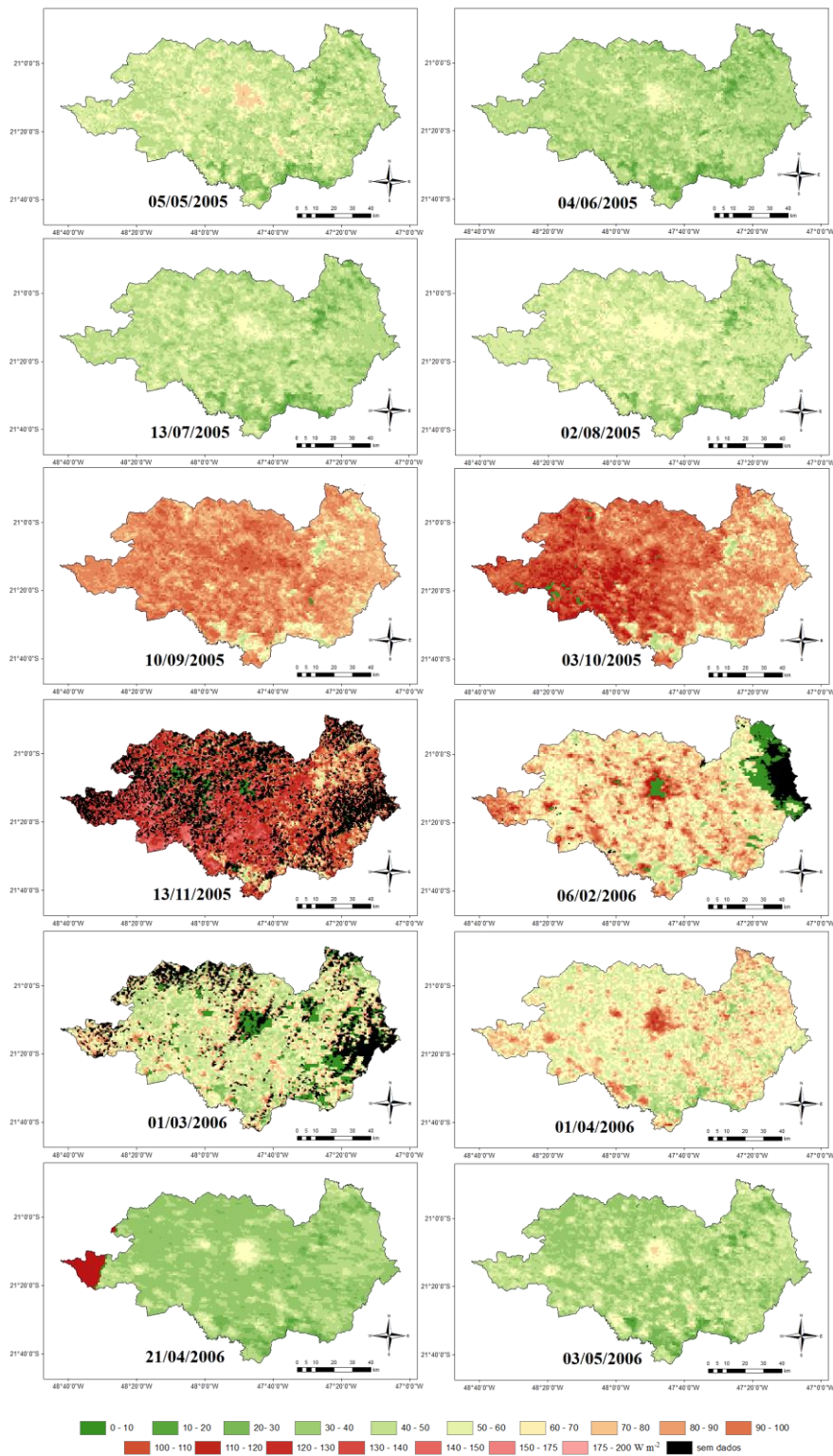


**Figura B. 5** Mapas de saldo de radiação na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2005.

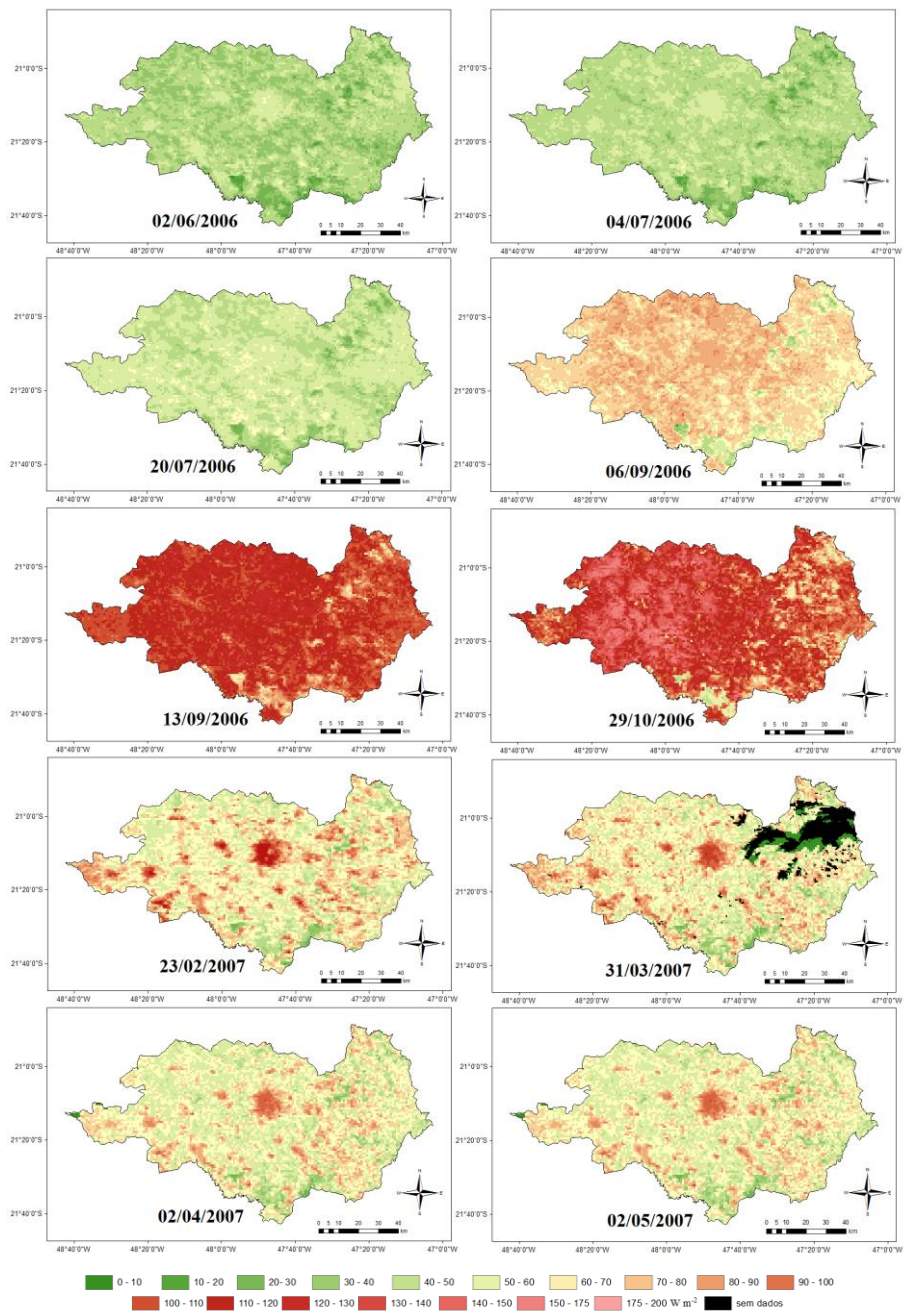


**Figura B. 6** Mapas de saldo de radiação na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2006.

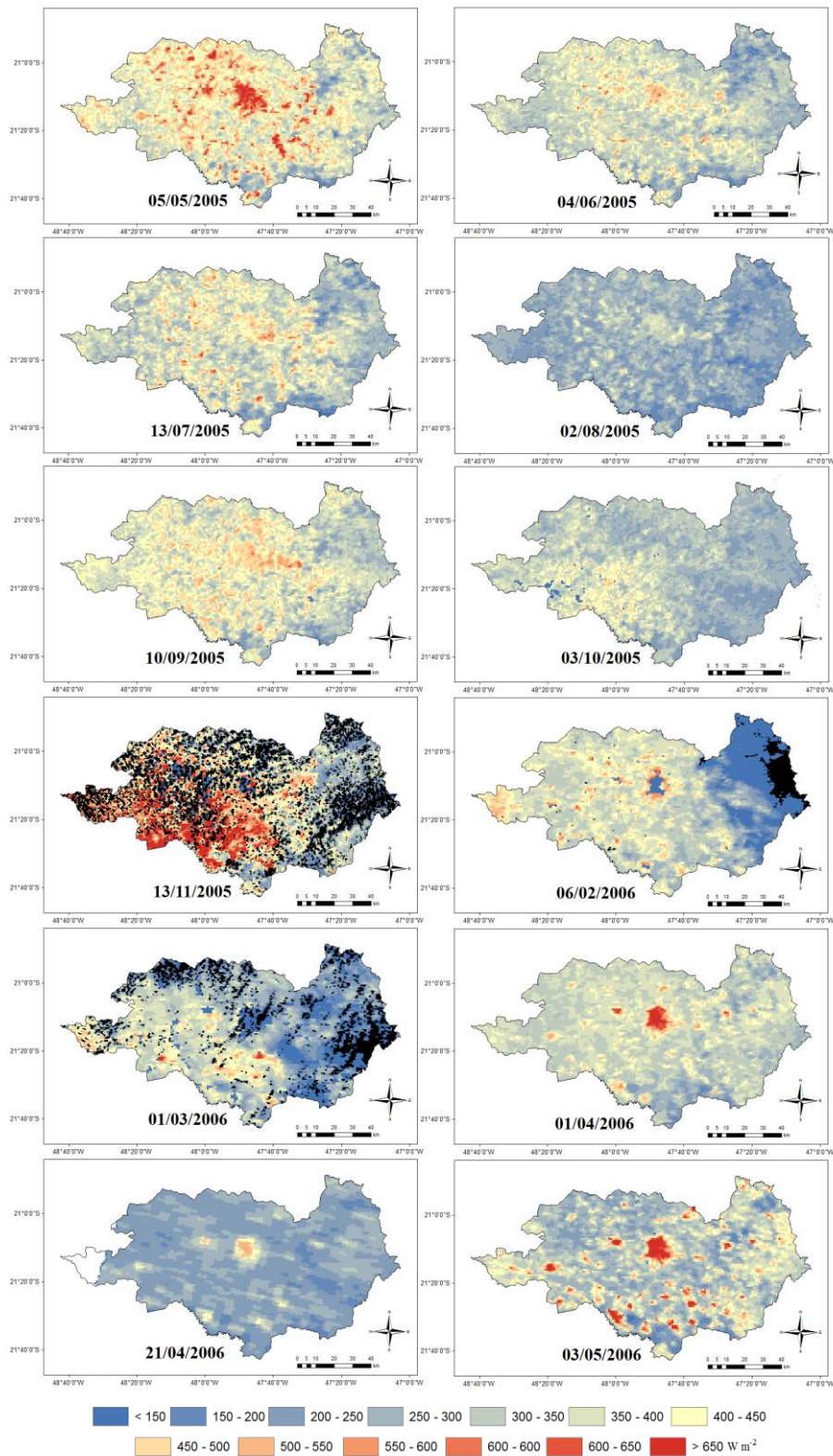




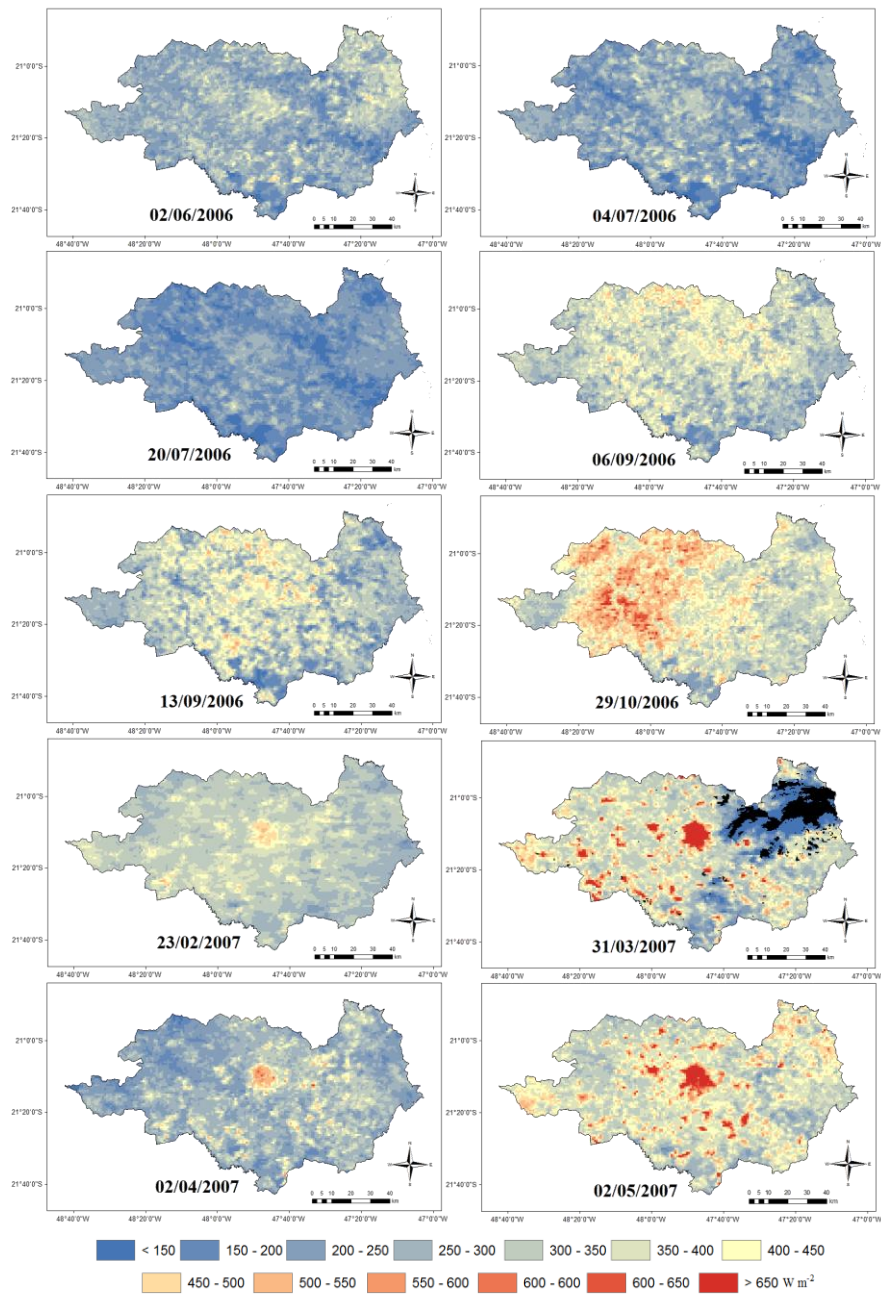
**Figura B. 7** Mapas de fluxo de calor no solo (G) na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2005. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.



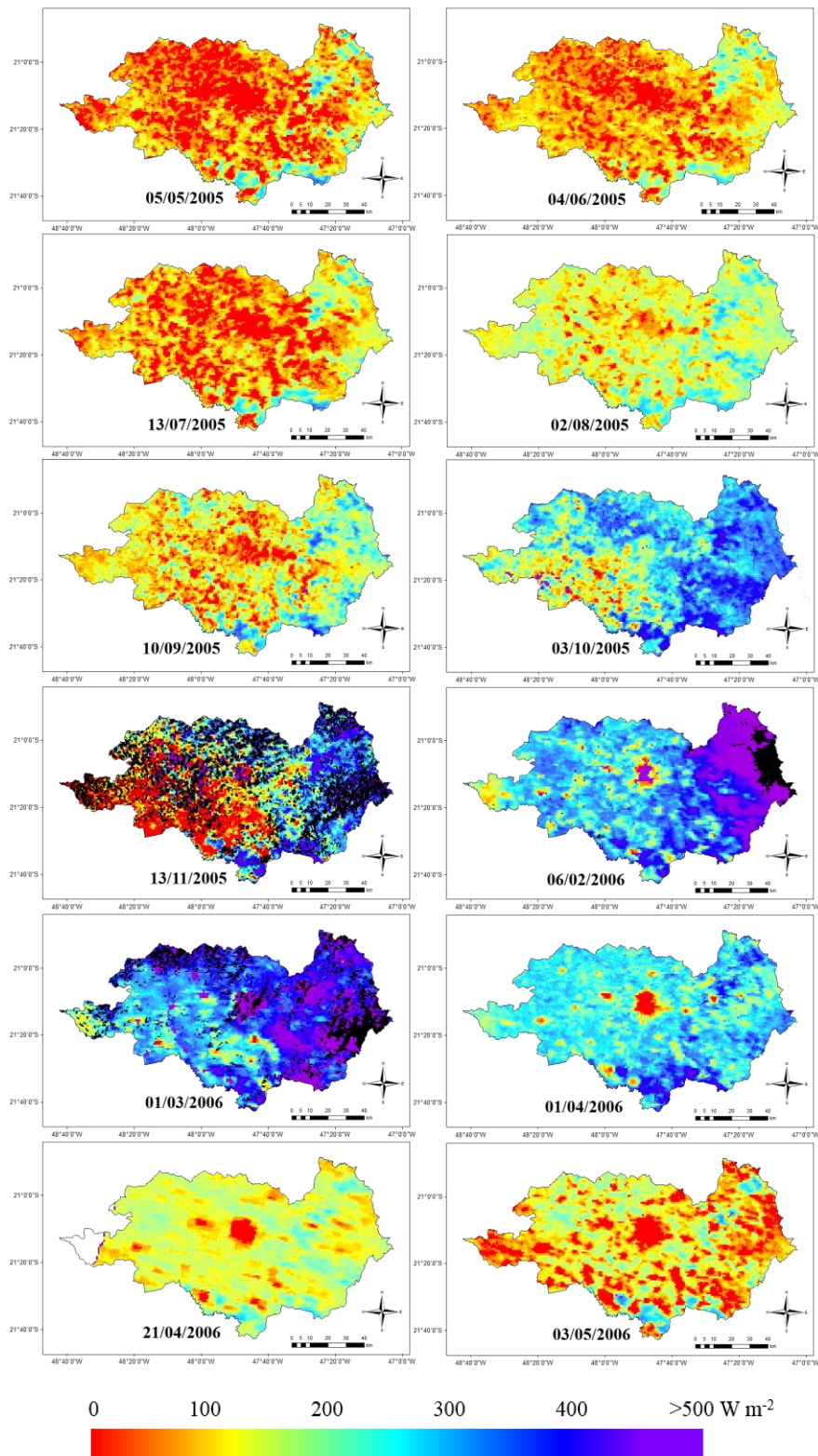
**Figura B. 8** Mapas de fluxo de calor no solo (G) na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2006. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.



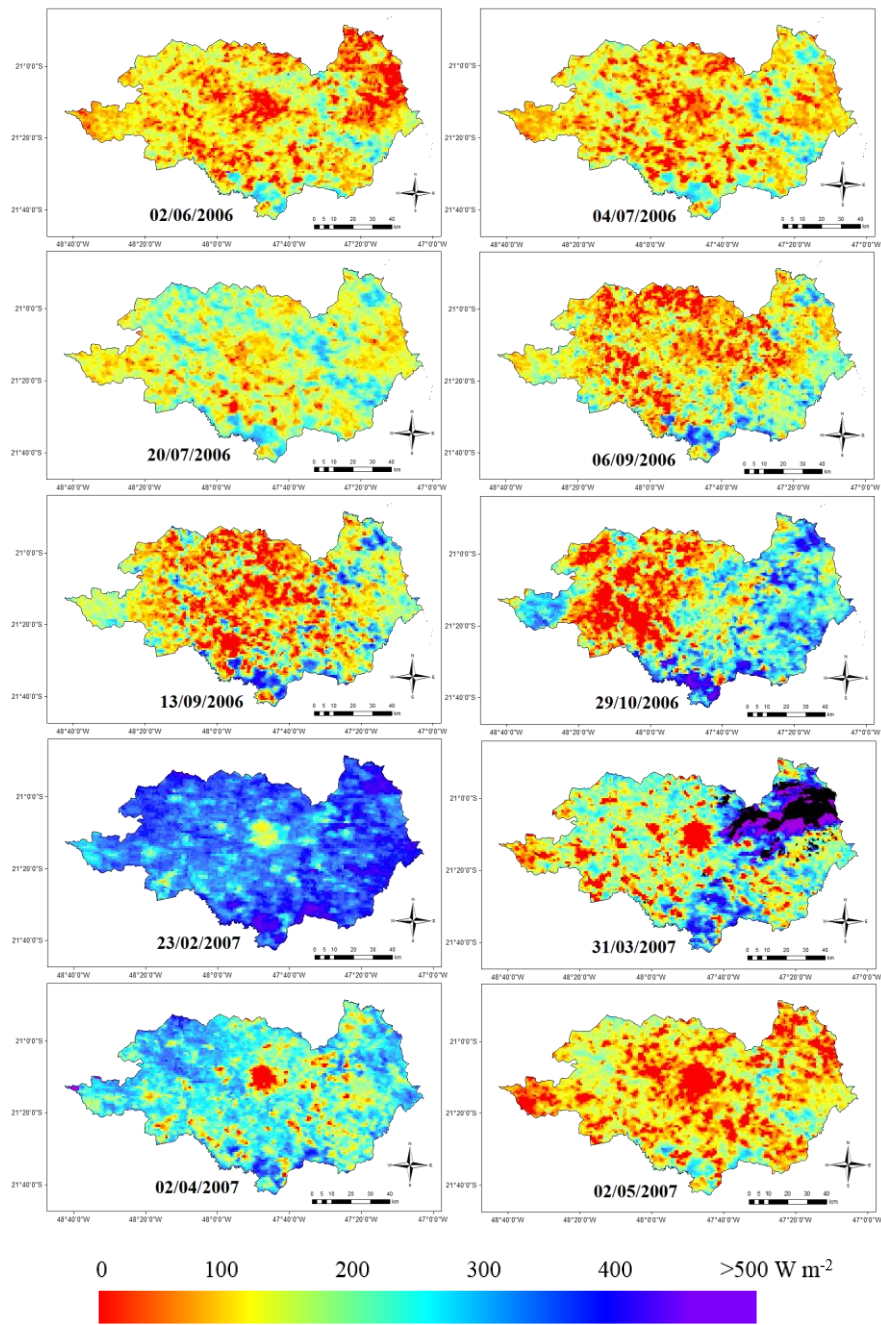
**Figura B. 9** Mapas de fluxo de calor sensível (H) na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2005. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.



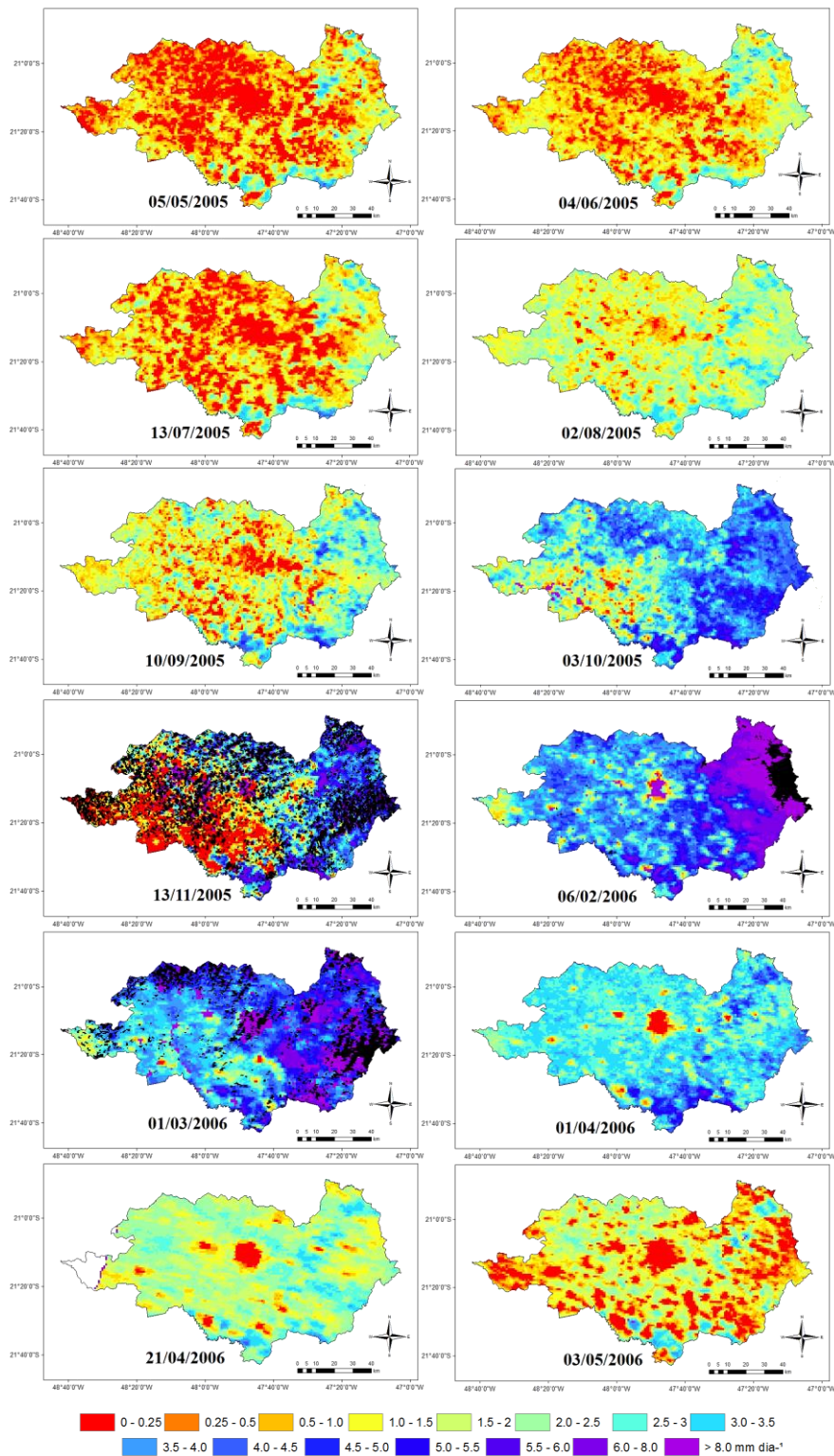
**Figura B. 10** Mapas de fluxo de calor sensível (H) na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2006. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.



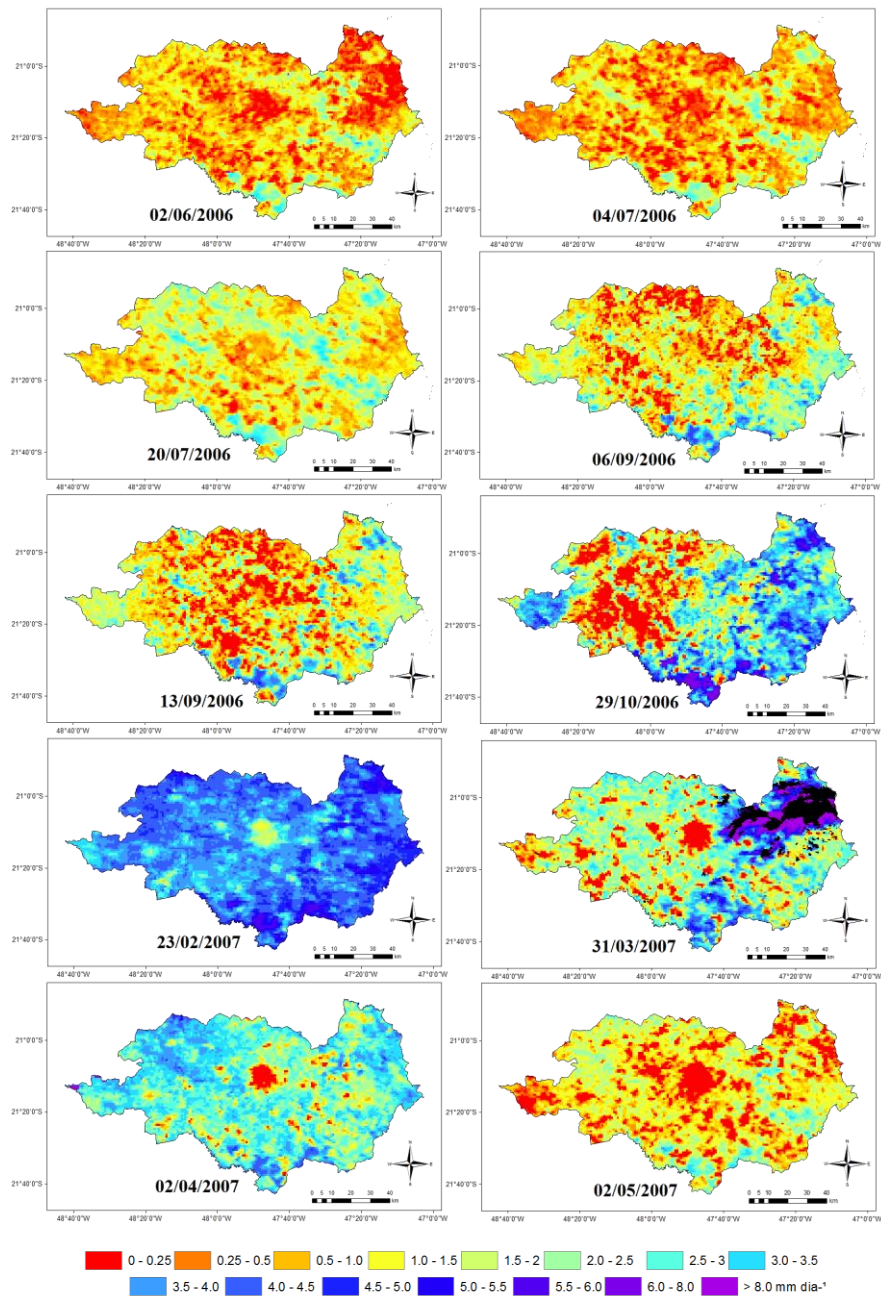
**Figura B. 11** Mapas de fluxo de calor latente (LE) na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2005. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.



**Figura B. 12** Mapas de fluxo de calor latente (LE) na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2006. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.

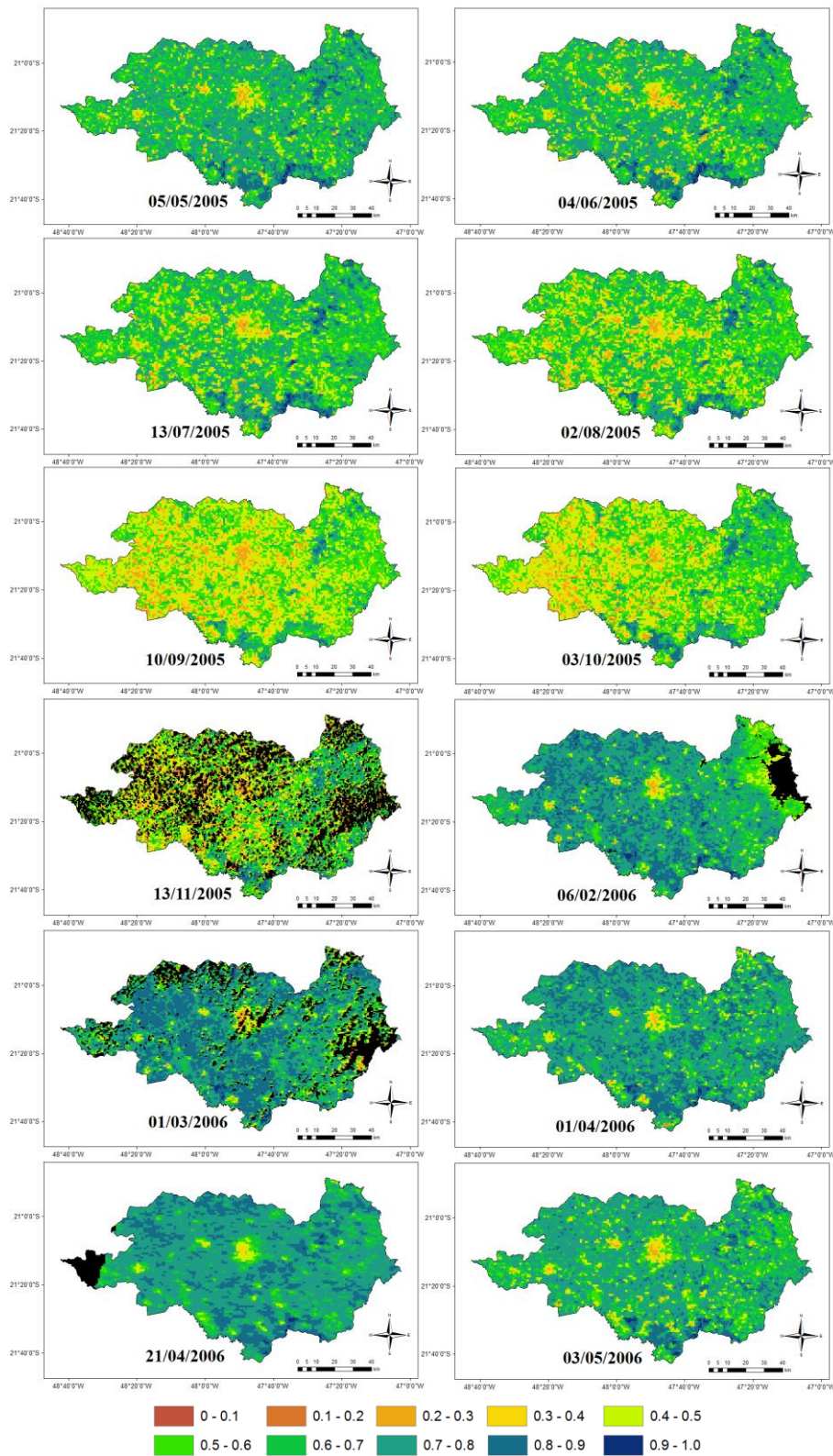


**Figura B. 13** Mapas de evapotranspiração real diária (mm dia<sup>-1</sup>) na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2005. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.

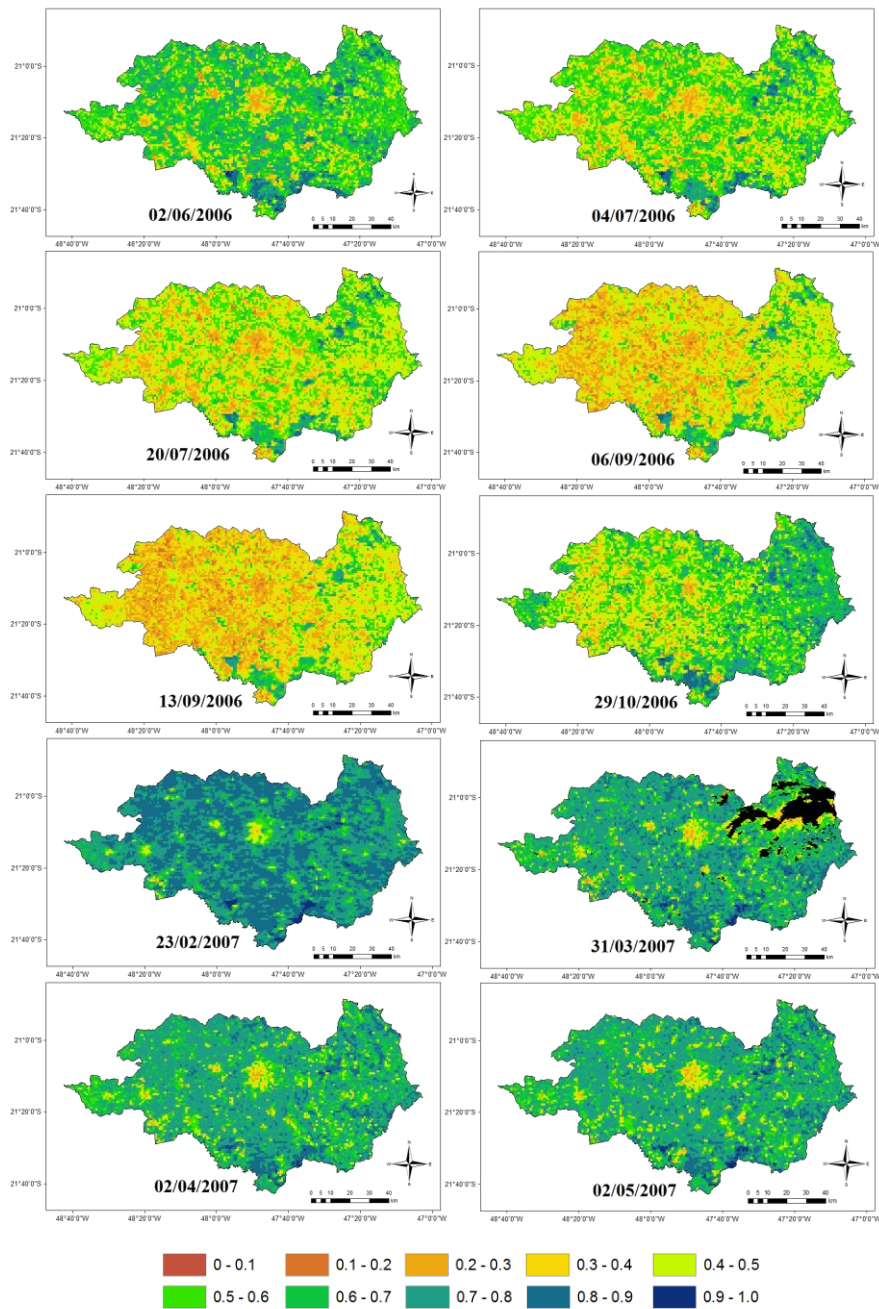


**Figura B. 14** Mapas de evapotranspiração real diária (mm dia<sup>-1</sup>) na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2006. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.



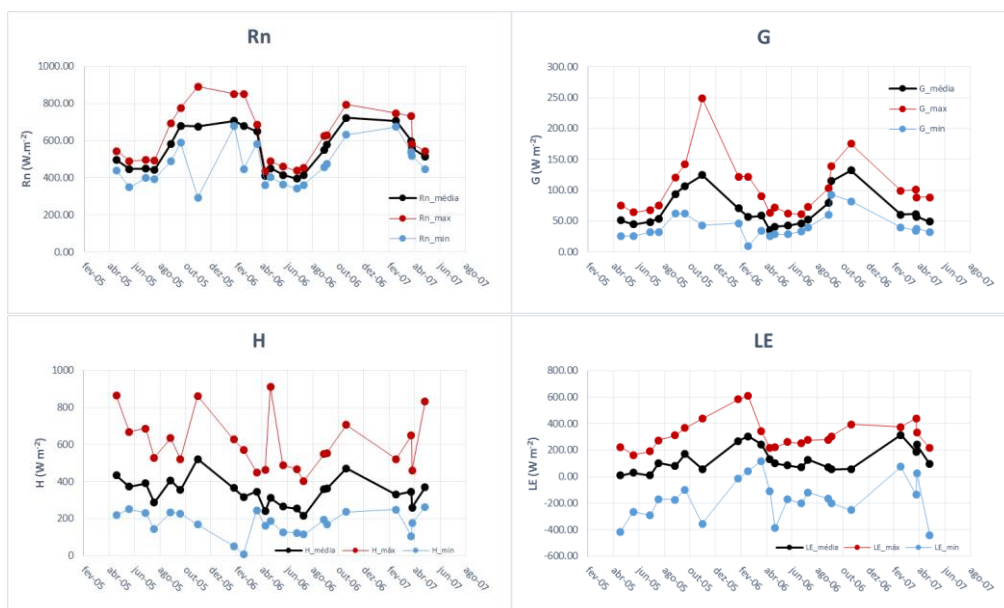


**Figura B. 15** Mapas de NDVI na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2005. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.

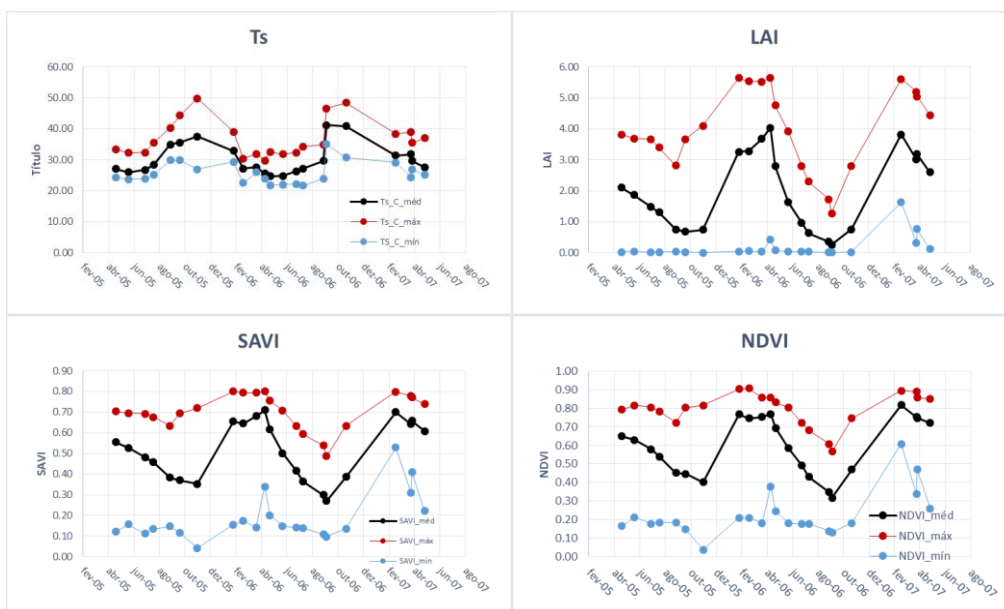


**Figura B. 16** Mapas de NDVI na Região Administrativa de Ribeirão Preto – Safra 2006. Áreas em preto indicam cobertura de nuvens.

## APÊNDICE C – GRÁFICOS



**Figura C. 1** Variação do saldo de radiação ( $R_n$ ), fluxo de calor no Solo (G), fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor latente (LE) ao longo das safras 2005 e 2006 nos *pixels* puros (1 km x 1 km) em área de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto – SP.



**Figura C. 2** Variação da temperatura da superfície (Ts), índice de área foliar (LAI), índice de vegetação ajustado para o solo (SAVI) e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) nos *pixels* puros (1 km x 1 km) em área de cana-de-açúcar na RA de Ribeirão Preto – SP.