

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE
SISTEMAS AMBIENTAIS

Natalia Silva de Souza

**DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO BALANÇO DE ENERGIA E
DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO UTILIZANDO O MODELO METRIC**

Belo Horizonte

2020

Natalia Silva de Souza

DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO BALANÇO DE ENERGIA E DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO UTILIZANDO O MODELO METRIC

Versão final

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientadora: Prof^a. Dra. Adriana Monteiro da Costa

Belo Horizonte

2020

S729d
2020

Souza, Natalia Silva de.

Distribuição espaço-temporal do balanço de energia e da evapotranspiração utilizando o modelo METRIC [manuscrito] / Natalia Silva de Souza. – 2020.

98 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientadora: Adriana Monteiro da Costa.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2020.

Área de concentração: Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Inclui apêndices.

Inclui bibliografia.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Sensoriamento remoto – Teses. 3. Evapotranspiração – Teses. 4. Soja – Teses. I. Costa, Adriana Monteiro da. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 911.2:519.6



FOLHA DE APROVAÇÃO

**DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO BALANÇO DE ENERGIA E
DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO ENTRE-
RIBEIROS UTILIZANDO O MODELO METRIC**

NATALIA SILVA DE SOUZA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE, MODELAGEM E GESTÃO DE SISTEMAS AMBIENTAIS.

Aprovada em 23 de junho de 2020, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Adriana Monteiro da Costa - Orientadora
UFMG

Prof. João Herbert Moreira Viana
Embrapa

Prof. Ricardo Guimarães Andrade
Embrapa

Prof. Plinio da Costa Temba
UFMG

Belo Horizonte, 23 de junho de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me dar fortalecimento e refúgio para continuar a caminhada em busca dos meus objetivos de vida.

Todo o processo para obtenção do título de Mestre foi marcado por intenso crescimento intelectual e pessoal.

Nesse momento é muito gratificante lembrar o apoio dado por várias pessoas e as palavras de incentivo que escutei.

Em especial, quero expressar minha gratidão à professora Dra. Adriana Monteiro pelos direcionamentos na condução desta pesquisa e por me instigar a ser uma profissional melhor. Sou grata pela oportunidade de trabalhar no Laboratório de Solos e Meio Ambiente do Instituto de Geociências da UFMG, lugar no qual tive convivência com profissionais brilhantes e dedicados, de diferentes áreas do conhecimento.

Aos colegas da turma de Pós-Graduação 2018 sou grata pelos risos e conhecimentos compartilhados. Vocês tornaram esse processo mais leve.

Agradeço ao professor Marcos Antônio Timbó Elmiro pela cordialidade e presteza ao compartilhar seus conhecimentos em Sensoriamento Remoto.

Agradeço ao professor Ricardo Guimarães Andrade por compartilhar seus conhecimentos em modelagem de evapotranspiração e me incentivar a seguir em frente no desenvolvimento desta pesquisa.

À empresa IRRIGER pela concessão de dados para esta pesquisa.

Por fim, agradeço à minha família pela compreensão e pelo aconchego nos momentos difíceis. Ao Roberto, pelos ensinamentos profissionais, respeito, companheirismo e amor. Você acompanha tudo e sabemos o quão desafiador foi chegar até aqui. Agradeço à família do Roberto pelo apoio e por ser minha segunda casa em Belo Horizonte.

Cada um de vocês foi essencial para a concretização desse objetivo. Contem comigo!

RESUMO GERAL

As técnicas de sensoriamento remoto têm se apresentado como uma ferramenta muito útil para realizar estimativas de fenômenos físicos em diferentes escalas temporais e espaciais. O conhecimento da evapotranspiração auxilia no planejamento e gerenciamento de sistemas de irrigação, no conhecimento das necessidades hídricas da cultura durante o ciclo de desenvolvimento e, além disso, pode ser um aliado para a gestão de recursos hídricos em bacias que possuem conflitos pelo uso da água. Tendo em vista que, na bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, há pressão sobre os recursos hídricos devido à grande concentração de sistemas de irrigação, o modelo METRIC se apresenta como alternativa para quantificar as perdas de água por evapotranspiração. Neste sentido, este trabalho se propõe a realizar a distribuição espaço-temporal do balanço de energia e da evapotranspiração diária na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros utilizando o modelo METRIC. A metodologia foi desenvolvida nas seguintes etapas: i) Aquisição de imagens do Landsat 8, aspecto, declividade e altitude no Topodata, bem como obtenção de latitude a partir do MDE; ii) Obtenção de dados meteorológicos; iii) Obtenção de variáveis para o cômputo do saldo de radiação e demais componentes do balanço de energia; iv) Implementação do METRIC em Model Builder no ArcGIS; v) Cômputo de componentes do balanço de energia e evapotranspiração diária; e, vi) Comparação entre os valores de evapotranspiração obtidos pelo METRIC e a evapotranspiração da cultura. Observou-se que o modelo estimou satisfatoriamente os componentes do balanço de energia (R_n , G , H , LE) e a evapotranspiração real diária para a sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros. Ademais, os valores obtidos pelo METRIC, em comparação com dados de campo, tiveram tendência de superestimativa nos meses analisados do ano de 2017.

Palavras-chave: balanço de energia; sensoriamento remoto; evapotranspiração diária; irrigação; gestão de recursos hídricos.

GENERAL ABSTRACT

Remote sensing techniques have been shown to be a useful tool for estimating physical phenomena at different time and space scales. The knowledge of evapotranspiration can be used in the planning and management of irrigation systems and water needed during the crop development cycle. In addition, this knowledge can help to manage water resources in basins that have conflicts. Bearing in mind that, in the Entre-Ribeiros basin, there is pressure on water resources due to the large concentration of irrigation systems, the METRIC model is an alternative to quantify water losses through evapotranspiration. This work objectified to obtain the energy balance components and, consequently, the daily evapotranspiration, with the METRIC model, in the Entre-Ribeiros basin. The methodology was developed in the following steps: i) Acquisition of Landsat 8 images, aspect, slope, and altitude in Topodata, as well as obtaining latitude from the DEM; ii) Obtaining meteorological data; iii) Obtaining variables to calculate the radiation balance and other components of the energy balance; iv) Implementation of the METRIC in Model Builder in ArcGIS; v) Calculation of components of the energy balance and daily evapotranspiration; and, vi) Comparison between the values of evapotranspiration obtained by METRIC and the crop evapotranspiration. It was observed that the model satisfactorily estimated the components of the energy balance (R_n , G , H , LE) and the daily evapotranspiration in the Entre-Ribeiros basin. Furthermore, the values obtained by METRIC, in comparison with field data, tended to overestimate in the analyzed months of the year 2017.

Keywords: energy balance, remote sensing, daily evapotranspiration, irrigation, water resources management.

Sumário

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO GERAL	iv
GENERAL ABSTRACT	v
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS	3
CAPÍTULO 1	6
Estimativa dos componentes do balanço de energia e a evapotranspiração real diária na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros	6
1. INTRODUÇÃO	7
2. MATERIAIS E MÉTODOS	9
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4. CONCLUSÕES	49
AGRADECIMENTOS	49
5. REFERÊNCIAS	49
CAPÍTULO 2	54
Comparação entre a evapotranspiração obtida por meio do METRIC e a evapotranspiração da cultura	54
1. INTRODUÇÃO	55
2. MATERIAIS E MÉTODOS	56
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4. CONCLUSÕES	69
AGRADECIMENTOS	69
5. REFERÊNCIAS	70
CONCLUSÃO GERAL	73
Apêndice	74

INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura utiliza cerca de 70% da água doce do mundo e, nos países em desenvolvimento, o consumo do setor corresponde a 82% (RODRIGUES e DOMINGUES, 2017). No Brasil, a retirada total de água estimada em 2017 foi de 2.083 m³/s, tendo como principais usos: a irrigação (52%), o abastecimento humano (23,8%) e a indústria (9,1%) (ANA, 2018). Diante disso, o planejamento e a gestão de recursos hídricos são indispensáveis na compatibilização dos usos múltiplos, monitorando a quantidade e a qualidade da água, viabilizando os diferentes setores produtivos e melhorando os níveis de eficiência global de uso (PAZ; TEODORO e MENDONÇA, 2000).

As bacias hidrográficas correspondem a uma das principais unidades de gerenciamento territorial e conservação dos recursos naturais (SILVA, 2010). É no âmbito dessas unidades que a preocupação com o aproveitamento racional das fontes de recursos hídricos tem se materializado através de ações governamentais voltadas para o setor da agricultura, com a adoção dos planos diretores (BOSQUILIA, 2016).

A partir de 1970, a bacia hidrográfica do rio Paracatu, localizado no estado de Minas Gerais, apresentou expressivo crescimento da irrigação após incentivos oriundos de programas governamentais (RODRIGUEZ et al., 2007). Desde então, houve aumento do consumo de água pela irrigação resultando em uma série de conflitos regionais e substituição da vegetação nativa por cultivo (SOUZA, 2008).

Na bacia do Paracatu, a maior proporção de consumo de água pela irrigação ocorre nas regiões oeste e noroeste, principalmente no ribeirão Entre-Ribeiros e afluentes (ribeirão Barra da Égua e no ribeirão São Pedro), bem como no rio Preto e no ribeirão Santa Isabel. No ribeirão Entre-Ribeiros, a irrigação é responsável por mais de 92% do total consumido (PRUSKI et al., 2007).

A compreensão da distribuição espacial e temporal da depleção evaporativa é essencial para a gestão de bacias hidrográficas. Desta maneira, informações sobre o uso e cobertura do solo, bem como da evapotranspiração espacialmente distribuída, auxiliam o entendimento de como a água é consumida, e quais as possíveis vantagens ou desvantagens relacionadas à alocação de recursos hídricos para a agricultura e para o meio ambiente (UDA, 2016).

Os procedimentos clássicos para a determinação da evapotranspiração são constituídos de métodos diretos, como os lisímetros e métodos indiretos, cujas equações utilizam dados medidos por estações meteorológicas (SOUZA, 2016). Alguns dos métodos mais precisos são de difícil aplicação, não só pela complexidade dos cálculos, mas, também, por exigirem um

grande número de dados meteorológicos, nem sempre disponíveis. Ademais, necessitam de tempo, mão-de-obra, infraestrutura laboratorial e, conseqüentemente, capital, mas nem sempre é possível contar com todos esses fatores para elaboração de medições (LIMA; SILVA e OLIVEIRA, 2001).

Com o intuito de transpor essas limitações, a partir da década de 1960, emergiram métodos baseados em técnicas com sensoriamento remoto para obtenção do balanço de energia, e, por conseguinte, para a determinação de evapotranspiração. As técnicas fundamentadas em cenas de sensores de satélites, com a crescente melhora de resolução espaço-temporal, se tornaram valiosas tecnologias para quantificar a evapotranspiração em ampla escala, a custo competitivo com tecnologias assemelhadas (BASTIAANSEN et al., 2005; DE LA FUENTE-SÁIZ et al., 2017; STANCALIE e NERTAN, 2012; YIN et al., 2017).

Diversos modelos foram desenvolvidos para obter valores de evapotranspiração com o uso de imagens de satélite em escalas regionais e locais, com destaque para: o Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving - SAFER (TEIXEIRA et al., 2013), Mapping Evapotranspiration at High Spatial Resolution with Internalized Calibration - METRIC (ALLEN; TASUMI e TREZZA, 2007a,b), operational Simplified Surface Energy Balance - SSEBop (SENAY et al., 2007), ALEXI/DisALEXI Atmosphere-Land Exchange Inverse/Disaggregated (NORMAN et al., 2003), Surface Energy Balance System - SEBS (JIA et al., 2003), o Simplified Surface Energy Balance Index - S-SEBI (ROERINK; SU e MENENTI, 2000), Surface Energy Balance Algorithm for Land - SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998a,b), Two-source time-integrated model – TSTIM (ANDERSON et al., 1997); Two-source model – TSM (NORMAN; KUSTAS e HUMES, 1995). O SEBAL e METRIC são os mais empregados para essa finalidade.

Conforme Allen et al. (2011), SEBAL e METRIC possuem avanços em relação a métodos convencionais de estimar a evapotranspiração por não ser necessário conhecer curvas do coeficiente da cultura e índices de vegetação de culturas específicas ou tipos de vegetação. Em contrapartida, o METRIC corresponde a um aperfeiçoamento do modelo SEBAL, apresentando vantagem quanto à etapa de calibração e à modelagem da evapotranspiração em áreas montanhosas. Os mapas de evapotranspiração resultantes dos modelos podem ser utilizados para o planejamento de recursos hídricos, gerenciamento de direitos hídricos, estabelecimento de balanços hidrológicos e irrigação (ALLEN; TASUMI e TREZZA, 2007b; RAMPAZO, 2017).

A integração entre técnicas de sensoriamento e o METRIC permitem a avaliação dos

padrões de distribuição espaço-temporal do balanço de energia à superfície, e, por conseguinte, da determinação de evapotranspiração. O conhecimento dessas variáveis e de suas inter-relações possibilitam melhorias tanto nas modelagens de enfoque hidrológico quanto atmosférico, viabilizando, assim, medidas mais eficazes de tomada de decisões em gestão hídrica (LIMA, 2010).

Diante do exposto, este trabalho teve como principal objetivo avaliar a distribuição espaço-temporal dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros utilizando o METRIC.

REFERÊNCIAS

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

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 395–406, 2007b.

ALLEN, R. G.; IRMAK, A.; TREZZA, R.; HENDRICKX, J. M. H.; BASTIAANSEN, W.; KJAERGAARD, J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**, v. 25, p. 4011–4027, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual**. Brasília: ANA, 2018.

ANDERSON, M. C.; NORMAN, J. M.; DIAK, G. R.; KUSTAS, W. P.; MECIKALSKI, J. R. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 60, p. 195–216, 1997.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 213, p. 198–212, 1998a.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 213, p. 213–229, 1998b.

BASTIAANSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRAM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, p. 85–93, 2005.

BOSQUILIA, R. W. D. **Modelagem espacial da evapotranspiração utilizando Modelo de Duas Fontes em ambiente SIG para florestas e cana-de-açúcar**. 2016. 173 f. Tese (Doutorado em Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

DE LA FUENTE-SÁIZ, D.; ORTEGA-FARÍAS, S.; FONSECA, D.; ORTEGA-SALAZAR, S., KILIC, A.; ALLEN, R. Calibration of METRIC model to estimate energy balance over a drip-irrigated apple orchard. **Remote Sensing**, v. 9, p. 670–688, 2017.

JIA, L.; SU, Z.; VAN DEN HURK, B. J. M. M.; MENENTI, M.; MOENE, A. R.; DE BRUIM, H.A.R.; BASELGA YRISARRY, J. J.; IBANEZ, M.; CUESTA, A. Estimation of sensible heat flux using the Surface Energy Balance System (SEBS) and ATSR measurements. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 28, n. 1/3, p. 75–88, 2003.

LIMA, E. P. **Estimativa da Evapotranspiração e do Balanço Hídrico a partir de imagens de Satélite de Duas Sub-Bacias do Paracatu**. 2010. 185 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. Comparação da evapotranspiração real simulada e observada em uma bacia hidrográfica em condições naturais de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 33–41, 2001.

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 Forest Meteorology**, v. 77, p. 263–293, 1995.

NORMAN, J. M.; ANDERSON, M. C.; KUSTAS, W. P.; FRENCH, A. N.; MECIKALSKI, J.; TORN, R.; DIAK, G. R.; SCHMUGGE, T. J.; TANNER, B. C. W. Remote sensing of surface energy fluxes at 101-m pixel resolutions. **Water Resources Research**, 2003.

PAZ, V. P. S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Water resources, irrigated agriculture and the environment. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 465–473, 2000.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUEZ, R. D. G.; NOVAES, L. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M.; TEIXEIRA, A. F. Impacto das vazões demandadas pela irrigação e pelos abastecimentos animal e humano, na bacia do Paracatu. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 2, p. 199–210, 2007.

RAMPAZO, N. A. M. **Modelagem da evapotranspiração da cana-de-açúcar por sensoriamento remoto**. 2017. 108 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F. Agricultura Irrigada: Desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável. Brasília: **INOVAGRI**, 2017.

RODRIGUEZ, R. D. G.; PRUSKI, F. F.; NOVAES, L. F.; RAMOS, M. M.; SILVA, D. D.; TEIXEIRA, A.F. Estimativa da demanda de água nas áreas irrigadas da Bacia do Rio Paracatu. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 172–179, 2007.

ROERINK, G. J.; SU, Z.; MENENTI, M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. **Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere**, v. 25, p. 147–157, 2000.

SENAY, G. B.; BUDDE, M.; VERDIN, J. P.; MELESSE, A. M. A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. **Sensors**, v. 7, p. 979–1000, 2007.

SILVA, L. M. Gestão ambiental de recursos hídricos: pressupostos básicos, conceitos, modelos e instrumentos. **Caminhos de Geografia**. v.11, n. 36, p. 207 - 223, 2010.

SOUZA, M. N. **Dinâmica do uso dos recursos hídricos nas bacias do Ribeirão Entre - Ribeiros e do Rio Preto, afluentes do Rio Paracatu**. 2008. 370 f. Tese (Doutorado em Ciência Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

SOUZA, J. M. F. **Aplicação do algoritmo SAFER na obtenção da evapotranspiração atual das culturas em condições de cerrado**. 2016. 95 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

STANCALIE, G.; NERTAN, A. Possibilities of Deriving Crop Evapotranspiration from Satellite Data with the Integration with Other Sources of Information. **Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling**. [S.l: s.n.], p. 437–466, 2012.

TEIXEIRA, A. H. de C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SCHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. Modelagem espaço temporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro. **Documentos Embrapa 99 - Monitoramento por Satélite**. EMBRAPA Semiárido, Campinas, 2013.

UDA, P. K. **Evapotranspiração real da bacia do Rio Iguazu por meio do modelo METRIC**. 2016. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

YIN, J.; WANG, H.; ZHAN, C.; LU, Y. Evapotranspiration estimation using Landsat-8 data with a two-layer framework. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 11, n. 1, p. 016034, 2017.

CAPÍTULO 1

Estimativa dos componentes do balanço de energia e a evapotranspiração real diária na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros

Resumo: A expansão da agricultura irrigada na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, resultou em aumento exacerbado da utilização dos recursos hídricos e em conflitos pelo uso da água. Diante deste cenário, a quantificação das disponibilidades e demandas por recursos hídricos é essencial para o planejamento de atividades agrícolas e para o gerenciamento de uma bacia hidrográfica. Com o intuito de transpor limitações de estimativa dos componentes do balanço de energia e, conseqüentemente, evapotranspiração, por métodos tradicionais, tem sido aplicadas técnicas de sensoriamento remoto. Nesse sentido, objetivou-se estimar os componentes do balanço de energia e a evapotranspiração diária da sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, por meio do modelo METRIC. A metodologia foi desenvolvida nas seguintes etapas: i) Aquisição de imagens do Landsat 8; ii) Aquisição de aspecto, declividade, altitude, bem como obtenção de latitude a partir do MDE; iii) Obtenção de dados meteorológicos iv) Obtenção de variáveis para o cômputo do saldo de radiação e demais componentes do balanço de energia; v) Implementação do METRIC em Model Builder no ArcGIS; vi) Cômputo de componentes do balanço de energia e evapotranspiração diária. Foram satisfatórios os resultados das estimativas dos componentes do balanço de energia (R_n , G, H, LE) e da evapotranspiração real diária para a sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros. A aplicação do METRIC com imagens Landsat 8 possibilitou a estimativa e identificação da variabilidade espaço-temporal do saldo de radiação, fluxos de calor sensível, calor latente, calor no solo e evapotranspiração real diária na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, Landsat 8, METRIC.

1. INTRODUÇÃO

A quantificação das disponibilidades e demandas por recursos hídricos é essencial para o planejamento de atividades agrícolas e para o gerenciamento de uma bacia hidrográfica.

Dentre as diversas atividades antrópicas existentes em uma bacia, a agricultura se destaca por ser uma das mais dependentes da água, tanto em quantidade quanto em qualidade, além de ser vulnerável aos fatores climáticos adversos. Dessa forma, em algumas regiões onde há irregularidades climáticas, como é o caso da Bacia do Rio Paracatu, que ocasiona um quadro de déficit hídrico, faz-se necessária a prática de irrigação, para suprir a falta de umidade do solo, que é de fundamental importância para o desenvolvimento das plantas (MELO e ASSUNÇÃO, 2011).

Desde 1970, houve a expansão da frente agrícola na bacia do rio Paracatu, concentrando 53% de toda área irrigada nas sub-bacias do rio Preto e do ribeirão Entre-Ribeiros. Nesta última, a irrigação é a atividade responsável pelo maior consumo de água na bacia, sendo superior a 92% do total consumido (RODRIGUEZ et al., 2007; PRUSKI et al., 2007). O aumento da demanda hídrica, na sub-bacia do ribeirão Entre-ribeiros, atingiu um nível crítico e, em períodos de estiagem, houve conflitos entre os agricultores pelos recursos hídricos escassos (VASCONCELOS; MARTINS JUNIOR e HADAD, 2012).

Neste sentido, a quantificação das perdas de água, através da evapotranspiração, possibilita um melhor manejo de irrigação, com aplicação racional da lâmina de água. Assim, há diminuição considerável tanto nos custos com irrigação, quanto no aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis, principalmente quando o enfoque é orientado para o manejo ou desenvolvimento de uma bacia hidrográfica (GIONGO, 2011).

Tradicionalmente, a estimativa da evapotranspiração é obtida por meio de métodos de coleta in situ, de forma pontual e muitas vezes onerosa, causando limitações de uso quando se deseja conhecer a variabilidade do fenômeno para áreas maiores que aquela amostrada (PROFETA, 2017).

Com o intuito de transpor essas limitações, têm sido aplicadas técnicas de sensoriamento remoto, que utilizam imagens de satélite para a obtenção de componentes do balanço de energia e, conseqüentemente, da evapotranspiração. As imagens de satélite permitem a atualização da cartografia, do banco de dados geográficos, monitoramento de fenômenos em micro e macro escalas e a aquisição de dados espaciais em regiões de difícil acesso, onde é inviável a consecução direta de dados (CORRÊA, 2003; MAIA e PÁDUA, 2008; STISEN et al., 2008).

Dentre os modelos vantajosos em relação aos métodos convencionais, para estimar

evapotranspiração, destaca-se o modelo METRIC. Este possibilita quantificar as perdas reais de água por evapotranspiração em áreas com alta distribuição temporal e espacial e pode ser aplicado tanto em sistemas agrícolas quanto em bacias hidrográficas (UDA, 2016).

O METRIC representa um aprimoramento do SEBAL, com particularidades na obtenção de albedo superficial, no cálculo de fluxo de calor sensível (H), mais especificamente à determinação dos pixels quente e frio, na estimativa da evapotranspiração diária e no cômputo do aspecto e da inclinação da superfície.

Assim, se no modelo SEBAL o fluxo de calor latente (λET) no pixel quente é considerado igual a zero, no METRIC, calcula-se o balanço hídrico diário do solo para confirmar esta hipótese ou fornecer o valor real de λET no pixel, se houver evaporação residual proveniente de precipitação antecedente ou irrigação. No pixel frio não se considera H exatamente igual a 0 e $\lambda ET = R_n - G$, no entanto, como compensação de efeitos advectivos, utiliza-se $\lambda ET = 1,05 \times ET_o$, sendo ET_o a evapotranspiração de referência, estimada pelo método de Penman-Monteith (ALLEN; TASUMI e TREZZA, 2007).

Outra importante diferença é a forma de extrapolação da evapotranspiração instantânea para valores diários ou sazonais. No SEBAL, a extrapolação é baseada na fração evaporativa FE estimada por $\lambda ET / (R_n - G)$. No METRIC, a extrapolação ocorre na fração de evapotranspiração de referência, $ET_o F$, sendo dada pela razão entre a evapotranspiração instantânea e a evapotranspiração de referência, estimada com dados de estação meteorológica para a data de aquisição da imagem. Segundo Li et al. (2009), este procedimento pode melhor quantificar os impactos de advecção e mudanças nas condições de vento e umidade do ar durante o dia.

Além disso, a utilização de cartas de elevação digital no cômputo do aspecto e inclinação da superfície possibilitou a estimativa das componentes do saldo de radiação de forma mais precisa (ALLEN; TREZZA e TASUMI, 2006).

Nesse sentido, objetivou-se estimar os componentes do balanço de energia e a evapotranspiração diária da sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, usando o modelo METRIC e imagens Landsat 8.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros situa-se na bacia hidrográfica do rio Paracatu, no Noroeste de Minas Gerais entre os Municípios de Paracatu e Unaí. A sub-bacia possui 3.973 Km² e, fisionomicamente tem predominância de Cerrado, um bioma de grande biodiversidade e riqueza (FURLEY, 1999; RODRIGUEZ, 2004; SILVA; GUIMARÃES e CECIM, 2016). O clima da região é o megatérmico chuvoso do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen. É o clima tropical chuvoso típico, com precipitação concentrada no período de outubro a abril, com destaque para o trimestre novembro, dezembro e janeiro como o mais chuvoso (IGAM, 2006; VASCONCELOS; MARTINS JUNIOR e HADAD, 2012).

A sub-bacia pode ser compartimentada nas unidades geomorfológicas: Planaltos do São Francisco, Depressão São Franciscana e Cristas de Unaí. As classes de solo identificadas são: Latossolos, Cambissolos, Neossolos Quartzarênicos, Solos Hidromórficos e Neossolos Flúvicos (VASCONCELOS; MARTINS JUNIOR e HADAD, 2012). Quanto à geologia local, estratigraficamente, a área da bacia do Ribeirão Entre-Ribeiros apresenta o arcabouço geológico composto pelas rochas dos Grupos Vazante, Paracatu e Paraopeba (GOMES, 2007). Na Figura 1 é apresentada a localização da sub-bacia ribeirão Entre-Ribeiros, em Minas Gerais.

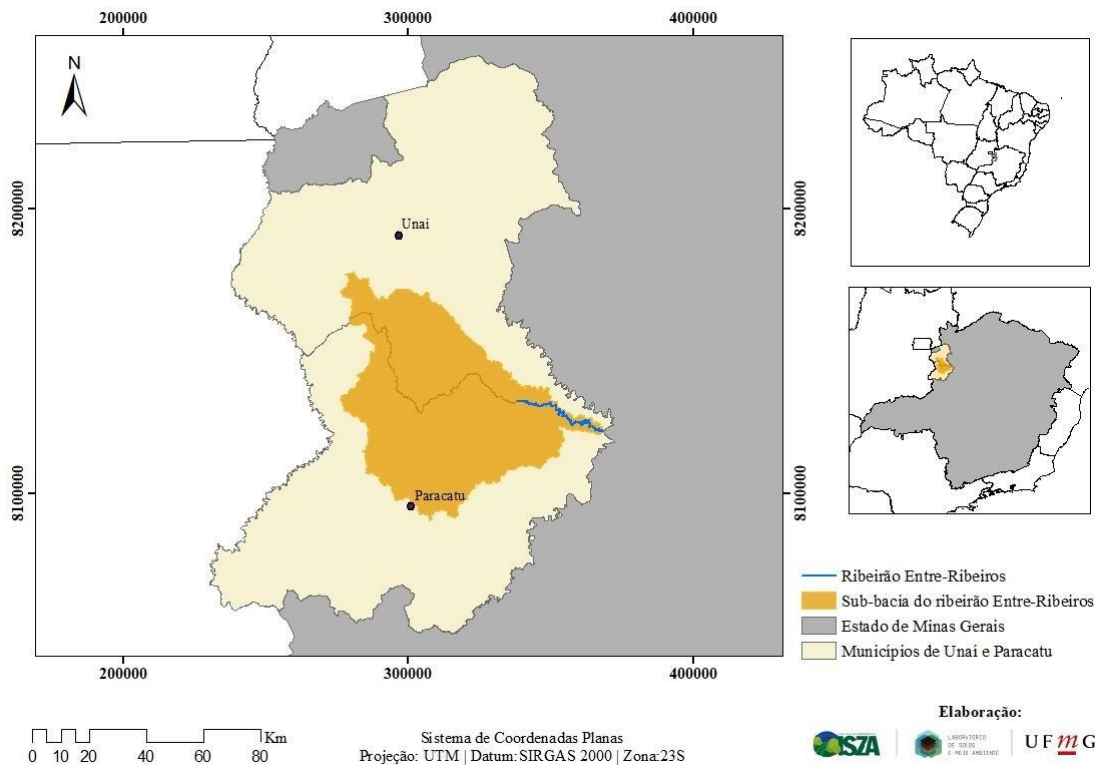


Figura 1: Localização da sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros.

A base de dados utilizada consistiu em: a) Modelo Digital de Elevação (MDE) e atributos derivados nas formas numéricas, com resolução espacial de 30 m (INPE, 2019); b) Imagens Multiespectrais do Landsat 8, Coleção 1 - nível 2 de processamento sob demanda, com 30 m de resolução espacial (USGS, 2019); c) Dados meteorológicos horários e diários de velocidade do vento, temperaturas do ar mínima, média e máxima, radiação solar, pressão atmosférica e umidade relativa da estação meteorológica automática do município de Unaí – MG (INMET, 2017).

Os processamentos dos dados geoespaciais foram realizados no software ArcGIS® (preparação de dados, implementação do modelo METRIC e confecção de layouts). Os dados foram padronizados com Projeção Universal Transversa de Mercator – Fuso 23S e datum SIRGAS 2000.

A metodologia foi desenvolvida nas seguintes etapas: i) Obtenção de dados meteorológicos; ii) Aquisição de imagens do Landsat 8; iii) Aquisição de aspecto, declividade, altitude, bem como obtenção de latitude a partir do MDE; iv) Cômputo de variáveis do saldo de radiação de onda incidente, bem como da evapotranspiração de referência horária e diária; v) Implementação do METRIC em *Model Builder* no ArcGIS; vi) Cômputo de componentes do balanço de energia e evapotranspiração diária. A Figura 2 apresenta o fluxograma metodológico deste trabalho.

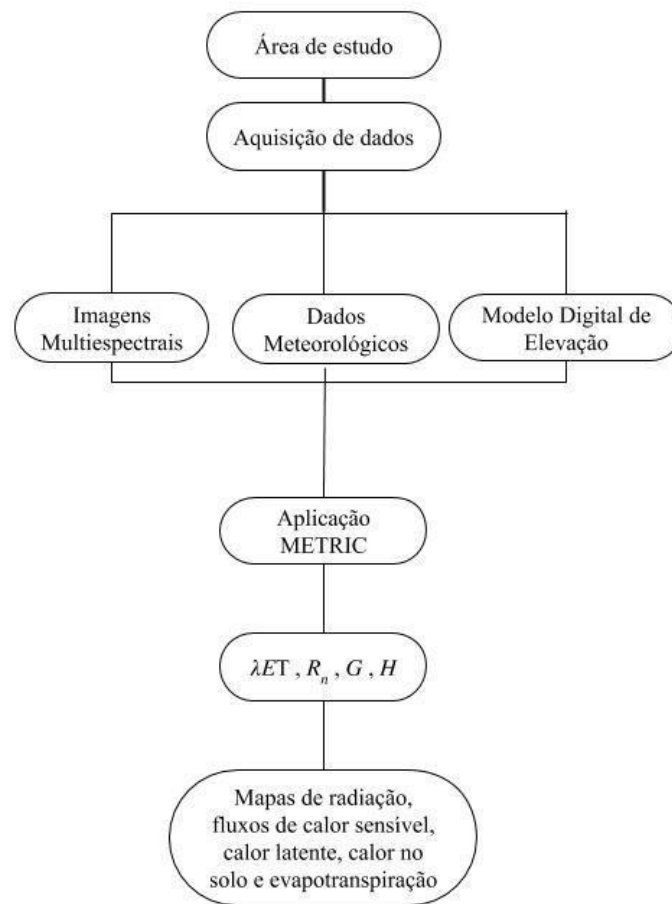


Figura 2: Fluxograma das etapas de processamento para estimativa dos fluxos de energia e da evapotranspiração.

A primeira etapa consistiu na obtenção das variáveis meteorológicas: temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, radiação solar e velocidade do vento. Foi verificado a inexistência de falhas dos registros meteorológicos e os dados foram tabulados em planilhas. Os dados meteorológicos foram obtidos da estação de Unaí-MG, localizada entre as coordenadas 8168855.01 m de latitude Sul e 299181.41 m de longitude Oeste e a 631 m de altitude. Esta é representativa das condições meteorológicas da bacia e, é automática, facilitando a obtenção dos dados. Além disso, esta estação foi utilizada por Lima (2010) para aplicação do SEBAL nas sub-bacias do ribeirão Entre-Ribeiros e do rio Preto.

Na segunda etapa, foram selecionadas imagens Landsat 8, Coleção 1 - nível 2 de processamento sob demanda, órbita/ponto 220/72 por serem produtos com transformações geométricas e radiométricas, bem como ser possível obter a reflectância de superfície corrigida atmosféricamente utilizando o algoritmo Landsat 8 Surface Reflectance Code – LaSRC (USGS, 2016; VERMOTE et al., 2016), específico para o Landsat 8. O critério adotado para seleção das imagens foi a ausência de nuvens, uma vez que, a presença destas interfere nos valores obtidos

para toda sub-bacia. Foram utilizadas as bandas de 2 a 7 para o cálculo de albedo, bandas 4 e 5 para os índices de vegetação, assim como as bandas 10 e 11 para a temperatura de superfície.

A identificação das imagens de satélite selecionadas, os dias julianos (DJ) e as respectivas datas utilizadas para aplicação do METRIC são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Identificação das imagens, dias julianos (DJ) e respectivas datas de passagem do Landsat 8 utilizados na aplicação do METRIC.

Identificação das imagens Landsat 8	DJ	Data
LC082200722017010601T1-SC20191204164545	6	06/01/2017
LC082200722017031101T1-SC20191204164523	70	11/03/2017
LC082200722017051401T1-SC20191204164535	134	14/05/2017
LC082200722017053001T1-SC20191204164522	150	30/05/2017
LC082200722017071701T1-SC20191204164616	198	17/07/2017
LC082200722017080201T1-SC20191204164549	214	02/08/2017
LC082200722017081801T1-SC20191204164539	230	18/08/2017
LC082200722017090301T1-SC20191204164609	246	03/09/2017
LC082200722017091901T1-SC20191204164649	262	19/09/2017

Na terceira etapa, foram obtidos os dados geomorfométricos de aspecto, declividade, altitude e convertidos em unidades angulares. Além disso, foi obtida a latitude a partir do MDE com reamostragem para 16 bit unsigned. Esses foram os dados de entrada para o cálculo da radiação de onda curta incidente, uma das variáveis que compõem o saldo de radiação.

Na quarta etapa, foram calculados em planilhas, os parâmetros de distância relativa, declinação solar e ângulo horário para obtenção da radiação de onda curta incidente, que compõe o saldo de radiação. Além disso, foram calculadas a evapotranspiração de referência horária e diária para cômputo da evapotranspiração real diária, pelo METRIC, no ano de 2017. A obtenção desses parâmetros foi realizada conforme orientações do documento Crop Evapotranspiration número 56 da FAO (ALLEN et al., 1998) e as equações são apresentadas no Apêndice.

A quinta etapa correspondeu ao cômputo do saldo de radiação, fluxo de calor no solo, fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente (componentes do balanço de energia), bem como

a evapotranspiração diária, por meio da implementação do modelo METRIC no software ArcGIS. As rotinas foram executadas manualmente, após construção das etapas do modelo na ferramenta *Model Builder*. Na Figura 3 são apresentadas as etapas do modelo METRIC implementadas no ArcGIS (à esquerda) evidenciando a etapa de radiação de onda curta incidente, como exemplo da construção no *Model Builder*.

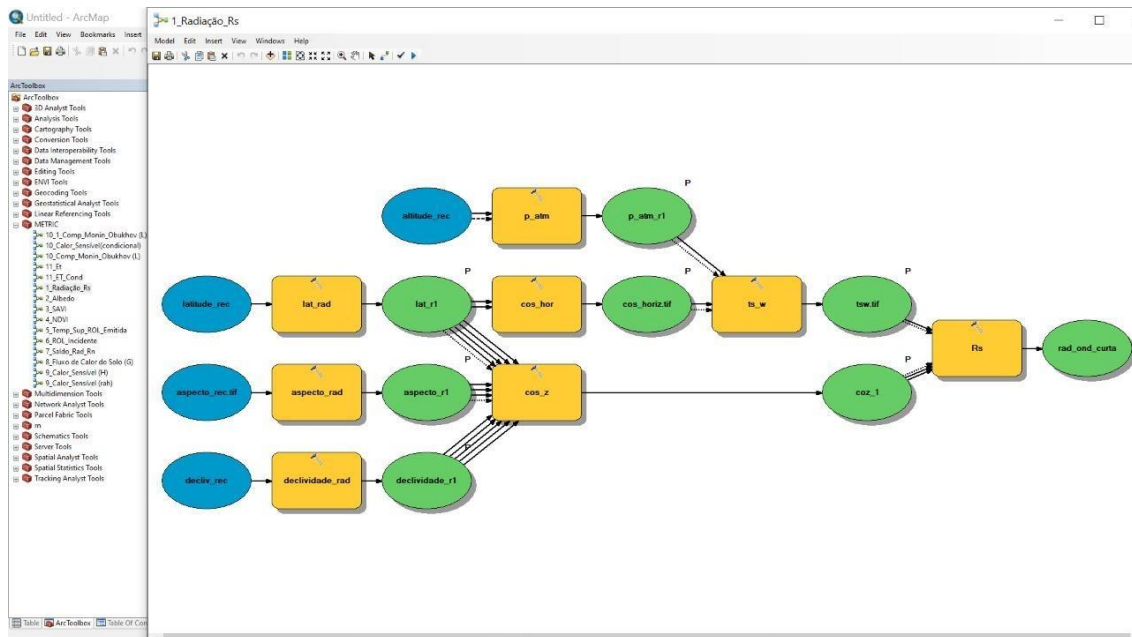


Figura 3: Etapas do modelo METRIC implementadas no ArcGIS (à esquerda) e etapa de radiação de onda curta incidente destacado.

O modelo METRIC foi executado 9 vezes, isto é, para cada data de aquisição das imagens Landsat 8, utilizando os dados da estação meteorológica de Unaí-MG. De acordo com a lei de conservação de energia, os ganhos e perdas de energia em uma superfície estão em equilíbrio. A energia disponível pode ser quantificada pelas equações do balanço de energia e do balanço de radiação (SANTOS, 2009).

Os componentes do balanço de energia incluem todas as formas de transformação da irradiância incidente sobre a superfície, podendo ser refletida, absorvida e emitida, ou particionada nos fluxos de energia, como os fluxos de energia na atmosfera e na superfície. A energia não se perde. A radiação incidente sofre transformações que dependem do material constituinte da superfície terrestre e da presença de água (WARREN et al., 2014).

Os procedimentos metodológicos para aplicação do METRIC foram realizados conforme proposto por Allen, Tasumi e Trezza et al. (2007).

A energia consumida pelo processo de evapotranspiração foi calculada como um residual da equação do balanço de energia à superfície:

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (1)$$

Onde, λET é um valor instantâneo do fluxo de calor latente para o momento de passagem do satélite (W m^{-2}); R_n é o saldo de radiação na superfície (W m^{-2}); G é o fluxo de calor no solo (W m^{-2}); e H é o fluxo de calor sensível (W m^{-2}).

Dentre os índices de vegetação utilizados no METRIC, o NDVI é um parâmetro que perpassa por diferentes etapas, sendo utilizado como critério ($\text{NDVI} > 0$) para obtenção da emissividade da superfície (ϵ_0), influenciando a radiação de onda longa emitida pela superfície. Além de ser aplicado como dado de entrada para o fluxo de calor no solo e na seleção de pixels âncoras.

O saldo de radiação na superfície (R_n) corresponde à energia radiante disponível, considerando todos os fluxos de energia incidentes na superfície (entrada) e emitidos pela superfície (saída). Esse parâmetro é obtido pela Equação 2 e a sequência dos processamentos executados, bem como dos principais parâmetros necessários à sua estimativa são apresentados no fluxograma da Figura 4.

$$R_n = (1 - \alpha_{sup})R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

Onde R_n é o saldo de radiação (W m^{-2}); α_{sup} é o albedo da superfície (adimensional); $R_{S\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente (W m^{-2}); $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa incidente (W m^{-2}); $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida (W m^{-2}); e ϵ_0 é a emissividade da superfície (adimensional).

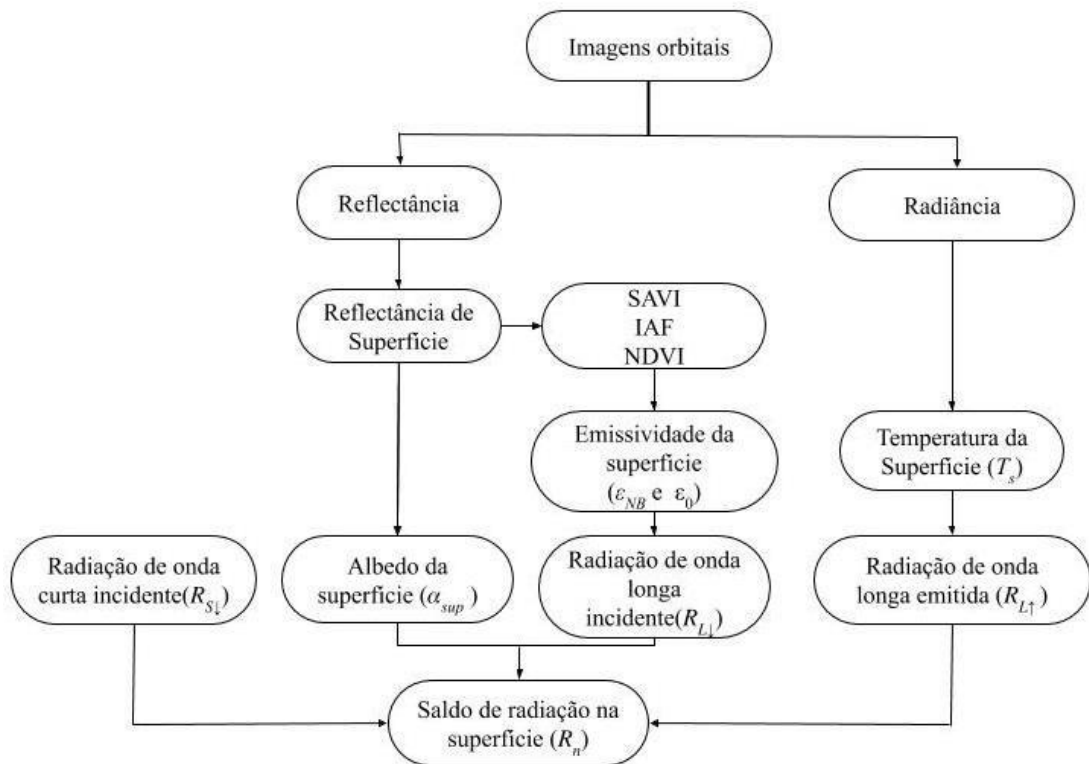


Figura 4: Fluxograma de execução das etapas de processamento para estimativa do saldo de radiação na superfície.

O fluxo de calor no solo representa a taxa de energia utilizada para aquecimento do solo, e pode ser descrito como a taxa de armazenamento de calor no solo e vegetação, devido à condução.

$$\frac{G}{R_n} = (T_s - 273,15)(0,0038 + 0,0074\alpha)(1 - 0,98NDVI^4) \quad (3)$$

Onde, T_s é a temperatura da superfície (K); α_{sup} é o albedo da superfície (adimensional) e $NDVI$ é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.

O fluxo de calor sensível (H) representa a perda de calor para o ar, através de condução e convecção sendo estimado para o transporte de calor. O cômputo desse parâmetro é o cerne do modelo, sendo estimado com base na velocidade do vento e temperatura da superfície, usando uma calibração interna da diferença da temperatura próxima à superfície entre dois níveis da superfície. O cômputo desse parâmetro é o cerne do modelo, sendo estimado com base na velocidade do vento e temperatura da superfície, usando uma calibração interna da diferença da temperatura próxima à superfície entre dois níveis da superfície.

$$H = \frac{(\rho_{ar} \times c_p \times dT)}{r_{ah}} \quad (4)$$

Onde ρ_{ar} é a densidade do ar ($1,15 \text{ kg m}^{-3}$); c_p é o calor específico do ar ($1.004 \text{ J.kg}^{-1} \text{ .K}^{-1}$); dT é a diferença de temperatura ($T_1 - T_2$) entre duas alturas (z_1 e z_2) (K); e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (s m^{-1}).

Para a obtenção de H , faz-se necessário o conhecimento de dois pixels, denominados pixels âncoras, para a determinação da variação de temperatura (dT) e a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (r_{ah}) em todos os pixels da área de estudo.

Os pixels âncoras foram selecionados com o intuito de representarem condições extremas de temperatura na área em estudo. Assim, os pixels “quente” e “frio” foram selecionados ao consultar simultaneamente, a composição colorida RGB, mapa temático do NDVI e da temperatura da superfície, em cada imagem de satélite. O pixel “frio” foi escolhido numa área de pivô central, com cobertura vegetal, onde o valor do NDVI era elevado (entre 0,8 a 0,9) e, conseqüentemente, o T_s possuía um baixo valor. Já o pixel “quente” foi selecionado em área de pivô central, com solo exposto, em que o NDVI baixo (entre 0,1 e 0,2) e a T_s era elevada. Não houve registros de precipitação nos dias selecionados para aplicação do modelo.

A primeira estimativa de valores de r_{ah} , ρ_{ar} , dT e, conseqüentemente, de H servem, tão somente, como valores iniciais, em condições neutras, de um processo iterativo, que nas etapas seguintes é considerada, efetivamente, a condição de estabilidade atmosférica representada em cada pixel. Nesse sentido, devido aos efeitos turbulentos aquecerem a superfície e afetarem as condições atmosféricas e a resistência aerodinâmica, aplica-se a teoria da similaridade de Monin-Obukhov, sendo assim considerado no cômputo do fluxo de calor sensível, principalmente para as condições do pixel “quente”. O comprimento de Monin-Obukhov L (m) é utilizado para definir as condições de estabilidade da atmosfera e é computado em função dos fluxos de calor sensível e transporte de momentum (ψ_m) e de calor (ψ_h).

Após a primeira estimativa, retornou-se ao cálculo da diferença de temperatura e na seqüência, do fluxo de calor sensível com os novos valores da resistência aerodinâmica. Esse processo foi repetido até que se verificou a estabilidade dos valores sucessivos de dT e r_{ah} no pixel “quente”.

A Figura 5 apresenta a seqüência do cômputo de fluxo de calor sensível e para o processo iterativo.

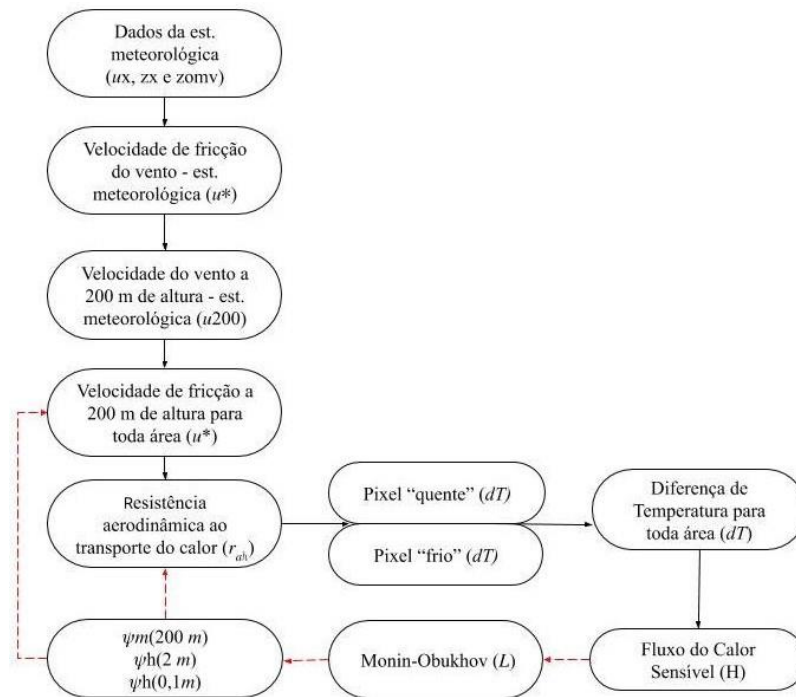


Figura 5: Fluxograma das etapas de processamento para o cálculo do fluxo de calor sensível (H) – as setas pretas indicam a primeira tentativa e as setas laranjas o processo iterativo.

A partir da aplicação da Equação 1 que calcula o fluxo de calor latente (λET) como um resíduo do balanço de energia, a evapotranspiração real horária (ET_h) é estimada utilizando-se a Equação 5:

$$ET_h = 3.600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (5)$$

Em que, 3.600 corresponde à conversão de 1 hora para segundos; λ é o calor latente de vaporização ($J\ kg^{-1}$) – calor absorvido quando um quilograma de água evapora, sendo estimado pela Equação 6:

$$\lambda = (2,501 - 0,00236(T_s - 273,15)) \times 10^6 \quad (6)$$

A evapotranspiração de referência horária ($ET_{0,h}$) foi calculada pela Equação 7, a partir dos dados meteorológicos, conforme orientações de ALLEN et al. (1998).

$$ET_{0,h} = \frac{0,408(Rn - G) + \gamma \left(\frac{37}{T} + 273 \right) u_2 (e^0(T) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,24u_2)} \quad (7)$$

Em que, Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor ($kPa\ ^\circ C^{-1}$); Rn é o saldo de radiação na superfície ($MJm^{-2}\ h^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($MJm^{-2}\ h^{-1}$), γ é a constante

psicométrica ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$); T é a temperatura média horária ($^\circ C$); u_2 é a velocidade do vento a 2 metros de altura ($m s^{-1}$); $e^0(T)$ é pressão de vapor de saturação à temperatura do ar T (kPa); e_a é pressão de vapor (kPa).

A fração da evapotranspiração de referência ET_0F permanece praticamente constante durante o dia e dessa forma permite uma boa aproximação para a estimativa da ET_{24h} (WATERS et al., 2002).

A fração da evapotranspiração de referência ET_0F permanece praticamente constante durante o dia e dessa forma permite uma boa aproximação para a estimativa da ET_{24h} (WATERS et al., 2002).

$$ET_0F = \frac{ET_h}{ET_{0,h}} \quad (8)$$

Em que, ET_0F é a fração da evapotranspiração de referência (adimensional); $ET_{0,h}$, nesse caso, corresponde à evapotranspiração de referência horária; ET_h , a evapotranspiração real horária.

A evapotranspiração diária foi estimada assumindo que a fração de evaporação instantânea, calculada para a hora de aquisição da imagem, é semelhante à ET_0F média em 24 horas. Para a extrapolação da ET_h para evapotranspiração real diária (ET_{24h}) ao longo de toda a imagem, utilizou-se a Equação 9:

$$ET_{24h} = ET_0F \times ET_{024h} \quad (9)$$

Onde, ET_{024h} é a evapotranspiração de referência diária da estação meteorológica para o mesmo dia de aquisição da imagem, calculada pela Equação 10:

$$ET_{0_{24h}} = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \left(\frac{900}{T} + 273 \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (10)$$

Em que, Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$); Rn é o saldo de radiação na superfície ($MJm^{-2} h^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($MJm^{-2} h^{-1}$), γ é a constante psicométrica ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$); T é a temperatura do ar média diária ($^\circ C$); u_2 é a velocidade do vento a 2 metros de altura (ms^{-1}); e_a é pressão de vapor (kPa); e_s é pressão de saturação de vapor (kPa).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados os resultados do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), componentes do balanço de energia e da evapotranspiração diária, em um período de 10 dias, no ano de 2017, para a sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, utilizando o modelo METRIC.

Nas Figuras 6 e 7, de janeiro a maio de 2017, foi constatado que as áreas da bacia do ribeirão Entre-Ribeiros com NDVI na faixa de -0,99 a 0,13, corresponderam a área de mineração e a corpos d'água. Estes dados corroboram com Folhes (2007) e Martinho et al. (2012), que afirmam que o NDVI em áreas de superfícies de água e solo descoberto se aproximam de zero.

Observou-se a predominância dos valores de NDVI nas faixas de 0,64 a 0,98, entre 06 de janeiro a até 30 de maio, sendo que a partir desse período (Figuras 7 e 8), os valores de NDVI estiveram na faixa de 0,14 a 0,36. Esta diminuição de valores, ao longo do ano, pode estar associada à maior incidência de radiação e concentração de chuva. No período chuvoso há maior oferta de água e radiação para a vegetação, o que favorece a atividade fotossintética e o desenvolvimento do dossel. Ramos (2016), em estudo da variação temporal de NDVI no município de Juiz de Fora, encontrou semelhança entre a curva obtida para o NDVI e a curva de precipitação. Para este autor, os maiores valores de NDVI foram estimados nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, visto que, nesses meses há melhores condições de clima para o desenvolvimento da vegetação.

Além disso, nota-se que na região das Cristas de Unai foram registrados valores de NDVI na faixa de 0,78 a 0,98 e, no período seco, apresentaram valores na faixa de 0,37 a 0,63. Esta variação pode ser explicada pela presença de campo cerrado e manchas de mata seca nessa região.

Conforme Gomes (2007), a Mata Seca é uma formação florestal sujeita a um ritmo estacional que se traduz pela queda de folhas durante o período seco. A vegetação desenvolve sobre a rocha fraturada. Dessa maneira, na época das chuvas, devido à grande disponibilidade de água, a vegetação se mantém exuberante e com dossel denso visto que a água se infiltra pelas fraturas da rocha e poros do solo. No entanto, no período de estiagem, com a perda de umidade tanto da atmosfera quanto do substrato, a vegetação perde 100% de suas folhas, apresentando aspecto seco.

Em contrapartida, é possível observar, nas Figuras 7 e 8, padrões de NDVI elevado, no período de estiagem, que podem estar associados a áreas de mata ciliar e outras vegetações

similares, bem como agricultura irrigada.

De acordo com Teramoto et al. (2018) e Brito et al. (2017), os valores de NDVI das matas ciliares se mantem elevados, devido a disponibilidade hídrica e fácil acesso das raízes à água subterrânea, que se encontram muito rasas nestas porções. Além disso, áreas de agricultura irrigada não sofrem com estresse hídrico, pois são irrigadas continuamente, fazendo com que os índices de vegetação sejam maiores nessas áreas.

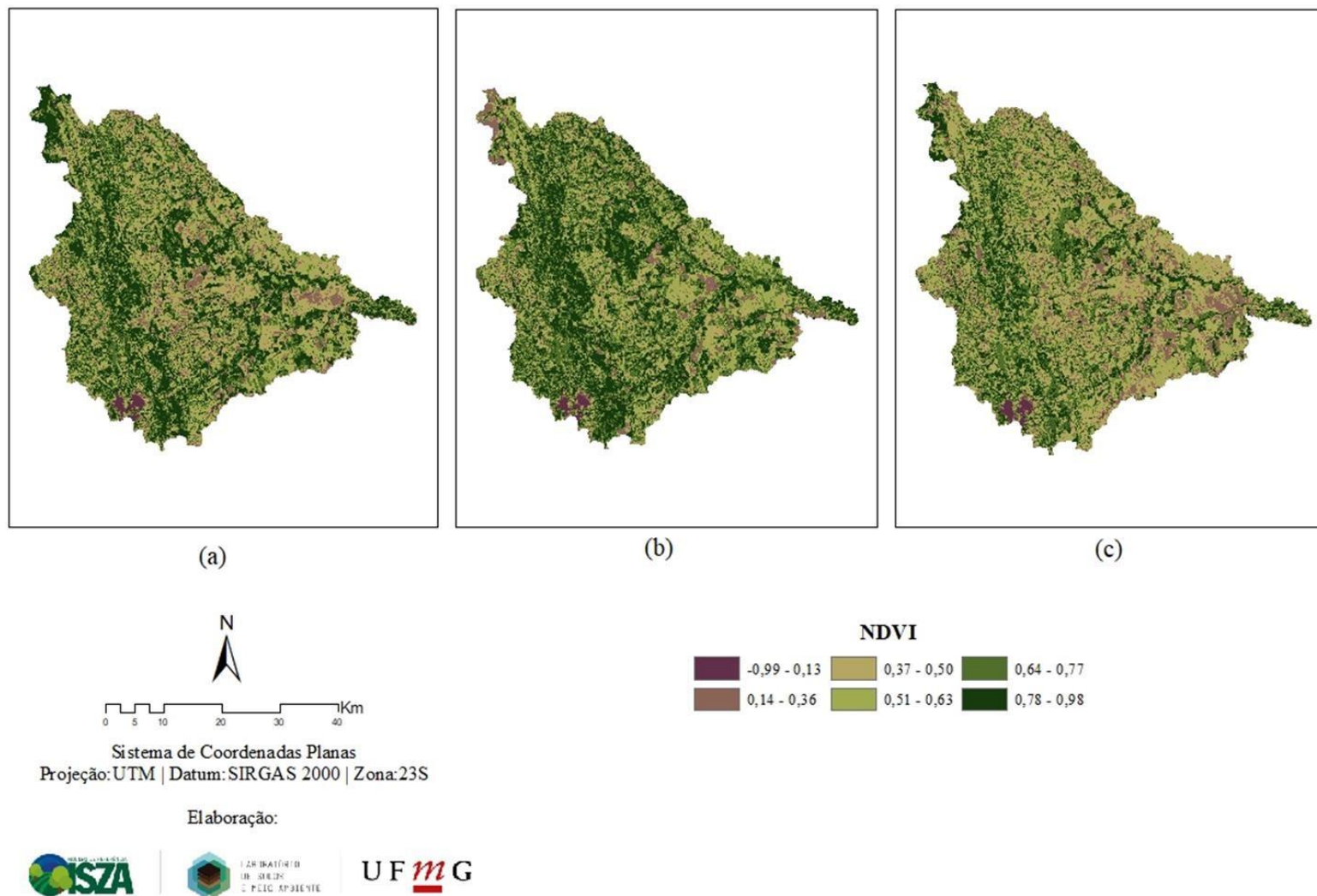


Figura 6: Distribuição espacial do NDVI na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 06 de janeiro (a), 11 de março (b) e 14 de maio (c) do ano de 2017.

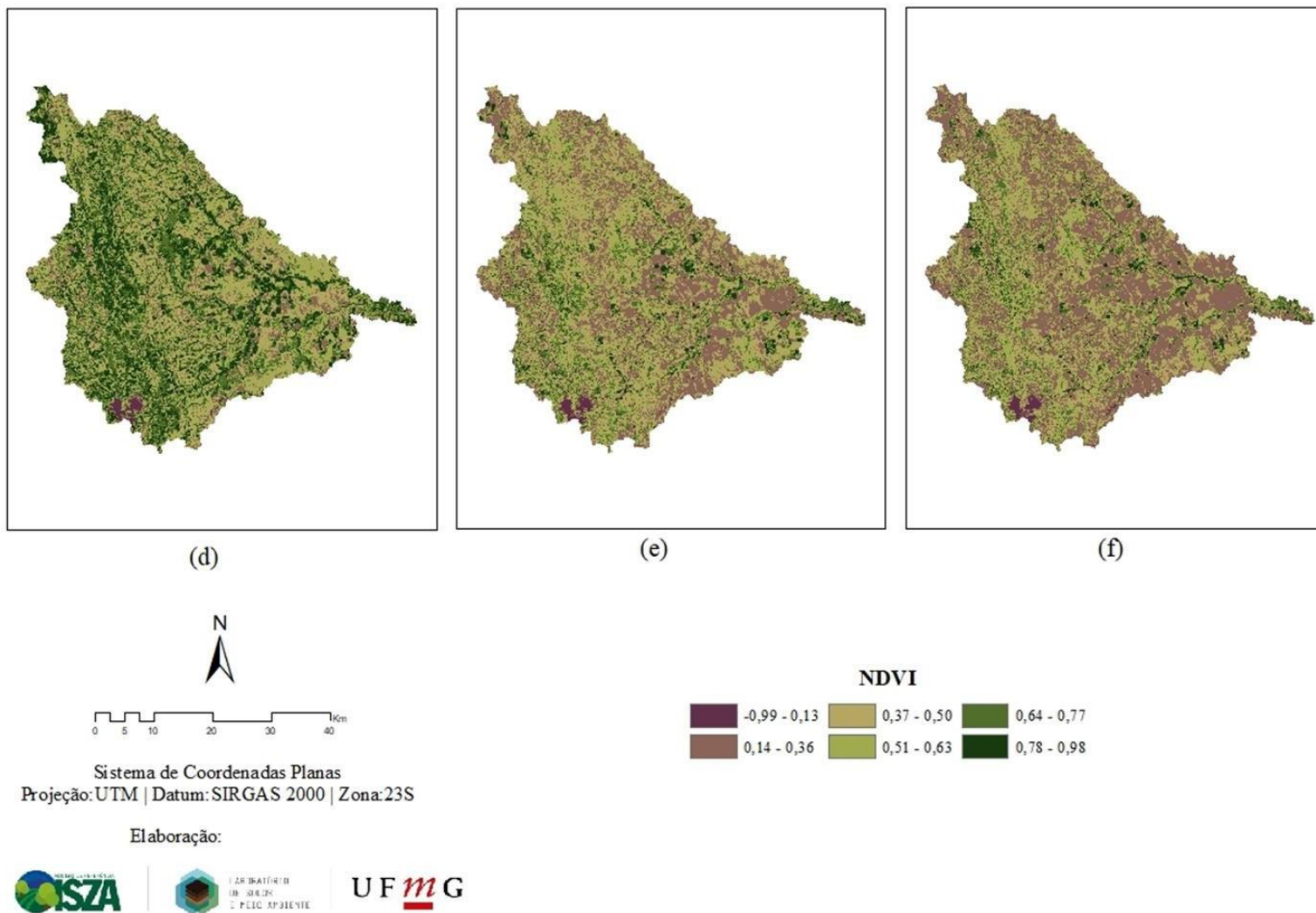


Figura 7: Distribuição espacial do NDVI na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 30 de maio (d), 17 de julho (e) e 02 de agosto (f) do ano de 2017.

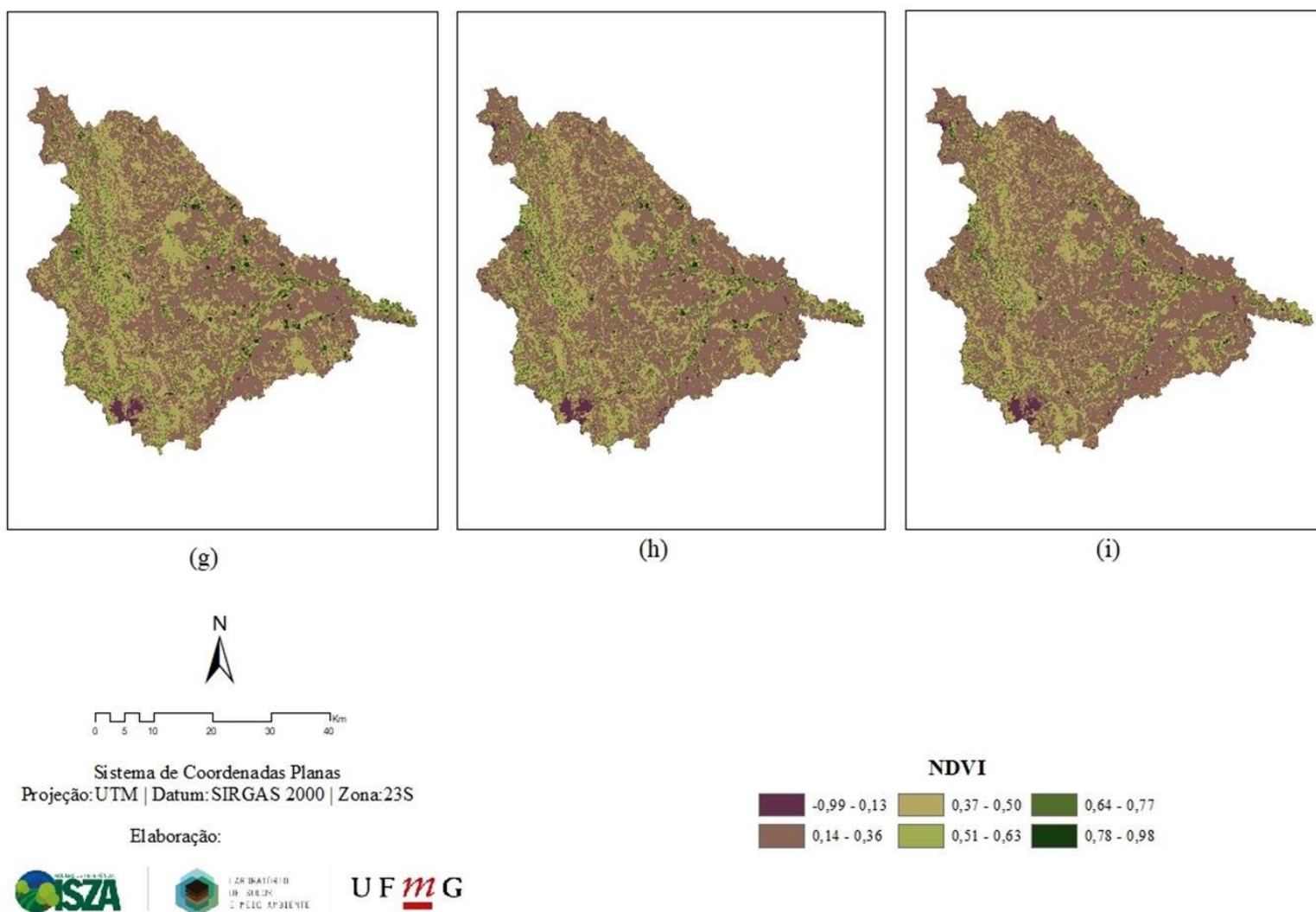


Figura 8: Distribuição espacial do NDVI na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 18 de agosto (g), 03 de setembro (h) e 19 de setembro (i) do ano de 2017.

Na Figura 9 observaram-se maiores valores de radiação para as cenas dos meses de janeiro e março. O valor de R_n médio foi de $567,01 \text{ W m}^{-2}$, com valor de R_n mínimo de $300,32 \text{ W m}^{-2}$ em 19 de setembro e, máximo, na ordem de $967,26 \text{ W m}^{-2}$, no dia 11 de março. Esta maior incidência de radiação solar no mês de março pode estar relacionada ao período chuvoso.

Andrade (2008) aplicou o SEBAL em áreas de cana-de-açúcar, no município de Conquista – MG e obteve maiores valores de R_n nas cenas dos meses de janeiro, fevereiro, abril, agosto e setembro, com destaque para os meses de janeiro e fevereiro, nos quais são considerados os mais quentes e chuvosos para a região.

Os valores encontrados corroboraram com os resultados de R_n médio de $561,44 \text{ W m}^{-2}$ e valor mínimo de $389,71 \text{ W m}^{-2}$ encontrados por Lima (2010). Este autor aplicou o SEBAL no período de julho a outubro de 2007, nas sub-bacias do ribeirão Entre-Ribeiros e Rio Preto, encontrando, o valor máximo de $837,91 \text{ W m}^{-2}$ no dia 29 de outubro de 2007. Tendo em vista o período seco, em 19 de setembro, o valor de R_n máximo registrado foi de $874,94 \text{ W m}^{-2}$.

De acordo com Bezerra et al. (2014), a cobertura vegetal com estresse hídrico tende a absorver menos radiação solar, o que pode ser a razão pela qual, a partir de maio, serem registrados valores mais baixos de radiação quando comparados ao período anterior.

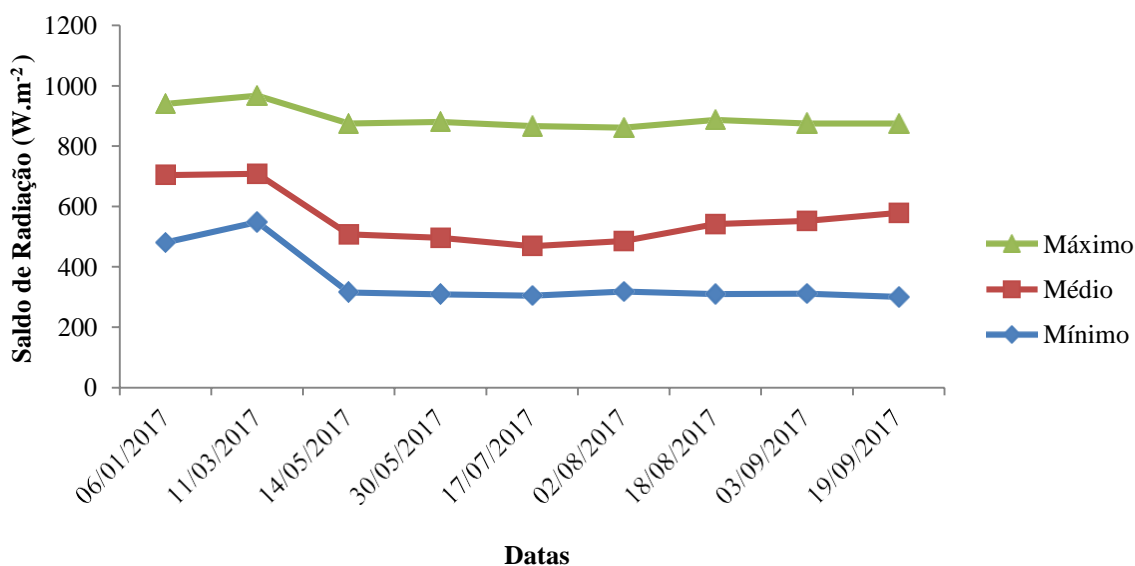


Figura 9: Saldo de radiações mínima, média e máxima estimado na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros no ano de 2017.

Na Figura 10 observou-se, nos meses de janeiro e fevereiro, grande proporção da sub-bacia com maiores valores de R_n em relação às demais áreas. Nesses meses foram registrados valores superiores a $708,20 \text{ W m}^{-2}$. Nas Figuras 10 e 11, período de 14 de maio a 08 de agosto, observou-se os menores valores de R_n para a sub-bacia, na faixa de $406,24$ a $514,39 \text{ W m}^{-2}$. Na

Figura 12, a partir de 18 de agosto, há sucessivo aumento de áreas com R_n entre 631,58 e 708,19 $W m^{-2}$.

As variações observadas para cada uma das cenas podem ser explicadas pelas diferentes superfícies presentes na bacia (cerrado, pastagem, áreas irrigadas com diferentes tipos de culturas, cursos d'água etc.). Neste sentido, os maiores valores registrados de radiação podem estar associados às áreas irrigadas e à época do ano. Ademais, observou-se que nas Cristas de Unai foram estimados os menores valores de radiação em todas as cenas, isto pode ser explicado pela menor incidência da radiação devido a maior inclinação da superfície.

Giongo (2011) em aplicação do METRIC na bacia do rio Corumbataí –SP, constatou que os maiores valores de radiação foram registrados no período de verão, nos meses de fevereiro, setembro e outubro. Os menores registros foram nas imagens de maio a julho. Assim, nota-se que as estações do ano proporcionam grande variação de R_n em uma região. Ainda, conforme o mesmo autor, a cobertura vegetal e a inclinação da superfície resultam em menores valores de R_n .

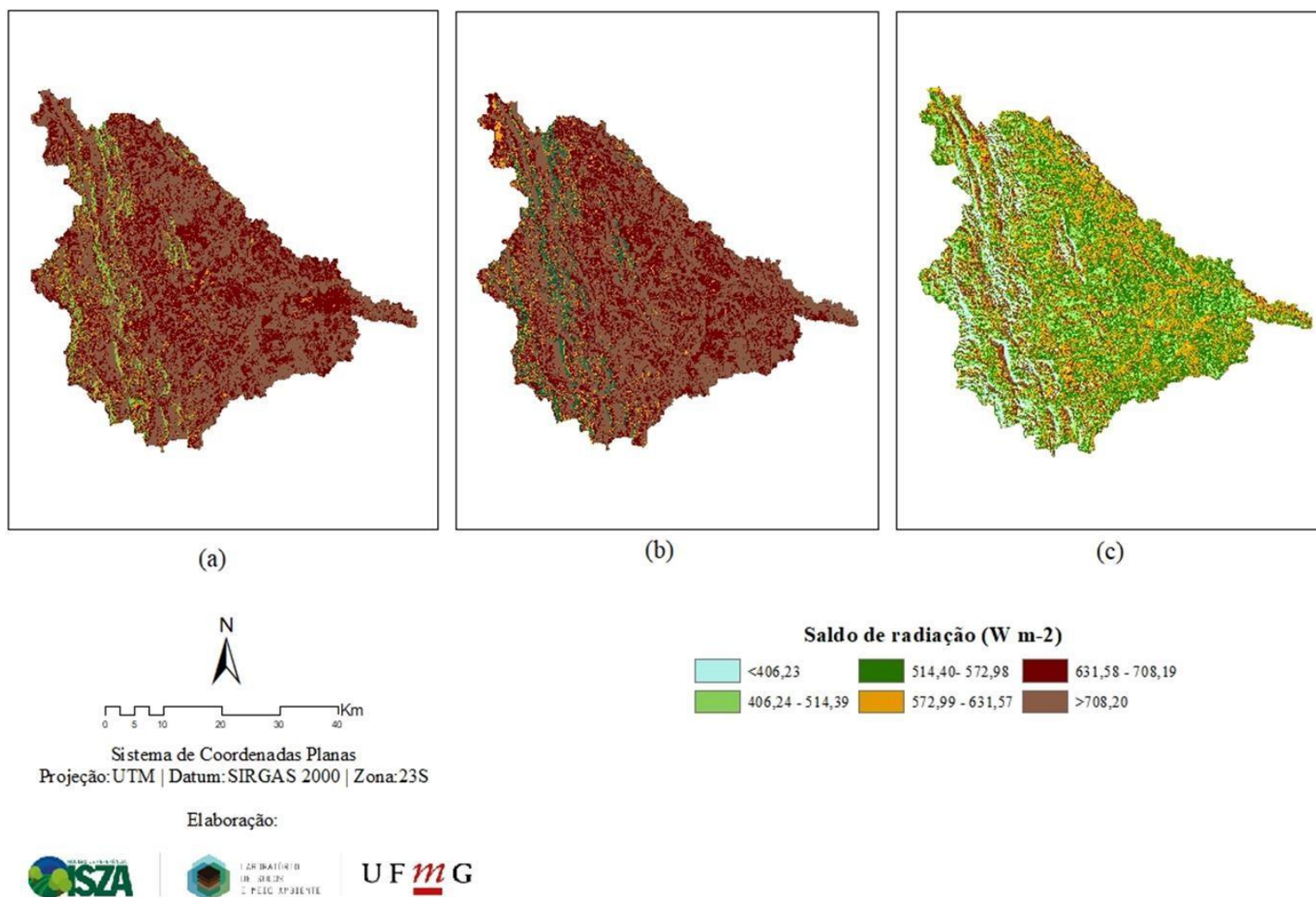


Figura 10: Distribuição espacial do saldo de radiação ($W\ m^{-2}$) na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 06 de janeiro (a), 11 de março (b) e 14 de maio (c) do ano de 2017.

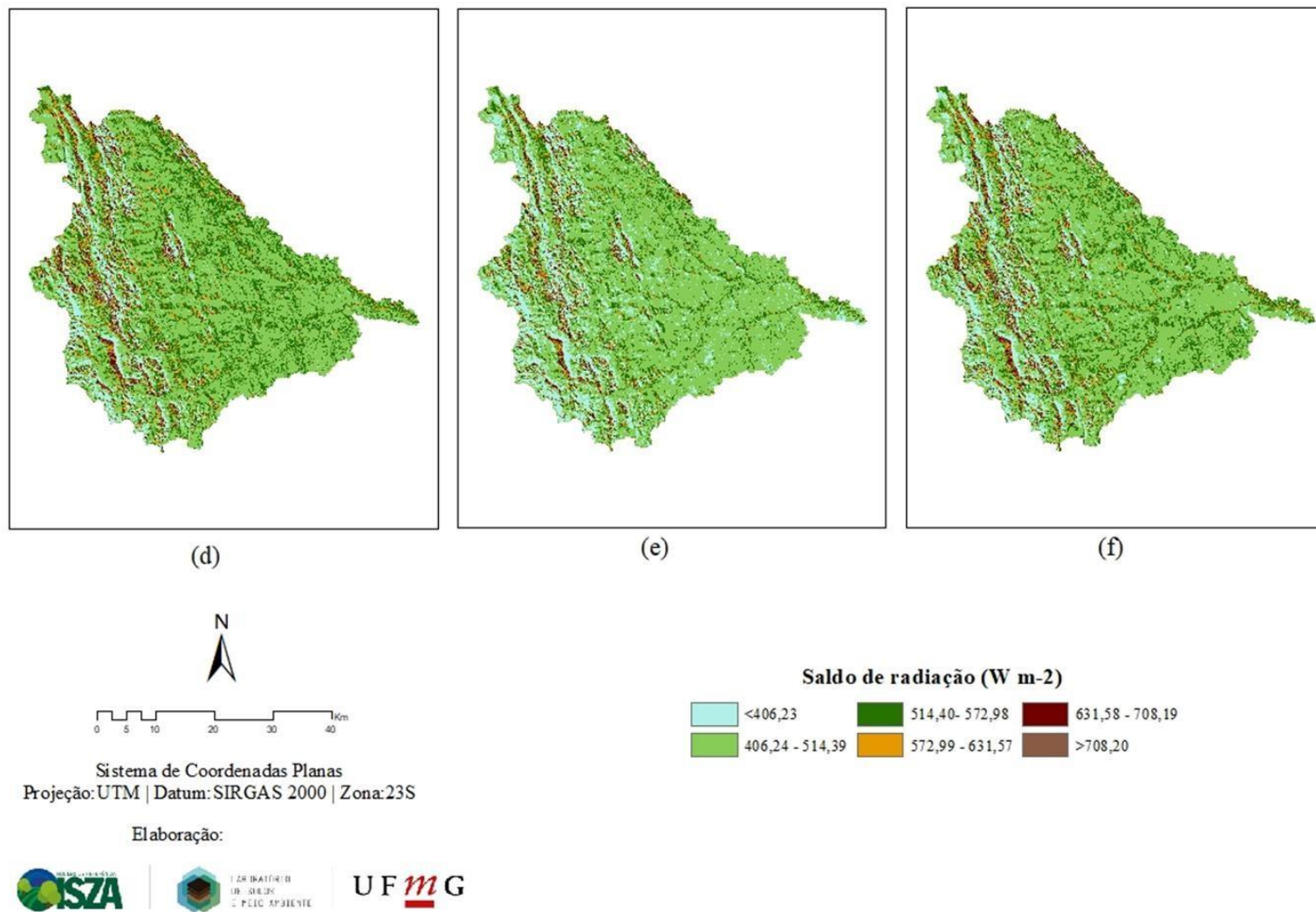


Figura 11: Distribuição espacial do saldo de radiação (W m^{-2}) na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 30 de maio (d), 17 de julho (e) e 02 de agosto (f) do ano de 2017.

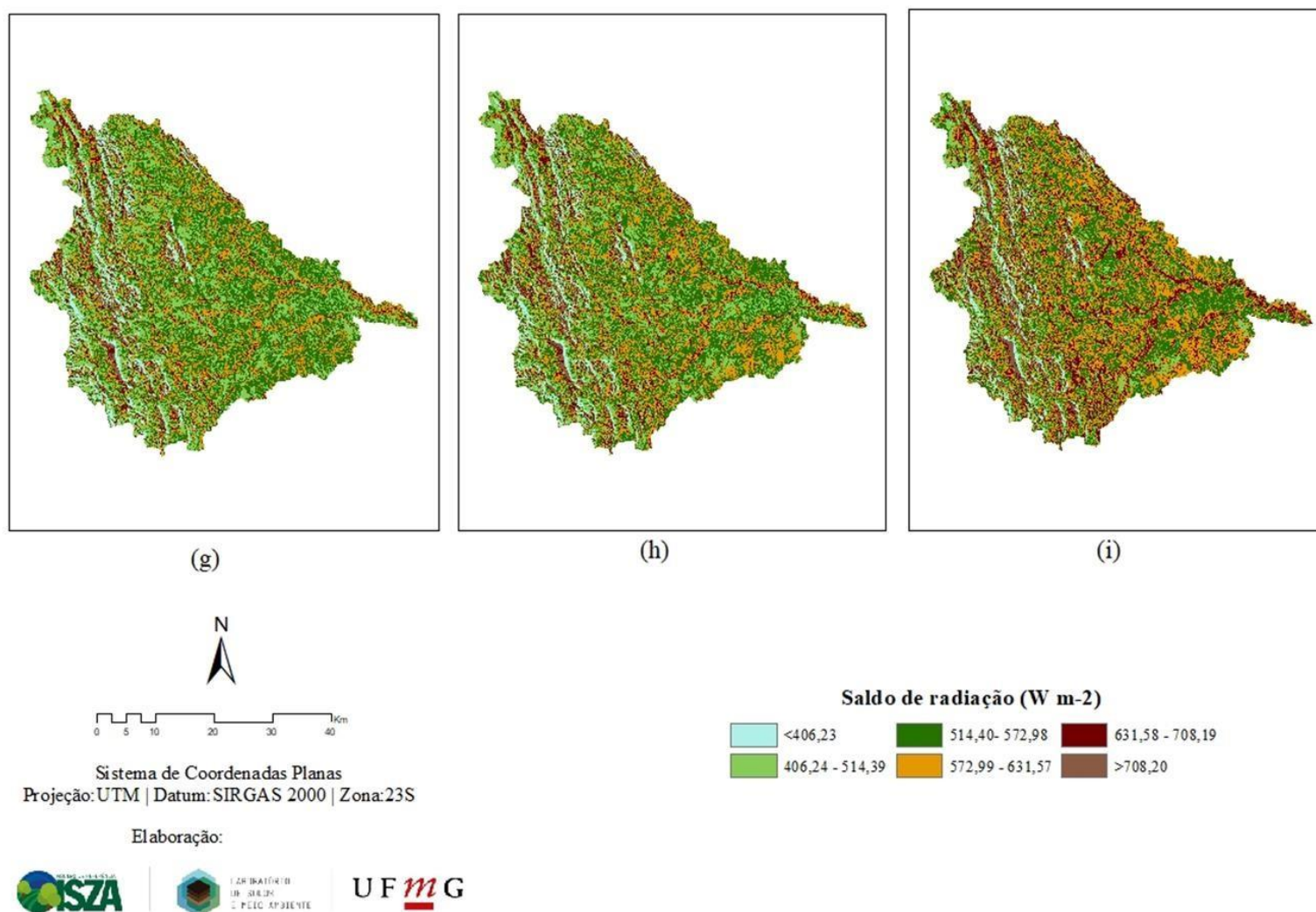


Figura 12: Distribuição espacial do saldo de radiação ($W m^{-2}$) na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 18 de agosto (g), 03 de setembro (h) e 19 de setembro (i) do ano de 2017.

Na Figura 13, o menor valor de G foi verificado na cena de 14 de maio ($-18,31 \text{ W m}^{-2}$). Os valores mínimos de G encontrados neste estudo são bem distintos dos encontrados por Mendonça (2007) que obteve $10,00 \text{ W m}^{-2}$, para essa componente do balanço de energia. Durante o processamento pro meio do SEBAL, esse autor estabeleceu uma condição para obter os valores de fluxo de calor no solo, de modo que não fossem menores que $10,00 \text{ W m}^{-2}$. Ademais, esses valores negativos podem ser devido a processos de resfriamento do solo.

Carneiro et al. (2013) afirmam que o valor de G, quando positivo, representa um aquecimento do solo, quando negativo, significando que o solo está em processo de resfriamento. Os processos físicos, químicos e biológicos, ocorrentes no solo, dependem, de algum modo, da temperatura, umidade e, conseqüentemente, do fluxo de calor.

De 17 de julho a 19 de setembro foram encontrados fluxo de calor no solo médio de $61,12 \text{ W m}^{-2}$, com valor mínimo de $3,16 \text{ W m}^{-2}$ no dia 17 de julho e máximo de $107,75 \text{ W m}^{-2}$ no dia 19 de setembro de 2017 (Figura 13). Nos estudos conduzidos por Lima (2010), o fluxo de calor no solo médio foi de $101,94 \text{ W m}^{-2}$, com valor mínimo de $26,81 \text{ W m}^{-2}$ no dia 14 de julho e máximo de $230,93 \text{ W m}^{-2}$ no dia 4 de outubro de 2007. Esta diferença encontrada entre os valores médios do fluxo de calor no solo pode ser devido a cobertura vegetal, detectada pelos sensores do satélite Landsat 8, em áreas irrigadas. Esse autor utilizou o sensor MODIS para aplicar o SEBAL na mesma sub-bacia, dessa forma as feições de um pivô central podem não ter sido distinguidas devido a resolução espacial de 250 m.

Nota-se que houve declínio dos valores de fluxo de calor no solo no período de maio a agosto, o que pode estar associado ao período seco. Giongo (2011) observou o aumento no fluxo de calor no solo em imagens que apresentaram pixels com valores elevados de temperatura, como no período de verão, e significativa diminuição de G no período de inverno, exatamente na época de baixas temperaturas de superfície.

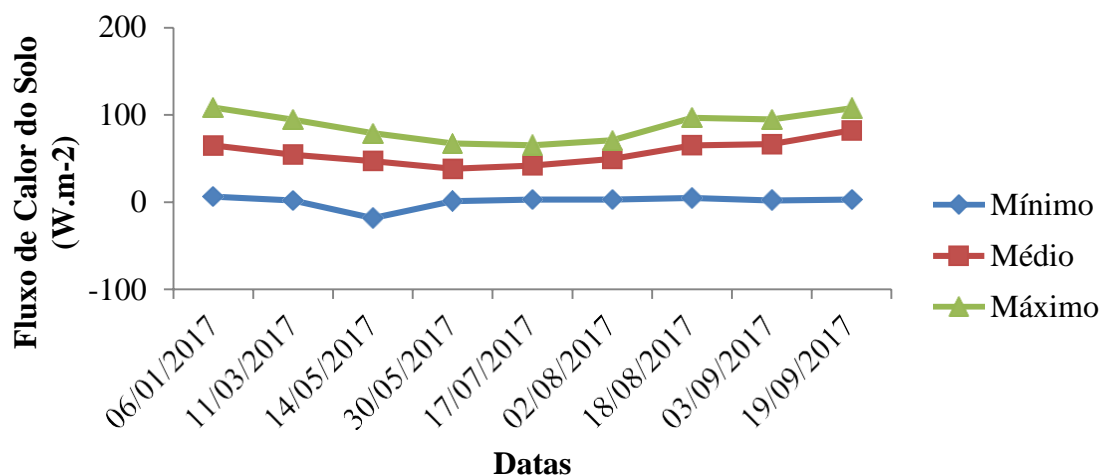


Figura 13: Fluxos de calor no solo (mínimo, médio e máximo) estimados para a sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros no ano de 2017.

Nas Figuras 14 a 16 é possível observar aumento, a partir de agosto, da proporção de áreas com fluxo de calor no solo na faixa de 47,72 a 61,29 W m⁻². Esse comportamento pode estar associado à maior proporção de áreas com pouca ou nenhuma cobertura vegetal conforme distribuição de NDVI apresentada nas Figuras 7 e 8.

Oliveira et al. (2009) afirma que as áreas com uma maior cobertura vegetal apresentam um fluxo de calor de solo menor que áreas de solo exposto. Este autor conduziu estudo na bacia do Salitre, sertão da Bahia, com valores de fluxo de calor no solo superiores a 65,01 W m⁻² em áreas classificadas como sob atividades antrópicas e áreas de solo exposto.

Ademais, o fluxo de calor no solo é o parâmetro mais difícil de ser estimado com exatidão por métodos radiométricos. Conforme Giongo (2011) ressalta, a principal causa de erros de estimativa de G com o uso de imagens de satélite se refere a limitações na detecção de diferenças de fluxo em profundidade. Ainda, os fluxos da superfície podem ser semelhantes em determinadas condições, enquanto em profundidade podem interferir também o tipo de solo, a umidade real, dentre outros fatores, e estes são fontes de erros nessas estimativas.

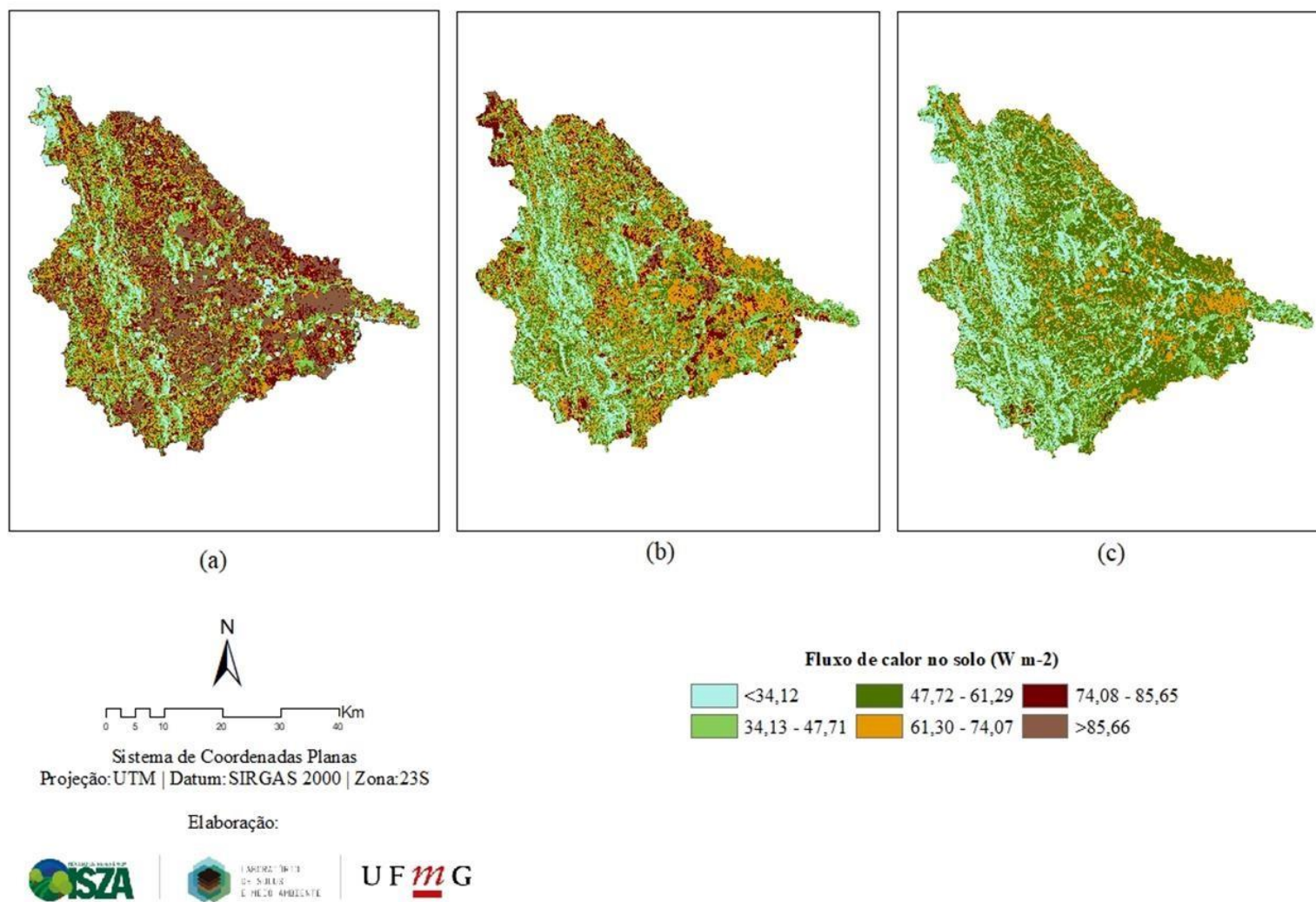


Figura 14: Distribuição espacial do fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$) na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 06 de janeiro (a), 11 de março (b) e 14 de maio (c) do ano de 2017.

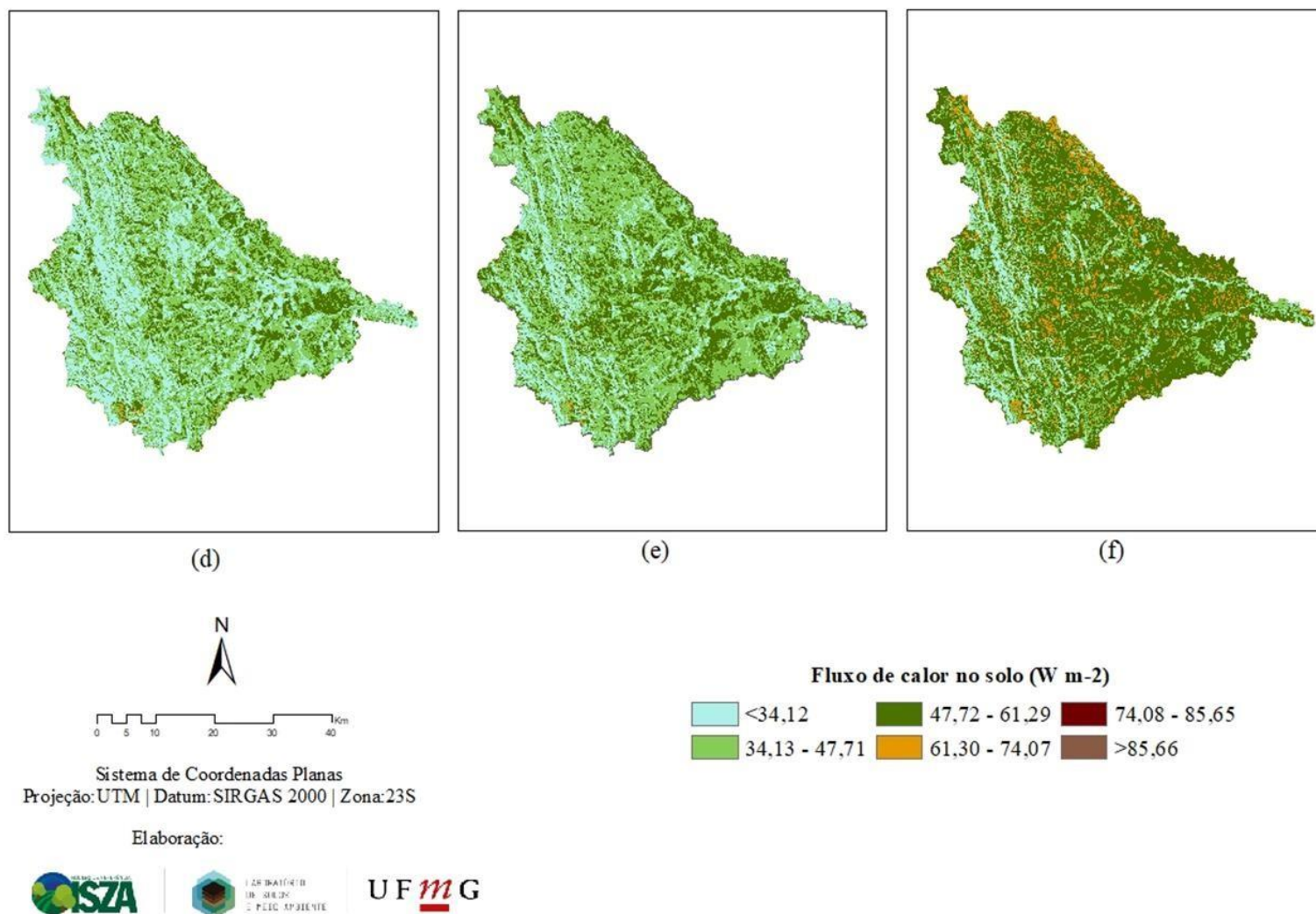


Figura 15: Distribuição espacial do fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$) na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 30 de maio (d), 17 de julho (e) e 02 de agosto (f) do ano de 2017.

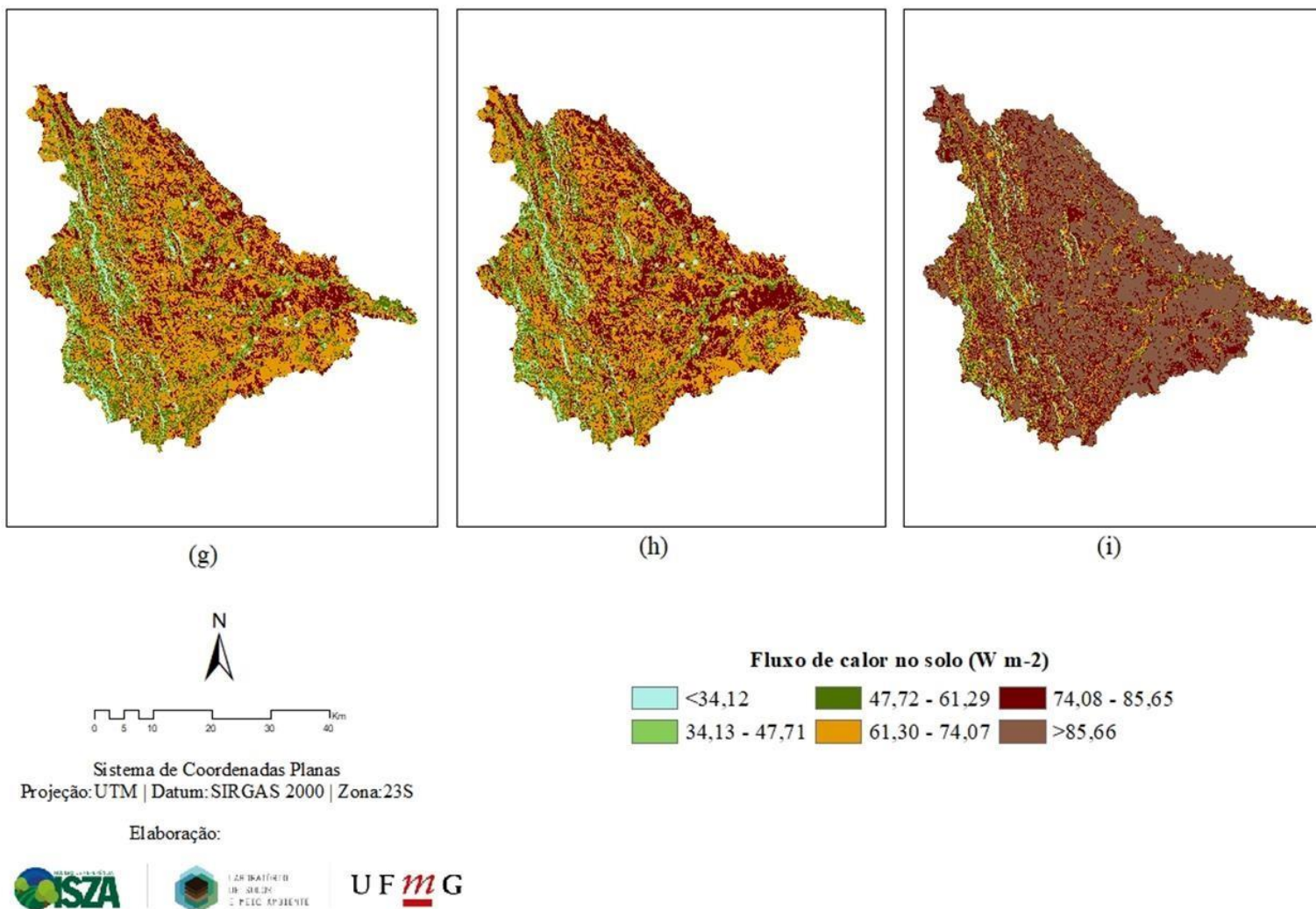


Figura 16: Distribuição espacial do fluxo de calor no solo (W m^{-2}) na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 18 de agosto (g), 03 de setembro (h), 19 de setembro (i) do ano de 2017.

Os resultados para o componente Fluxo de Calor Sensível (H) são apresentados na Figura 17. Observou-se tendência de aumento nos valores máximos do H, principalmente, depois do dia 17 de julho. Os valores mínimos que estiveram abaixo de zero, correspondem aos pixels cuja temperatura da superfície é inferior à do pixel “frio” conforme Silva e Bezerra (2006).

O valor de H médio da série foi de $465,24 \text{ W m}^{-2}$, sendo que, em média, o H mínimo e máximo foi de $71,50 \text{ W m}^{-2}$ e $931,04 \text{ W m}^{-2}$, respectivamente. O menor valor de H estimado foi de $-34,47 \text{ W m}^{-2}$ e o maior de $1238,82 \text{ W m}^{-2}$, em 17 de agosto e 11 de março, respectivamente.

Em 18 de agosto, o fluxo de calor sensível mínimo estimado foi de $95,74 \text{ W m}^{-2}$ e máximo de $870,69 \text{ W m}^{-2}$. Estes dados diferem dos obtidos por Lima (2010) onde o fluxo de calor sensível mínimo foi de $-88,88 \text{ W m}^{-2}$ e máximo de $720,36 \text{ W m}^{-2}$, ambos no dia 13 de agosto. Esta diferença entre o fluxo de calor sensível mínimo pode ser devido a existência de áreas irrigadas.

Pela convenção adotada por Kjaersgaard et al. (2008), geralmente, os valores de H, LE e G são positivos, ou seja, consumidores de energia durante o período diurno. H e G podem assumir valores negativos (fontes de energia), em circunstâncias específicas, como em campos irrigados, enquanto LE, devido ao resfriamento evaporativo da superfície, pode exceder o saldo de radiação à superfície.

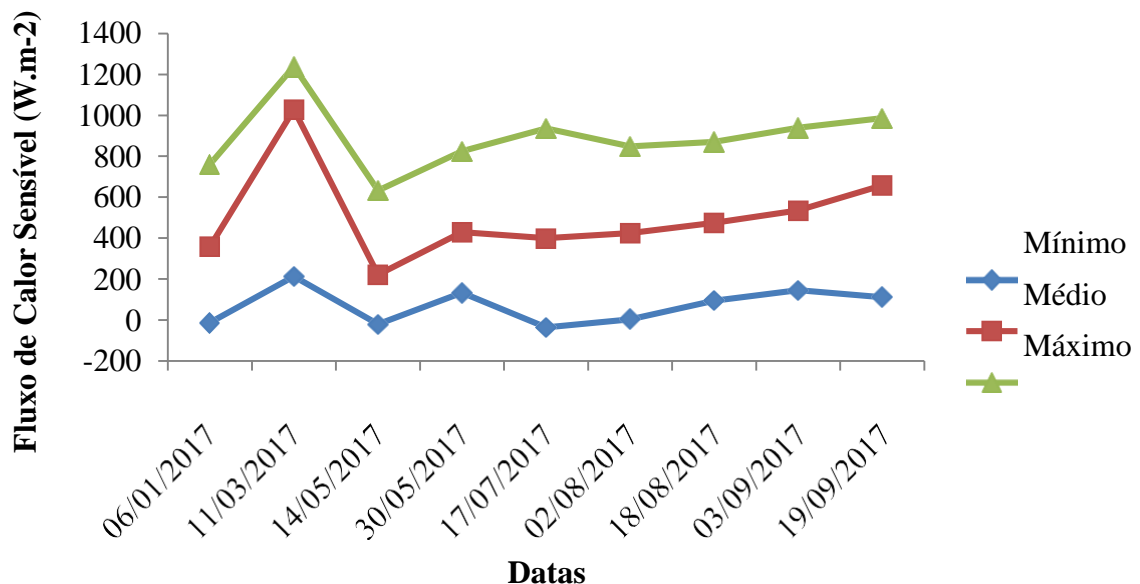


Figura 17: Fluxos de Calor Sensível (mínimo, médio e máximo) estimados na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros no ano de 2017.

A análise espacial do fluxo de calor sensível (Figuras 18 a 20) mostra que, de forma geral, áreas com baixos valores de NDVI apresentaram maiores valores de H.

Observa-se, para o dia 11 de março, que algumas áreas apresentaram a relação entre baixos valores de NDVI e altos valores de H, porém este comportamento se inverteu em outras áreas, como matas ripárias e áreas irrigadas. Isto provavelmente ocorreu em virtude da presença de nuvens nas cenas, sendo estas, portanto, não utilizadas nas análises de dados.

As áreas onde foram registrados os maiores valores de fluxo de calor sensível apresentam menores valores de NDVI, correspondendo a áreas com solo exposto ou menor cobertura vegetal. Estes dados corroboram com a afirmação de Ruhoff et al. (2009) de que, com a diminuição do índice de vegetação uma maior quantidade de energia fica disponível para ser convertida em fluxo de calor sensível. Os autores observaram este comportamento com a aplicação do SEBAL, em áreas de cerrado.

Os menores valores da série de dados foram registrados no dia 14 de maio, onde o valor mínimo de fluxo de calor sensível foi de $-19,03 \text{ W m}^{-2}$, médio de $221,95 \text{ W m}^{-2}$ e máximo de $633,22 \text{ W m}^{-2}$. Observa-se que os maiores valores de H ocorreram em regiões de solo exposto ou menor cobertura vegetal.

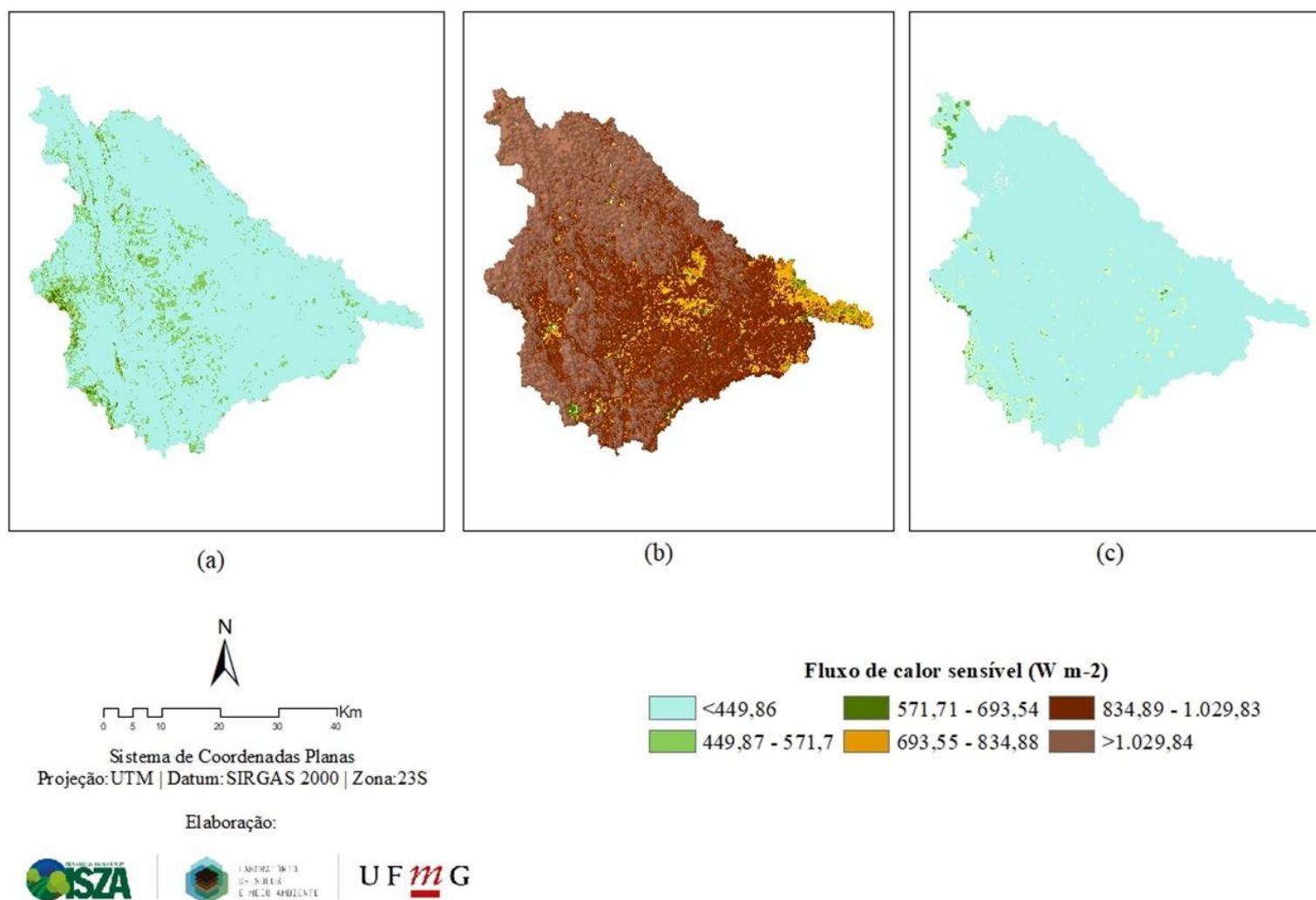


Figura 18: Distribuição espacial do fluxo de calor sensível (W m^{-2}) na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 06 de janeiro (a), 11 de março (b) e 14 de maio (c) do ano de 2017.

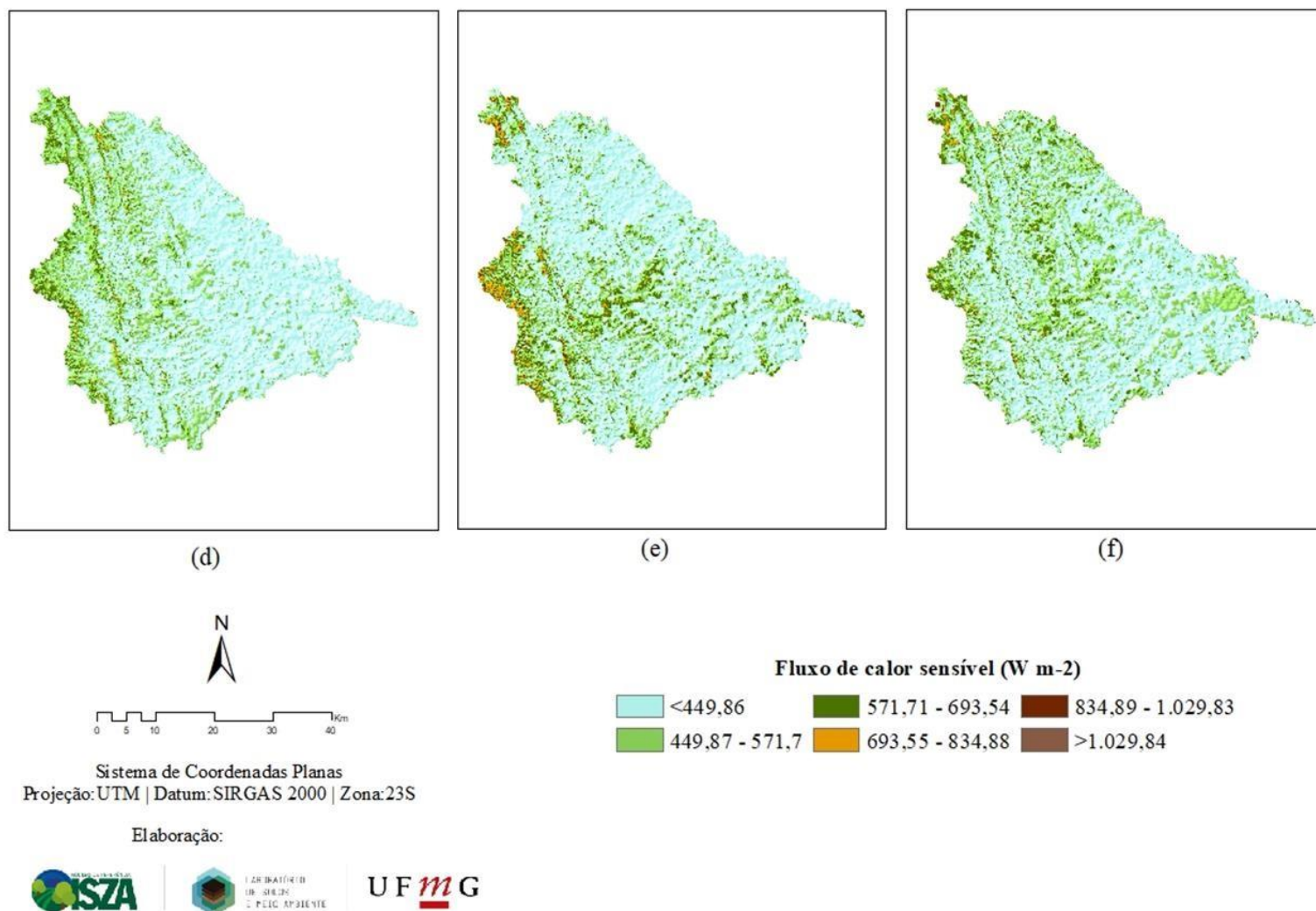


Figura 19: Distribuição espacial do fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$) na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 30 de maio (d), 17 de julho (e) e 02 de agosto (f) do ano de 2017.

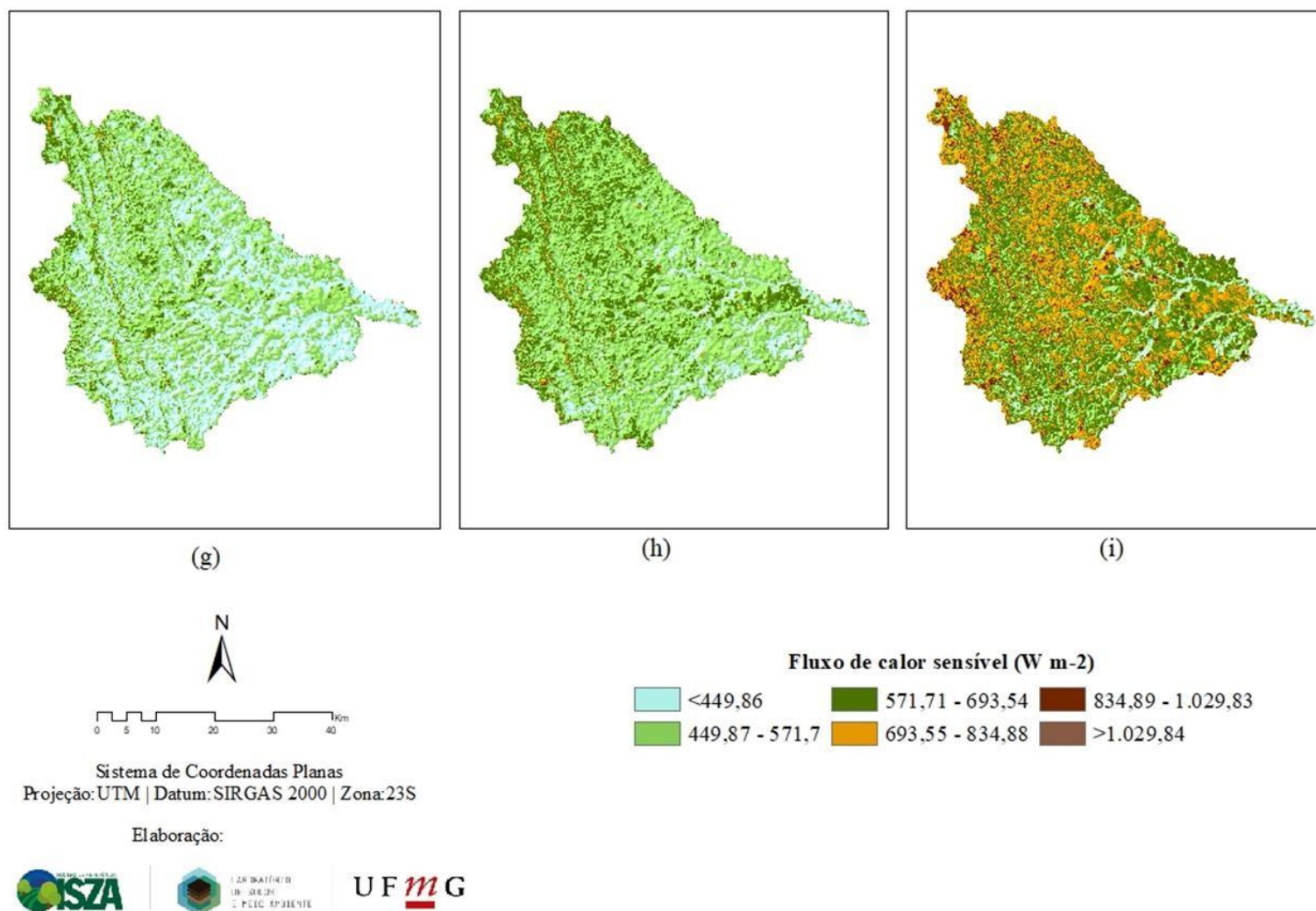


Figura 20: Distribuição espacial do fluxo de calor sensível ($W\ m^{-2}$) na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 18 de agosto (g), 03 de setembro (h), 19 de setembro (i) do ano de 2017.

A Figura 21 mostra o fluxo de calor latente (λET) máximo, mínimo e médio para a área de estudos. O λET médio da série foi de $319,13 \text{ W m}^{-2}$, sendo o λET mínimo foi de $-79,91 \text{ W m}^{-2}$, em 02 de agosto e o λE máximo foi de $926,25 \text{ W m}^{-2}$, em 11 de março.

De 17 de julho a 19 de setembro foram encontrados fluxo de calor latente médio de $-278,99 \text{ W m}^{-2}$, com valor mínimo de $-79,91 \text{ W m}^{-2}$ e máximo de $851,78 \text{ W m}^{-2}$, em 02 de agosto e 17 de julho de 2017, respectivamente. Em contrapartida, no período de julho a outubro de 2007, Lima (2010) obteve o fluxo de calor latente médio de $281,31 \text{ W m}^{-2}$, com valor mínimo de $-258,14 \text{ W m}^{-2}$ e máximo de $786,16 \text{ W m}^{-2}$, ambos no dia 13 de agosto. Essa diferença no valor mínimo pode estar relacionada aos baixos valores de fluxo de calor latente que se concentraram na estação seca.

Conforme Ruhoff et al. (2009), o fluxo de calor latente apresenta um padrão sazonal bem definido, no qual os máximos ocorrem na estação chuvosa, enquanto os mínimos ocorrem na estação seca.

Os valores negativos de λET encontrados podem ser devido à ocorrência de valores mais baixos do saldo de radiação, associados ao aumento da quantidade de energia destinada ao processo de aquecimento do ar e do solo (NICÁCIO, 2008).

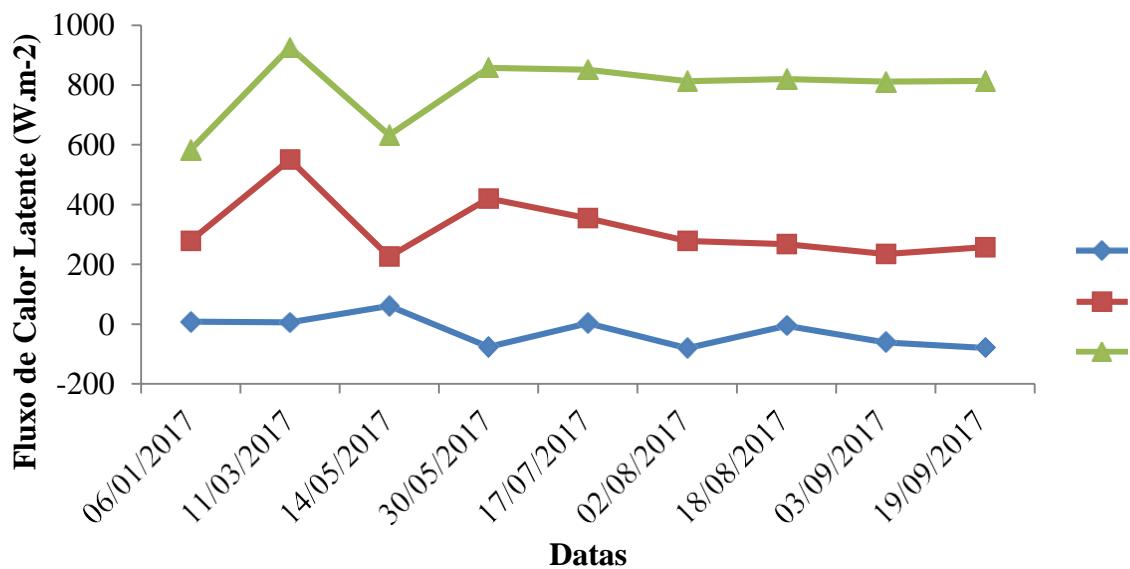


Figura 21: Fluxo de Calor Latente (mínimo, médio e máximo) estimados na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros no ano 2017.

Nas Figuras 22 a 24, de forma global, observa-se que os valores de λET foram menores em áreas de solo exposto ou menor cobertura vegetal, sendo que a partir de 30 de maio notam-se maior proporção de áreas com menores valores de λET . Este comportamento corrobora com

os baixos valores de NDVI apresentados nas Figuras 6 a 8.

Monteiro et. al (2014) avaliaram a eficiência do modelo SEBAL na estimativa dos componentes de balanço de energia e da evapotranspiração para áreas de cultivo de soja irrigada no município de Cruz Alta (RS). Neste estudo, em janeiro, as áreas compostas por vegetação nativa foram as que apresentaram os maiores valores de λET , acima de 608 W m^{-2} . Constatou ainda que os valores de fluxo de calor latente são diretamente proporcionais à densidade da vegetação, decrescendo bruscamente nas culturas anuais, em função da senescência das plantas, e mais lentamente na vegetação nativa, em função da diminuição da demanda evaporativa da atmosfera, dada a declinação solar. As regiões de solo exposto e área urbana apresentaram os menores valores de λET .

Os maiores valores de fluxo de calor latente ($> 152,24 \text{ W m}^{-2}$), nos meses de janeiro e fevereiro, podem ser explicados pelo período chuvoso. De acordo com Giongo (2011), enquanto nas estações de primavera e verão há um maior fluxo de energia latente e, conseqüentemente, maior evapotranspiração das superfícies. Por outro lado, foram registrados os menores valores no período de outono e inverno, ocorrendo uma baixa evapotranspiração, devido à diminuição dos fluxos de energia latente.

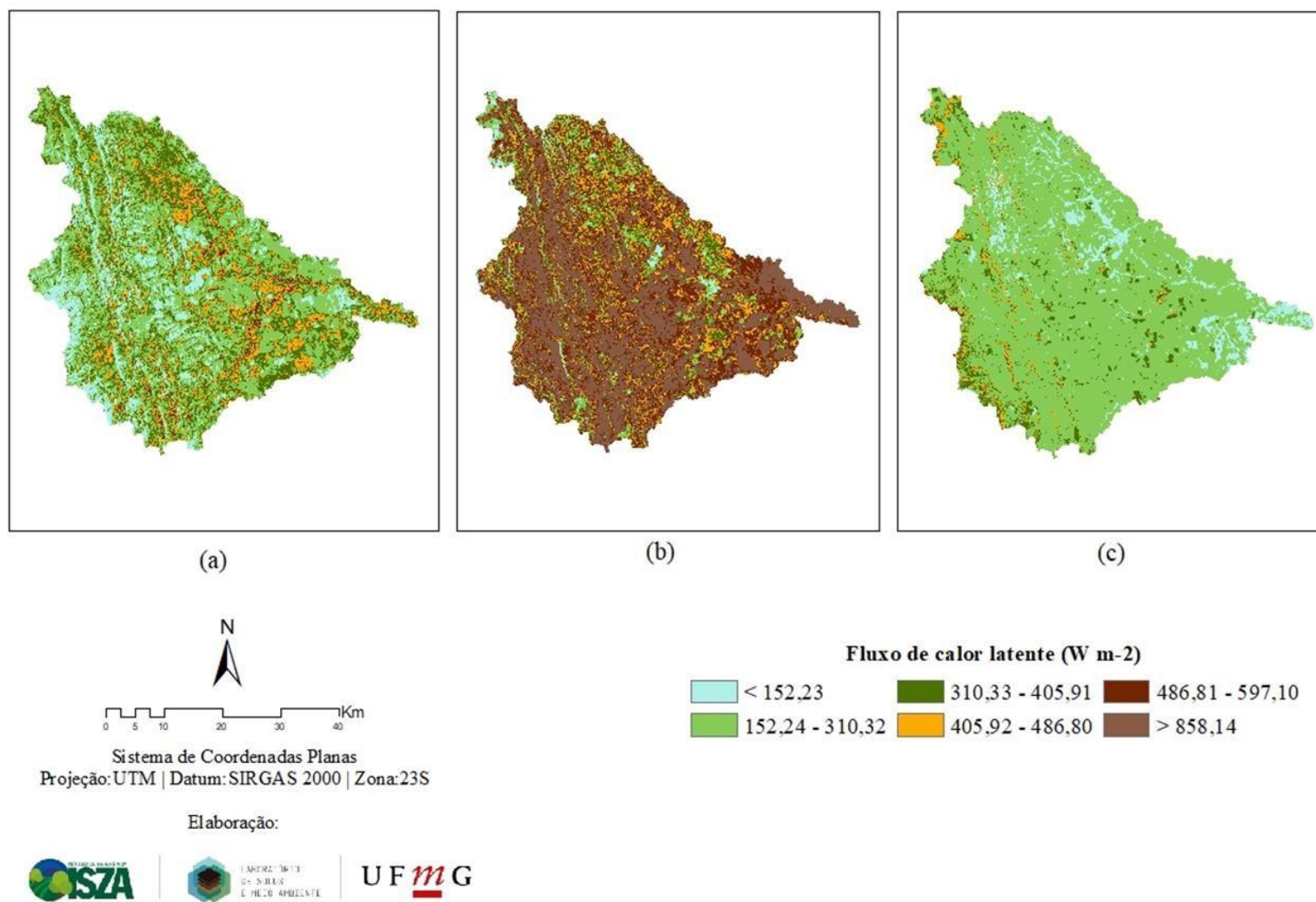


Figura 22: Distribuição espacial do fluxo de calor latente ($W m^{-2}$) na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 06 de janeiro (a), 11 de março (b) e 14 de maio (c) do ano de 2017.

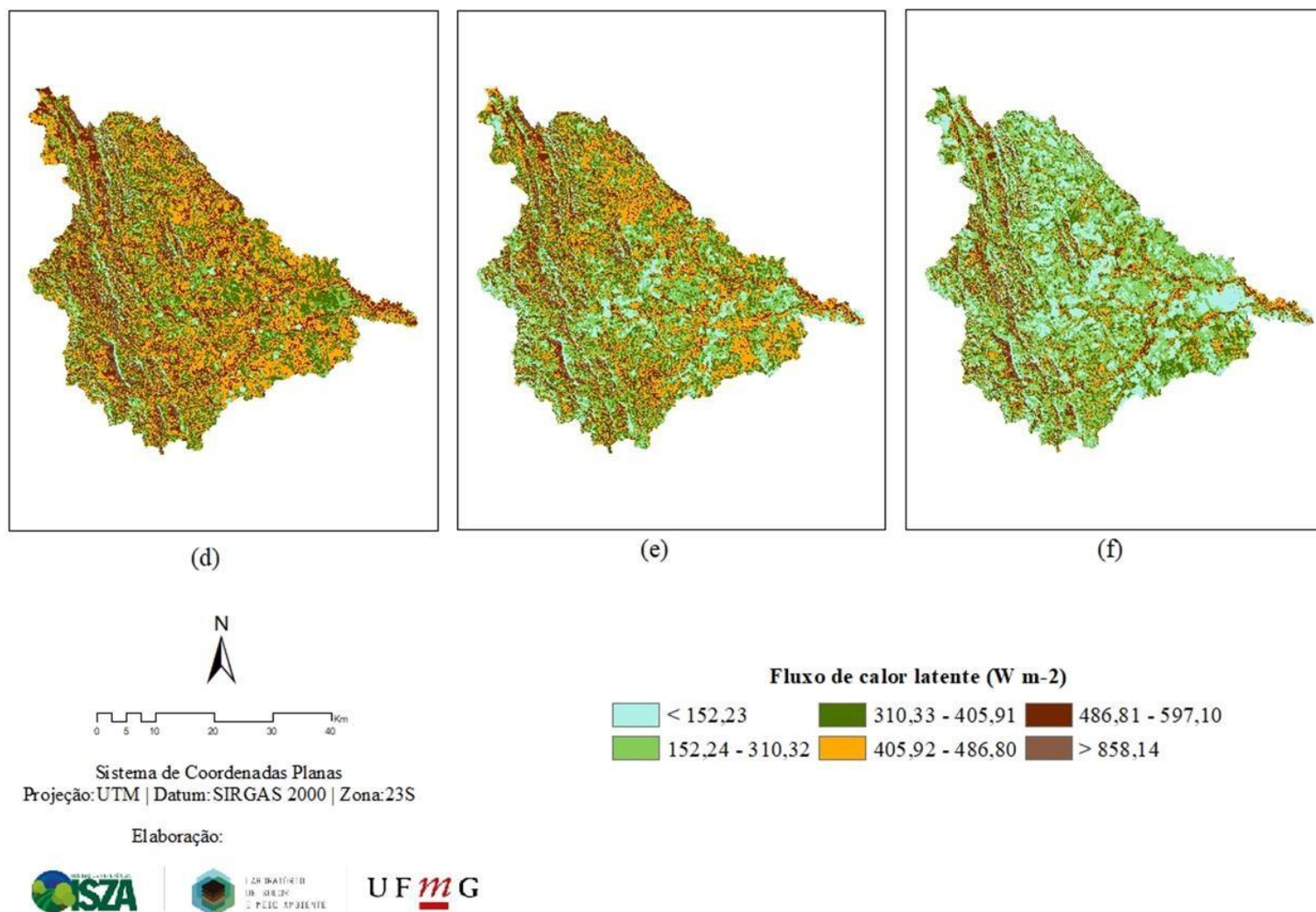


Figura 23: Distribuição espacial do fluxo de calor latente ($W m^{-2}$) na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 30 de maio (d), 17 de julho (e) e 02 de agosto (f) do ano de 2017.

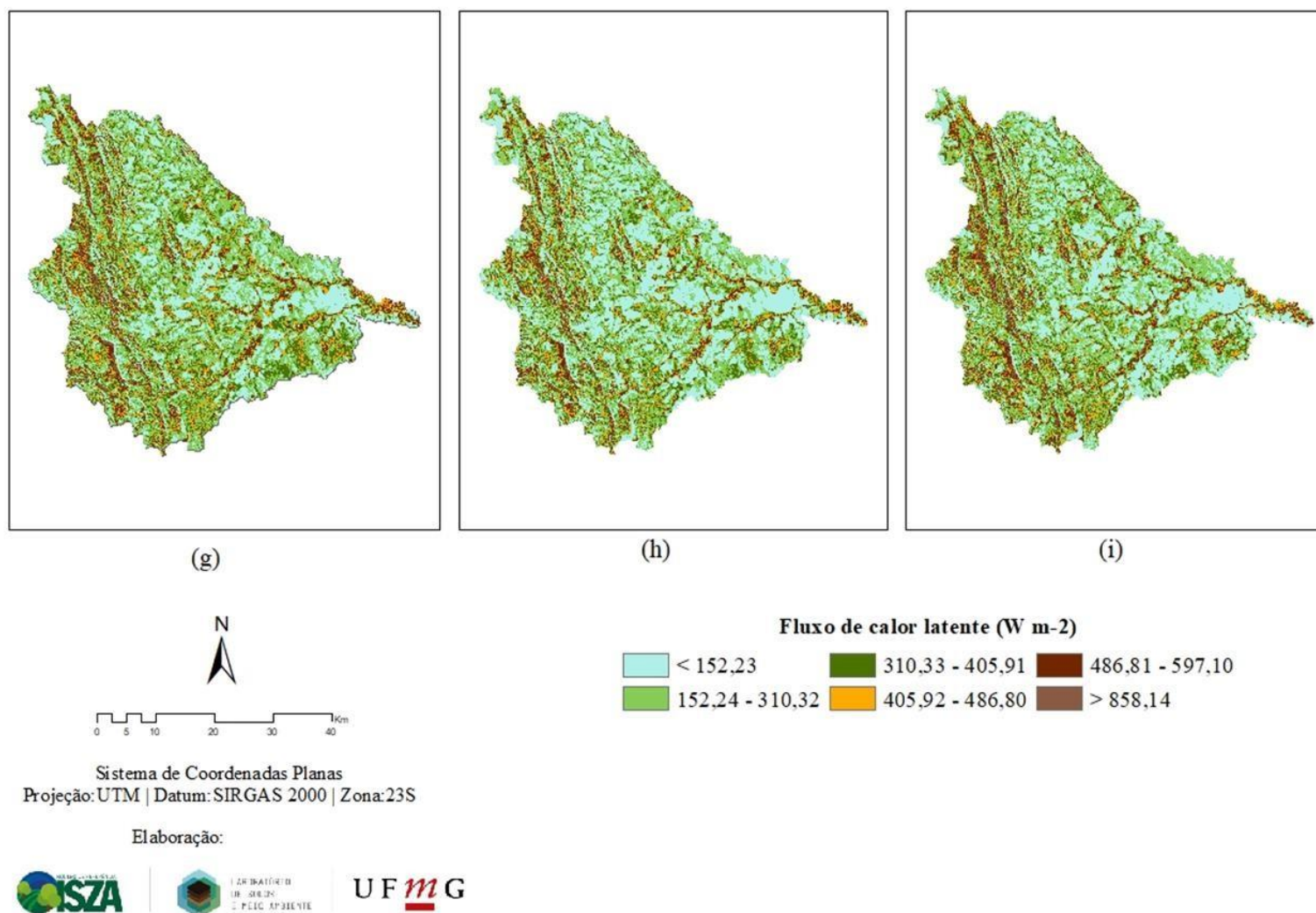


Figura 24: Distribuição espacial do fluxo de calor latente ($W m^{-2}$) na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 18 de agosto (g), 03 de setembro (h), 19 de setembro (i) do ano de 2017.

A evapotranspiração diária (ET_{24h}) média da série estudada foi de $4,16 \text{ mm d}^{-1}$, sendo que o valor mínimo foi de $0,0 \text{ mm d}^{-1}$, nos dias 30 de maio a 18 de agosto e o valor máximo de $13,84 \text{ mm d}^{-1}$, em 03 de setembro (Figura 25). Estes valores máximos foram observados em áreas próximas a cursos d'água.

De forma geral, observou-se tendência de aumento nos valores máximos da ET_{24h} . Os valores médios não acompanharam essa tendência, apresentando, até mesmo, pequena diminuição no dia 14 de maio. Essa diminuição verificada nos valores médios foi provavelmente devida a uma quantidade considerável de pixels com valor zero, que foram contabilizados na média fornecida pelo METRIC.

De 17 de julho a 19 de setembro, a evapotranspiração diária média obtida foi de $3,97 \text{ mm d}^{-1}$, com valores mínimos de $0,0 \text{ mm d}^{-1}$, nos dias 17 de julho a 18 de agosto e máximo de $13,84 \text{ mm d}^{-1}$, no dia 03 de setembro. Esses valores diferem daqueles encontrados por Lima (2010) que obteve a evapotranspiração diária média de $2,69 \text{ mm d}^{-1}$, com valor mínimo de $0,0 \text{ mm d}^{-1}$ e máximo de $6,98 \text{ mm d}^{-1}$, no dia 29 de outubro de 2007. Essa diferença entre os valores máximos pode estar associada às áreas próximas a curso d'água e ao aumento de áreas irrigadas na sub-bacia, tendo em vista que os estudos deste autor foram realizados no ano de 2007. Conforme Giongo (2011) altos valores do índice de vegetação estão associados a altos valores da evapotranspiração real.

Em 11 de março de 2017, os valores de evapotranspiração oscilaram de $0,39$ a $8,23 \text{ mm d}^{-1}$, corroborando com os valores encontrados por Trezza (2006), entre $0,01 \text{ mm d}^{-1}$ a $8,20 \text{ mm d}^{-1}$, no dia 14 de março de 2001 em áreas agrícolas no Estado de Guarico, na Venezuela.

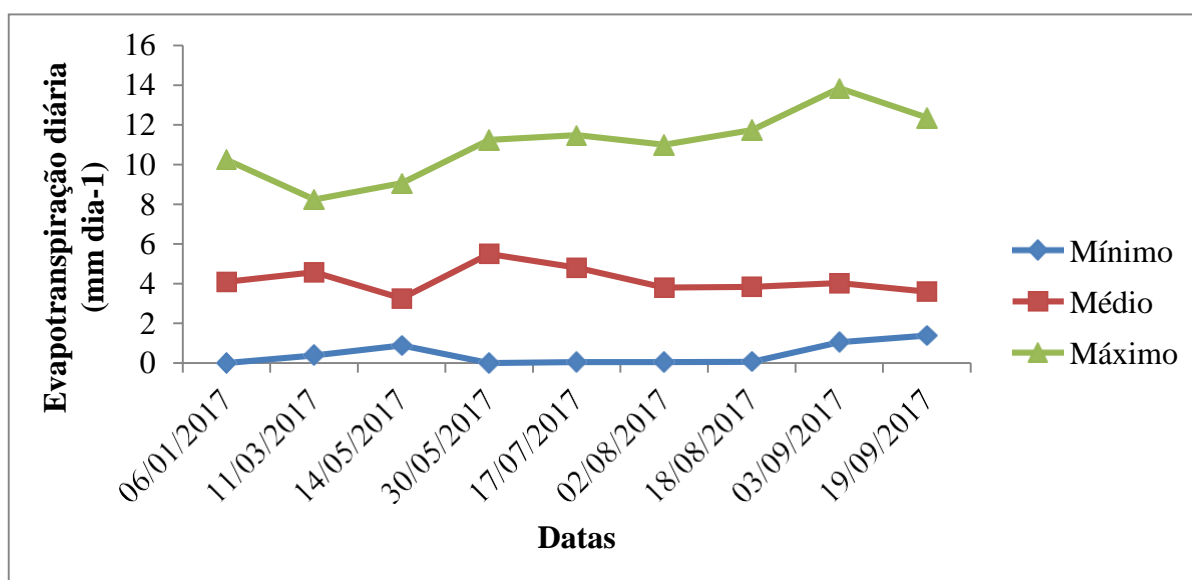


Figura 25: Evapotranspiração diária (mínimo, médio e máximo) estimados na sub-bacia do

ribeirão Entre-Ribeiros no ano de 2017.

Nas Figuras 26 a 28, os menores valores de ET_{24h} foram obtidos em áreas com solo exposto ou menor cobertura vegetal, enquanto, em áreas irrigadas com pivô central, foram evidenciados maiores valores de evapotranspiração. Nota-se que, a partir de maio de 2017, houve predominância de áreas com evapotranspiração menor que $1,28 \text{ mm d}^{-1}$, bem como maior proporção de áreas com baixo NDVI (Figuras 6 a 8). Resultados semelhantes foram obtidos por Bezerra et al. (2008) que aplicaram o SEBAL na mesorregião do Cariri, no sul do estado do Ceará (CE). Os autores obtiveram valores de ET_{24h} menores que $1,0 \text{ mm d}^{-1}$, para as áreas de solo exposto e/ou de vegetação nativa muito rala e sem folhas, no período de estiagem.

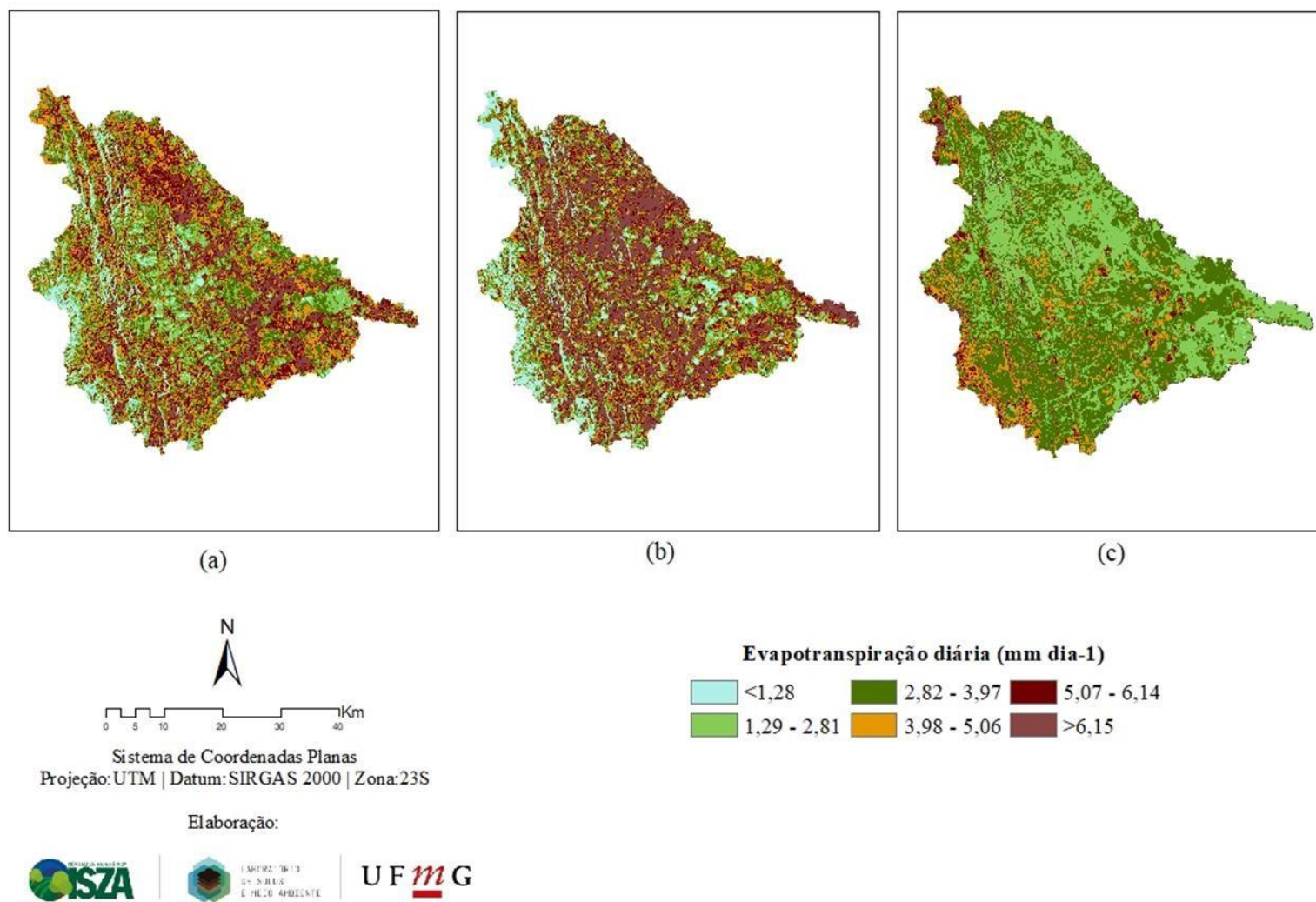


Figura 26: Distribuição espacial da evapotranspiração diária (mm dia^{-1}) na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 06 de janeiro (a), 11 de março (b) e 14 de maio (c) do ano de 2017.

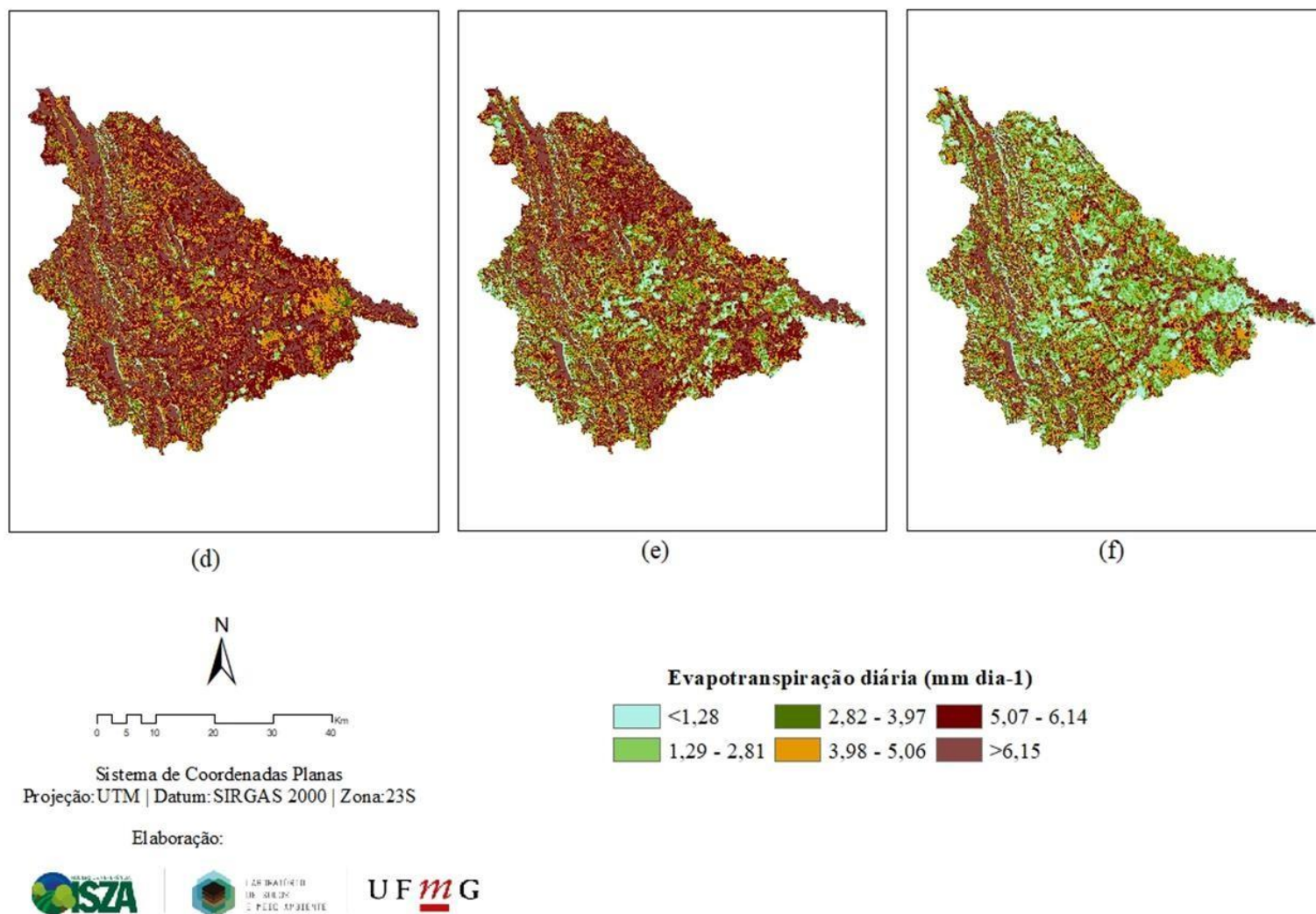


Figura 27: Distribuição espacial da evapotranspiração diária (mm dia^{-1}) na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 30 de maio (d), 17 de julho (e) e 02 de agosto (f) do ano de 2017.

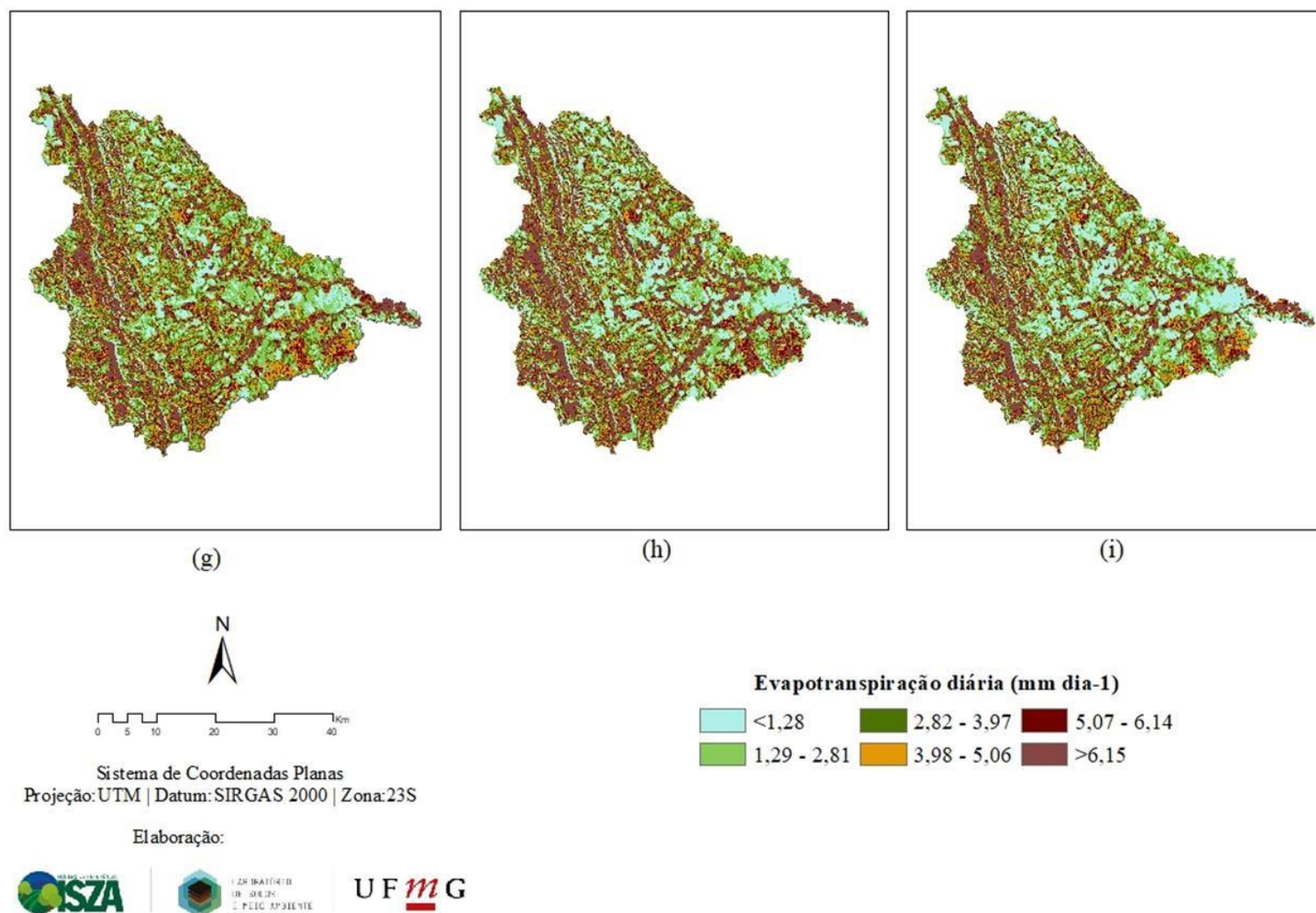


Figura 28: Distribuição espacial da evapotranspiração diária (mm dia^{-1}) na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, obtido por meio de imagens do Landsat 8, nos dias 18 de agosto (g), 03 de setembro (h), 19 de setembro (i) do ano de 2017.

4. CONCLUSÕES

A aplicação do METRIC com imagens Landsat 8 propiciou a estimativa dos componentes do balanço de energia e a evapotranspiração na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros.

O modelo METRIC possibilitou a identificação da variabilidade espacial e temporal do saldo de radiação, fluxos de calor sensível, calor latente, calor no solo e evapotranspiração real diária na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Minas Gerais e ao Laboratório de Solos e Meio Ambiente, do Instituto de Geociências, pela infraestrutura e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 no desenvolvimento deste trabalho.

5. REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. **FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, v. 56, n. 97, p. e156, 1998.

ALLEN, R. G.; TREZZA, R.; TASUMI, M. Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.139, n.1, p.55-73, 2006.

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

ANDRADE, R. G. **Aplicação do algoritmo SEBAL na estimativa da evapotranspiração e da biomassa acumulada da cana-de-açúcar**. 2008. 135f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

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

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

BRITO, P. V. S.; MORAIS, Y. C. B.; FERREIRA, H. S.; SILVA, J. F.; GALVÍNCIO, J. D. Análise comparativa da umidade da vegetação de áreas de caatinga preservada, agricultura irrigada e sequeiro. **Journal of Environmental Analysis and Progress**. v. 2, n. 3, p. 493-498, 2017.

CARNEIRO, R. G.; MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. F.; ANDRADE, A. M. D.; SANTOS, A. B.; MAIA, R. G. X. Fluxo de calor do solo e saldo de radiação dentro de uma área de mata atlântica em comparação com uma área de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 6, n. 3, p.555-565, 2013.

CORRÊA, F. P. **O uso do geoprocessamento na elaboração de documentos cartográficos como subsídio ao processo de zoneamento ambiental na bacia hidrográfica da lagoa feia no município de Campos dos Goytacazes/RJ**. 2003. 185f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2003.

FOLHES, M.T. **Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos**. 2007. 189 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

FURLEY, P. A. The nature and diversity of neotropical savanna vegetation with particular reference to the Brazilian cerrados. **Global EcologyAndBiogeography**. Vol. 8 (3-4), p.223-241, 1999.

GIONGO, P. R. **Mapeamento do balanço de energia e evapotranspiração diária por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. 2011. 123f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

GOMES, L. A. M. **Uso optimal do território de bacia hidrográfica com fundamentos no conceito de geociências agrárias e ambientais: bacia do Ribeirão Entre-Ribeiros no Vale do Rio Paracatu**.2007. 191 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS –IGAM. **Resumo executivo: Plano diretor de recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu**. Comitê da Sub- Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu. Belo Horizonte: IGAM, 384 p., 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 11 nov. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **Topodata: mapa índice**. 2019. Disponível em: <<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>>. Acesso em: 11 nov. 2019.

KJAERGAARD, J. H.; PLAUBORG, F.; MOLLERUP, M.; PETERSEN, C. T.; HANSEN, S. Crop coefficients for winter wheat in a sub-humid climate regime. **Agricultural Water Management**, v.95, p.918-924, 2008.

LI, Z.; TANG, R.; WAN, Z.; BI, Y.; ZHOU, C.; TANG, B.; YAN, G.; ZHANG, X. A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data. *Sensors*, v. 9, p. 3801-3853, 2009.

LIMA, E. P. **Estimativa da Evapotranspiração e do Balanço Hídrico a partir de imagens de Satélite de Duas Sub-Bacias do Paracatu**. 2010. 185 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

MACHADO, C. C. C.; GALVÍNCIO, J. D.; OLIVEIRA, T. H. **Estimativa dos valores de Saldo de Radiação e de Fluxo de Calor no Solo no município de São José do Sabugi – PB (Brasil), utilizando o algoritmo SEBAL**. VI Seminário Latino Americano de Geografia Física, p.1-12, 2010.

MAIA, F. O. A.; PÁDUA, L. C. T. Uso do Sensoriamento Remoto como recurso didático para estudos do espaço geográfico. **Centro Universitário de Belo Horizonte – UNI-BH**, p. 1-18, 2008.

MELO, M. C. A.; ASSUNÇÃO, W. L. Bacia do Rio Paracatu: Regime Pluviométrico X Consumo de Água por Pivô Central. **Horizonte Científico**, v. 5, n. 2, 2011.

MENDONÇA, J.C. **Estimativa da evapotranspiração regional utilizando imagens digitais orbitais na região Norte Fluminense**. 2007. 145 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Departamento de Ciências e Tecnologias Agropecuária, Universidade Estadual do Norte Fluminense “Darcy Ribeiro”, Rio de Janeiro, 2007.

MONTEIRO, P. F. C.; FONTANA, D. C.; SANTOS, T. V.; ROBERTI, D. R. Estimativa dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração para áreas de cultivo de soja nosul do Brasil utilizando imagens do sensor TM Landsat 5. **Bragantia**, v. 73, n. 1, p. 72-80, 2014.

NICÁCIO, R.M. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco**. 2008. 320 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

OLIVEIRA, T. H.; GALVÍNCIO, J. D.; ARAÚJO, M. S. B.; PIMENTEL, M. M. R.; SILVA, B. B. **Avaliação do fluxo de calor no solo, temperatura da superfície e albedo na bacia hidrográfica do rio Moxotó - PE através de imagens TM - Landsat-5**. In: XIII Simpósio de Geografia Física Aplicada, Viçosa, 1, p. 69-89. 2009.

PROFETA, A. L. **Estimativa da evapotranspiração real em área de relevo acidentado utilizando o SEBAL**. 2017. 80f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

RAMOS, M. F. **Estudo da variação temporal do índice de vegetação por diferença normalizada em Juiz de Fora a partir de imagens de satélite**. 2016. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

- RODRIGUEZ, R. D. G. **Metodologia para Estimativa de Demandas e Disponibilidades Hídricas: estudo de caso da Bacia do Paracatu**. 2004. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.
- RODRIGUEZ, R. D. G.; PRUSKI, F. F.; NOVAES, L. F.; RAMOS, M. M.; SILVA, D. D.; TEIXEIRA, A.F. Estimativa da demanda de água nas áreas irrigadas da Bacia do Rio Paracatu. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 172–179, 2007.
- RUHOFF, A.L.; COLLISCHONN, W.; FREITAS, R.M.; NEGRON-JUÁREZ, R.I.; ROCHA, H.R. **Variabilidade dos fluxos de calor sensível e latente em áreas de cerrado sensu stricto**. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, p. 4829-4836, 2009.
- SANTOS, T. V. **Fluxos de calor na superfície e evapotranspiração diária em áreas agrícolas e de vegetação nativa na Bacia do Jacuí por meio de imagens orbitais**. 2009. 96f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- SILVA, B. B.; BEZERRA M. V.C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.14, n.2, p.174-186, 2006.
- SILVA, J. S. V.; GUIMARÃES, P.; CECIM, J. S. R. Mapeamento do uso e cobertura vegetal da bacia hidrográfica do rio Paracatu: comparação 2002 e 2013. In: VI Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 2016, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 826 -835, 2016.
- STISEN, S.; JENSEN, K. H.; SANDHOLT, I.; GRIMES, D. I. F. A remote sensing driven distributed hydrological model of the Senegal River basin. **Journal of Hydrology**, v. 354, p. 131-148, 2008.
- TERAMOTO, ELIAS HIDEO; BENJUMEA, MARIA TERESA; DIAS GONÇALVES, ROGER; HUNG KIANG, CHANG. Séries temporais do índice NDVI na avaliação do comportamento sazonal do Aquífero Rio Claro. **Rev. Bras. de Cartografia**, v. 70, n. 3., p. 1135-1157, 2018.
- TREZZA, R. Evapotranspiration from a remote sensing model for water management in an irrigation system in Venezuela. **Interciencia**, v. 31, n. 6, p. 417-423, 2006.
- UDA, P. K. **Evapotranspiração real da bacia do Rio Iguaçu por meio do modelo METRIC**. 2016. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. **Earth Explorer**. 2019. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/logout/expire>>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. **Product guide: provisional Landsat 8 surface reflectance product**. Versão 1.8, 2016. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/documents/provisional_l8sr_product_guide.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2019.

VASCONCELOS, V. V.; MARTINS JUNIOR, P. P.; HADAD, R. M. Hydrographic and hydrogeological basin of Entre-Ribeiros: probable recharge zone delimitation and environmental impact assessment. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 3, p. 560-572, 2012.

VERMOTE, E.; JUSTICE, C.; CLAVERIE, M.; FRANCH, B. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 46-56, 2016.

WARREN, M. S.; TEIXEIRA, A. H. C.; RODRIGUES, L.N.; HERNANDEZ, F. B. T. Utilização do Sensoriamento Remoto Termal na Gestão de Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.7, n.01, p. 65-82, 2014.

WATERS, R.; ALLEN, R. G.; BASTIAANSEN, W.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL. Surface Energy Balance Algorithms for Land. Idaho Implementation. Advanced Training and Users Manual**, Idaho, USA, 2002.

CAPÍTULO 2

Comparação entre a evapotranspiração obtida por meio do METRIC e a evapotranspiração da cultura

Resumo: A estimativa dos processos de evapotranspiração é importante para um coerente planejamento e gerenciamento de sistemas de irrigação. O conhecimento das necessidades hídricas da cultura durante o estágio de desenvolvimento, permite o uso racional da água. O modelo METRIC utiliza os mesmos princípios básicos do SEBAL para estimar a evapotranspiração por técnicas de sensoriamento remoto. O objetivo deste trabalho foi realizar a comparação entre a evapotranspiração obtida pelo METRIC e a evapotranspiração de cultura em pivôs centrais, no município de Paracatu-MG, na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, com utilização de produtos do satélite Landsat 8. A metodologia foi desenvolvida em etapas principais: i) Aquisição de imagens do Landsat 8; ii) Aquisição de aspecto, declividade, altitude, bem como obtenção de latitude a partir do MDE; iii) Obtenção de dados meteorológicos; iv) Obtenção de variáveis para o cálculo do saldo de radiação e demais componentes do balanço de energia; v) Implementação do METRIC em Model Builder no ArcGIS; vi) Cálculo de componentes do balanço de energia e evapotranspiração diária; e, vii) Comparação entre os valores de evapotranspiração obtidos pelo METRIC e a evapotranspiração da cultura. Conclui-se que os valores da evapotranspiração diária, estimados por meio do METRIC apresentaram baixo coeficiente de determinação, com os valores de evapotranspiração da cultura do soja, com tendência de superestimativa. Os valores de R, EAM e REQM foram de 0,66, 1,62 mm d⁻¹ e 1,14 mm d⁻¹, respectivamente. Estes valores foram considerados satisfatórios, tendo em vista a distância da estação meteorológica a Fazenda. Denota-se o potencial de uso do modelo em regiões do país que não possuem ou possuem estações meteorológicas esparsas. Assim como, reconhece-se que os métodos de estimativas por meio de dados de sensoriamento remoto orbital possuem limitações quanto a resolução espacial e temporal, sendo complementares aos métodos clássicos.

Palavras-chave: soja; sensoriamento remoto; modelagem.

1. INTRODUÇÃO

As estimativas de variáveis de processos hidrológicos têm sido muito utilizadas atualmente para planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos em todo o mundo. O entendimento do balanço hídrico em uma bacia é muito importante, pois permite analisar os efeitos das ações antrópicas sobre o ambiente, conferir a disponibilidade hídrica e avaliar a sustentabilidade do ambiente (SOUSA et al., 2018).

O termo balanço hídrico corresponde a quantificação das entradas e saídas de água em uma bacia hidrográfica, baseada na aplicação do princípio de conservação da massa que considera esse sistema fechado. Dentre os componentes do balanço hídrico, a evapotranspiração é a forma pela qual a água da superfície terrestre retorna para a atmosfera no estado de vapor.

Neste sentido, a estimativa dos processos de evapotranspiração é de fundamental importância para o conhecimento das reais necessidades hídrica da cultura, durante os estádios de desenvolvimento, permitindo maior precisão no fornecimento e utilização da água pela cultura. Além de subsidiar o melhor planejamento e gerenciamento de sistemas de irrigação (SILVA, 2015; ALLEN et al., 2011; IRMAK et al., 2011; TEIXEIRA et al., 2009; NICÁCIO, 2008; BORGES e MENDIONDO, 2007; MEDINA et al., 1998), contribuindo tanto para a maior eficiência agrônômica quanto para o uso racional dos recursos hídricos.

Os procedimentos clássicos para a determinação da evapotranspiração são constituídos de métodos diretos, como os lisímetros e, métodos indiretos cujas equações utilizam dados medidos por estações meteorológicas (SOUZA, 2016). Tradicionalmente, a estimativa dessa variável é obtida por meio de métodos de coleta *in situ*, de forma pontual e muitas vezes onerosa, causando limitações de uso quando se deseja conhecer a variabilidade do fenômeno para áreas maiores que aquela amostrada (PROFETA, 2017).

Desta forma, como alternativa a esses métodos, o sensoriamento remoto oferece a possibilidade de estimar a evapotranspiração em áreas de diversas extensões, bem como fornecer dados climáticos para suprir a falta de dados convencionais devido a baixa densidade de estações meteorológicas (RAMPAZO, 2017).

Dentre os métodos que se utilizam do sensoriamento remoto para estimativa da evapotranspiração pode-se citar o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* - SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998) e *Mapping Evapotranspiration at High Spatial Resolution with Internalized Calibration* - METRIC (ALLEN et al., 2007).

O METRIC surgiu como aprimoramento ao modelo SEBAL. Dentre as melhorias propostas, Tasumi (2003) sugeriu a implementação do aspecto/inclinação da superfície e

calibração atmosférica para as bandas espectrais dos satélites. As alterações mais significativas estão relacionadas à correção atmosférica das refletâncias espectrais, que levam em consideração fatores de absorção, espalhamento e transmitância. A adoção dessas correções possibilita a obtenção dos índices de vegetação corrigidos atmosféricamente (ARAÚJO, 2014).

A forma de extrapolação da evapotranspiração instantânea para valores diários ou sazonais difere entre os modelos. No SEBAL, a extrapolação corresponde a fração evaporativa FE estimada por $\lambda E / (R_n - G)$. No METRIC, a extrapolação ocorre na fração de evapotranspiração de referência, ET_0F , sendo dada pela razão entre a evapotranspiração instantânea e a evapotranspiração de referência, estimada com dados de estação meteorológica para a data de aquisição da imagem. Este procedimento pode melhor quantificar os impactos de advecção e mudanças nas condições de vento e umidade do ar durante o dia (Li et al., 2009).

Além disso, a utilização de cartas de elevação digital no cômputo do aspecto e inclinação da superfície, possibilitou a estimativa das componentes do saldo de radiação de forma mais precisa (ALLEN; TREZZA e TASUMI, 2006).

Desta maneira, a quantificação da evapotranspiração por sensoriamento remoto se apresenta como uma ferramenta útil para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos em uma bacia e para o monitoramento das necessidades hídricas das culturas, durante os estádios de desenvolvimento.

Em diversas regiões do Brasil tem sido evidenciadas situações de escassez hídrica, como é o caso da bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, afluente do rio Paracatu, que teve expressivo aumento da demanda pelo uso da água, principalmente devido à expansão das áreas irrigadas, após os incentivos governamentais ocorridos na década de 70 (OLIVEIRA, 2011). Além disso, o aumento da demanda de água, principalmente no período de estiagem, em áreas irrigadas tem resultado em conflitos entre os usuários da bacia, dentre os quais agricultores (VASCONCELOS; MARTINS JUNIOR e HADAD, 2012).

Diante deste contexto, objetivou-se comparar a evapotranspiração obtida pelo METRIC e a evapotranspiração de cultura em pivôs centrais, no município de Paracatu-MG, pertencente a sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros, com utilização de produtos do satélite Landsat 8.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros situa-se na bacia hidrográfica do rio Paracatu, no Noroeste de Minas Gerais (Figura 1), entre os Municípios de Paracatu e Unaí. Possui 3.973 km² e, fisionomicamente, está inserida, em território de predominância do bioma Cerrado

(FURLEY, 1999; RODRIGUEZ, 2004; SILVA; GUIMARÃES e CECIM, 2016).

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, ou seja, clima tropical chuvoso típico com precipitação concentrada no período de outubro a abril, com destaque para o trimestre novembro, dezembro e janeiro como o mais chuvoso (IGAM, 2006; VASCONCELOS; MARTINS JUNIOR e HADAD, 2012).

As principais atividades econômicas desenvolvidas na bacia do rio Paracatu são a pecuária, agricultura e exploração mineral (REZENDE, 2013). A agricultura irrigada é o principal usuário de água na bacia, correspondendo a 86,6% do total demandado, sendo que as sub-bacias do ribeirão Entre-Ribeiros e do rio Preto concentram 53% de toda a área irrigada da bacia (RODRIGUEZ et al., 2007; PRUSKI et al., 2007).

Os principais cultivos na bacia do rio Paracatu são: milho, soja, feijão e cana-de-açúcar (IBGE, 2006).

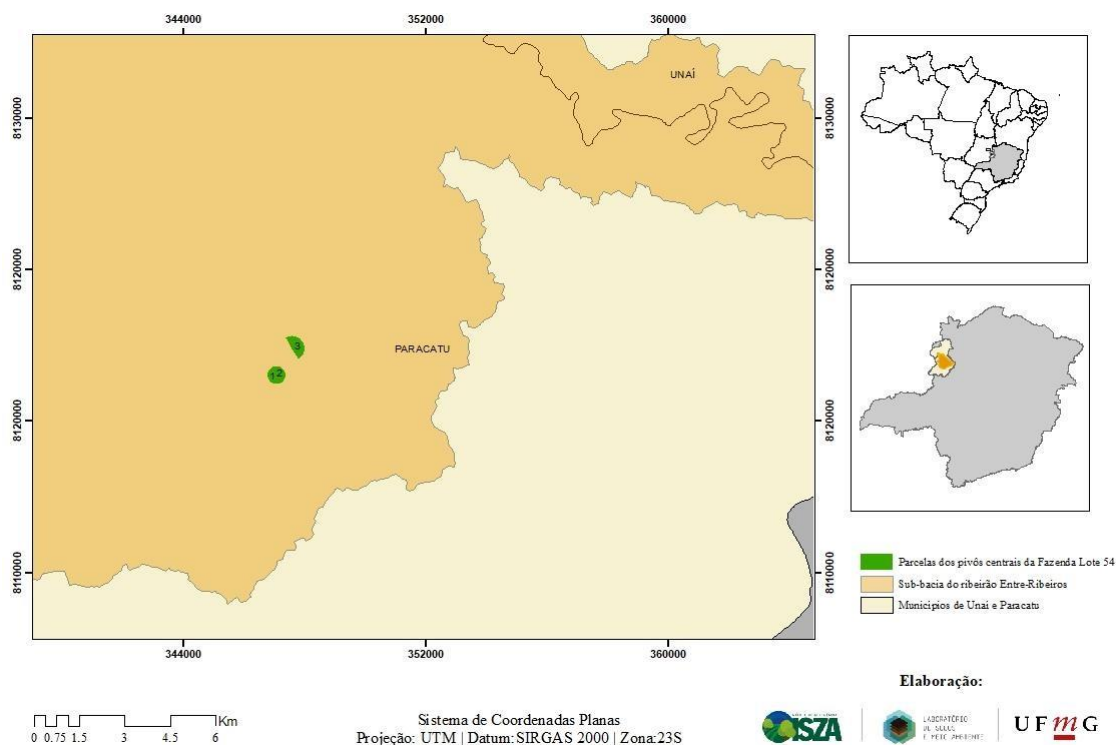


Figura 1: Localização dos pivôs centrais no município de Paracatu-MG, na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros.

Para este estudo, a base de dados utilizada consistiu em: a) Modelo Digital de Elevação (MDE) e atributos derivados nas formas numéricas, com resolução espacial de 30 m (INPE, 2019); b) Imagens Multiespectrais do Landsat 8, Coleção 1 - nível 2 de processamento sob demanda, com 30 m de resolução espacial (USGS, 2019); c) Dados meteorológicos horários e

diários de velocidade do vento, temperaturas do ar mínima, média e máxima, radiação solar, pressão atmosférica e umidade relativa do ar observada na estação meteorológica automática do município de Unaí – MG (INMET, 2017). A estação meteorológica automática de Paracatu-MG não foi utilizada no estudo devido a fundação ser datada de 15 de março de 2018.

Os processamentos dos dados geoespaciais (preparação de dados, implementação do modelo METRIC e confecção de layouts) foram realizados no software ArcGIS®. Os dados foram padronizados com Projeção Universal Transversa de Mercator – Fuso 23S e datum SIRGAS 2000.

A metodologia foi desenvolvida nas etapas: i) Obtenção de dados meteorológicos; ii) Aquisição de imagens do Landsat 8; iii) Aquisição dos atributos aspecto, declividade, altitude, e de latitude, a partir do MDE; iv) Cômputo de variáveis do saldo de radiação de onda incidente, bem como da evapotranspiração de referência horária e diária; v) Implementação do modelo em *Model Builder* no ArcGIS; vi) Cômputo de componentes do balanço de energia e evapotranspiração diária; e, vii) Comparação entre os valores de evapotranspiração obtidos pelo modelo METRIC e a evapotranspiração da cultura, em pivôs centrais da Fazenda Lote 54, no município de Paracatu-MG. O fluxograma metodológico é apresentado na Figura 2.

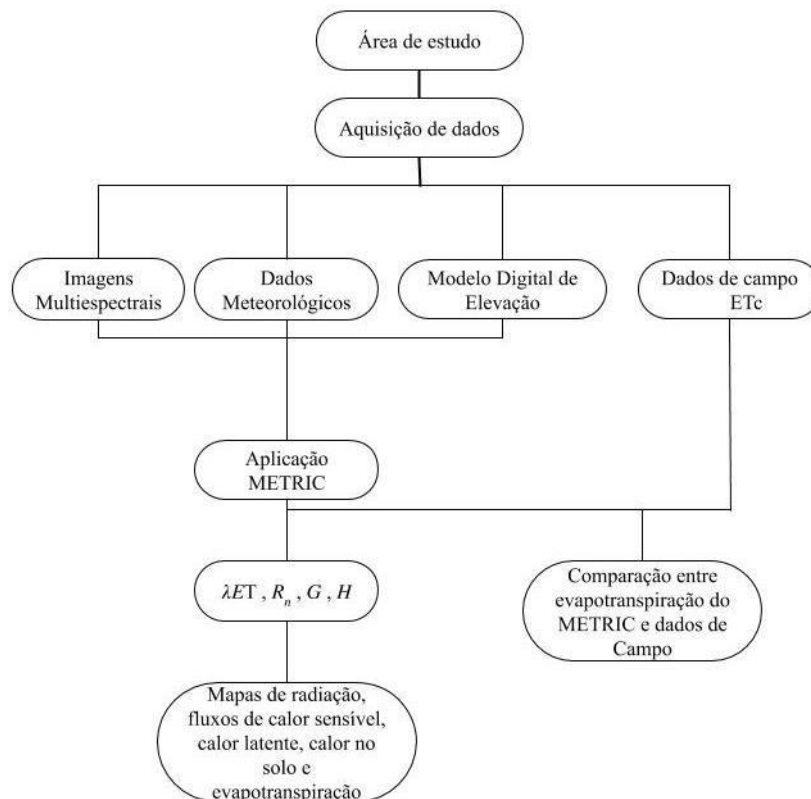


Figura 2: Fluxograma das etapas de processamento para estimativa dos fluxos de energia e da evapotranspiração para posterior comparação com os dados observados em campo.

Assim, a primeira etapa consistiu na obtenção das variáveis meteorológicas: temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, radiação solar e velocidade do vento. Foi verificado a inexistência de falhas dos registros meteorológicos e os dados foram tabulados em planilhas.

Os dados meteorológicos foram obtidos da estação de Unaí-MG, localizada entre as coordenadas 8168855.01 m de latitude Sul e 299181.41 m de longitude Oeste e a 631 m de altitude. Esta é representativa das condições meteorológicas da bacia e, é automática, facilitando a obtenção dos dados. Além disso, esta estação foi utilizada por Lima (2010) para aplicação do SEBAL nas sub-bacias do ribeirão Entre-Ribeiros e do rio Preto. A estação está localizada a 71,15 Km da Fazenda Lote 54, no município de Paracatu-MG.

Na segunda etapa, foram selecionadas imagens Landsat 8, Coleção 1 - nível 2 de processamento sob demanda, órbita/ponto 220/72 por serem produtos com transformações geométricas e radiométricas, bem como por ser possível obter a reflectância de superfície corrigida atmosféricamente utilizando o algoritmo Surface Reflectance Code – LaSRC (USGS, 2016; VERMOTE et al., 2016), específico para o Landsat 8. Foram utilizadas as bandas de 2 a 7 para o cálculo de albedo, bandas 4 e 5 para os índices de vegetação, assim como as bandas 10 e 11 para a temperatura de superfície.

Na terceira etapa, foram obtidos os dados geomorfométricos de aspecto, declividade, altitude e convertidos em unidades angulares. Além disso, foi obtida a latitude a partir do MDE com reamostragem para 16 bit unsigned. Esses foram os dados de entrada para o cálculo de radiação de onda curta incidente.

Na quarta etapa, foram calculados em planilhas, os parâmetros de distância relativa, declinação solar e ângulo horário para obtenção da radiação de onda curta incidente, que compõe o saldo de radiação. Além disso, foram calculadas a evapotranspiração de referência horária e diária para cômputo da evapotranspiração real diária, pelo METRIC, no ano de 2017. A obtenção desses parâmetros foi realizada conforme orientações do documento *Crop Evapotranspiration* número 56 da FAO (ALLEN et al., 1998) e as equações são apresentadas no Apêndice.

A quinta etapa correspondeu ao cômputo do saldo de radiação, fluxo de calor no solo, fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente (componentes do balanço de energia), bem como a evapotranspiração diária (ET_{24h}), por meio do modelo METRIC, implementado no software ArcGIS. As rotinas foram executadas manualmente, após construção das etapas do modelo na

ferramenta *Model Builder*. Na Figura 3 visualiza-se etapas do modelo METRIC implementadas no ArcGIS.

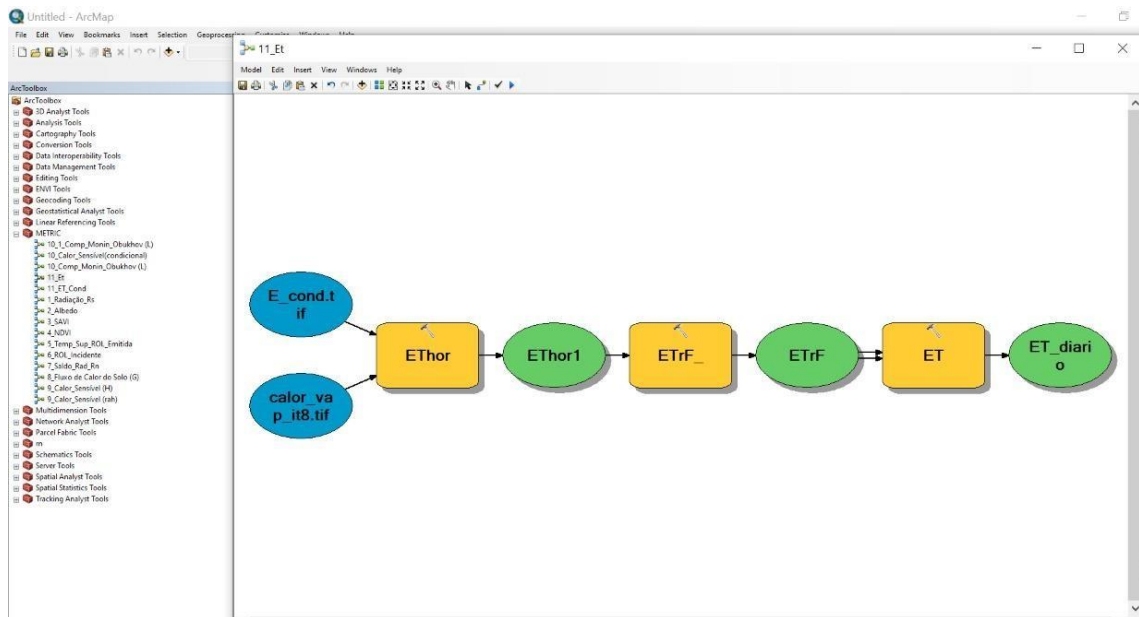


Figura 3: Etapas do modelo METRIC implementadas no ArcGIS.

Os procedimentos metodológicos de aplicação do METRIC foram realizados conforme proposto por Allen et al. (2007).

No METRIC, a energia consumida pelo processo de evapotranspiração é calculada como um residual da equação do balanço de energia à superfície:

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (1)$$

Onde, λET é um valor instantâneo do fluxo de calor latente para o momento de passagem do satélite ($W m^{-2}$); R_n é o saldo de radiação na superfície ($W m^{-2}$); G é o fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$); e H é o fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$).

O saldo de radiação na superfície (R_n) corresponde à energia radiante disponível, considerando todos os fluxos de energia incidentes na superfície (entrada) e emitidos pela superfície (saída). Esse componente obtido por meio da Equação 2 e a sequência dos processamentos executados, bem como os demais procedimentos necessários à sua estimativa são apresentados no fluxograma da Figura 4.

$$R_n = (1 - \alpha_{sup})R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

Onde R_n é o saldo de radiação ($W m^{-2}$); α_{sup} é o albedo da superfície (adimensional); $R_{S\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente ($W m^{-2}$); $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa incidente ($W.m$

2); $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida ($W m^{-2}$); e ε_0 é a emissividade da superfície (adimensional).

O fluxo de calor no solo representa a taxa de energia utilizada para aquecimento do solo, e pode ser descrito como a taxa de armazenamento de calor no solo e vegetação, devido à condução.

$$\frac{G}{R_n} = (T_s - 273,15)(0,0038 + 0,0074\alpha)(1 - 0,98NDVI^4) \quad (3)$$

Onde, T_s é a temperatura da superfície (K); α_{sup} é o albedo da superfície (adimensional) e $NDVI$ é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada. O fluxo de calor sensível (H) representa a perda de calor para o ar, através de condução e convecção sendo estimado para o transporte de calor.

O cômputo dessa componente é o cerne do modelo, sendo estimada com base na velocidade do vento e temperatura da superfície, usando uma calibração interna da diferença da temperatura próxima à superfície entre dois níveis da superfície.

$$H = \frac{(\rho_{ar} \times c_p \times dT)}{r_{ah}} \quad (4)$$

Onde, ρ_{ar} é a densidade do ar ($1,15 kg m^{-3}$); c_p é o calor específico do ar ($1.004 J kg^{-1} K^{-1}$); dT é a diferença de temperatura ($T_1 - T_2$) entre duas alturas (z_1 e z_2) (K); e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ($s m^{-1}$).

A partir da aplicação da Equação 1, que calcula o fluxo de calor latente (λET) como um resíduo do balanço de energia, a evapotranspiração real horária (ET_h) é estimada utilizando-se a Equação 5:

$$ET_h = 3.600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (5)$$

Em que, 3.600 corresponde à conversão de 1 hora para segundos; λ é o calor latente de vaporização ($J.kg^{-1}$) – calor absorvido quando um quilograma de água evapora, sendo estimado pela Equação 6:

$$\lambda = (2,501 - 0,00236(T_s - 273,15)) \times 10^6 \quad (6)$$

A evapotranspiração de referência horária (ET_{0_h}) foi calculada pela Equação 7, a partir dos dados meteorológicos, conforme orientações de ALLEN et al. (1998).

$$ET_{0,h} = \frac{0,408(Rn - G) + \gamma \left(\frac{37}{T} + 273 \right) u_2 (e^0(T) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,24u_2)} \quad (7)$$

Em que, Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$); Rn é o saldo de radiação na superfície ($MJm^{-2} h^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($MJm^{-2} h^{-1}$), γ é a constante psicométrica ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$); T é a temperatura média horária ($^\circ C$); u_2 é a velocidade do vento a 2 metros de altura ($m s^{-1}$); $e^0(T)$ é pressão de vapor de saturação à temperatura do ar T (kPa); e_a é pressão de vapor (kPa).

A fração da evapotranspiração de referência ET_0F permanece praticamente constante durante o dia e dessa forma permite uma boa aproximação para a estimativa da ET_{24h} (WATERS et al., 2002).

$$ET_0F = \frac{ET_h}{ET_{0,h}} \quad (8)$$

Em que, ET_0F é a fração da evapotranspiração de referência (adimensional); $ET_{0,h}$, nesse caso, corresponde à evapotranspiração de referência horária; ET_h , a evapotranspiração real horária.

A evapotranspiração diária foi estimada assumindo que a fração de evaporação instantânea, calculada para a hora de aquisição da imagem, é semelhante à ET_0F média em 24 horas. Para a extrapolação da ET_h para evapotranspiração real diária (ET_{24h}) ao longo de toda a imagem, utiliza-se a Equação 9:

$$ET_{24h} = ET_0F \times ET_{024h} \quad (9)$$

Onde ET_{024h} é a evapotranspiração de referência diária da estação meteorológica para o mesmo dia de aquisição da imagem, calculada pela Equação 10:

$$ET_{0_{24h}} = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \left(\frac{900}{T} + 273 \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (10)$$

Em que, Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$); Rn é o saldo de radiação na superfície ($MJm^{-2} h^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($MJm^{-2} h^{-1}$), γ é a constante psicométrica ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$); T é a temperatura média diária ($^\circ C$); u_2 é a velocidade do vento a 2 metros de altura ($m s^{-1}$); e_a é pressão de vapor (kPa); e_s é pressão de saturação de vapor (kPa). Na

última etapa, foi avaliado o desempenho do METRIC em relação aos dados de monitoramento diário da evapotranspiração da cultura (ETc) em pivôs centrais da sub-bacia

ribeirão Entre-Ribeiros. Estes dados foram fornecidos pela IRRIGER, que é uma empresa de base tecnológica com prestação de serviço na área de gerenciamento da irrigação. Para a estimativa da ET_c , utilizou-se o coeficiente de cultura (K_c), relativo à fase de desenvolvimento da cultura, e o método de Penman- Monteith FAO (1998). A estimativa da evapotranspiração pelo método Padrão FAO foi obtida pela equação 11.

$$Et_c = Et_o \times Kc \quad (11)$$

Em que, ET_0 é a evapotranspiração de referência ($mm\ d^{-1}$); K_c é o coeficiente da cultura (adimensional).

Foram extraídos os valores de evapotranspiração diária do pixel central dos pivôs para executar as análises estatísticas. Empregou-se o erro absoluto médio (EAM) e a raiz do erro quadrático médio (REQM) para comparação da evapotranspiração estimada por meio do METRIC e por Penman-Monteith.

O método da Regressão Linear Simples foi empregado para correlacionar, em nível diário, os dados da cultura usando o método de Penman-Monteith em áreas de plantio da soja e de evapotranspiração estimada pelo METRIC. Da mesma forma, foi elaborado gráfico de dispersão com o intuito de interpretar a tendência dos valores. Foi conhecido o coeficiente de determinação (R^2), que é a proporção de variância total da variável dependente explicada pela variância de x .

O coeficiente de correlação simples de Person (R) foi determinado para avaliar o grau de associação linear entre os dados e indica o grau de dispersão dos pontos em relação à média, o chamado erro aleatório. Para tanto, foram utilizadas as expressões:

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_i^N |(P_i - O_i)| \quad (12)$$

$$REQM = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$R^2 = \frac{[\sum P_i(O_i - \bar{O})]}{[\sum_{n=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{n=1}^n (P_i - \bar{P})^2]} \quad (14)$$

$$R = \left[\frac{[\sum P_i(O_i - \bar{O})]}{[\sum_{n=1}^2 (O_i - \bar{O}_i) \sum_{n=1}^2 (P_i - \bar{P}_i)]} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Em que, P_i é a evapotranspiração estimada pelo modelo METRIC, O_i é a evapotranspiração estimada pelo método de Penman-Monteith e N é o número de observações. A barra sobre esses símbolos refere-se ao valor médio dos dados considerados.

Utilizou-se dados de evapotranspiração da cultura estimados pelo método de Penman-Monteith e pelo Metric, para áreas de plantios da soja em três parcelas dos pivôs centrais da fazenda Lote 54, no município de Paracatu – MG. Para o cálculo de Penman-Monteith foram utilizados dados da estação de Unaí-MG, sendo que os valores de Etc foram obtidos conforme Equação 11 e coeficientes da cultura (Tabela 2). A fazenda encontra-se a Oeste da sede do município e está a 536 m de altitude.

Os estádios de desenvolvimento da soja, conforme sistema proposto por Fehr e Caviness (1977), são divididos em vegetativos e reprodutivos. Os vegetativos são designados pela letra V, e os reprodutivos, designados pela letra R, com exceção dos estádios VE (emergência) e VC (cotilédones), as letras V e R são seguidas de índices numéricos que identificam estádios específicos. A partir do VC, as subdivisões dos estádios são numeradas sequencialmente - V1, V2, V3, V4, V5, V6, ...Vn, sendo n o número de nós acima do nó cotiledonar, com folha completamente desenvolvida. Os estádios reprodutivos abrangem quatro fases distintas, ou seja, florescimento (R1 e R2), desenvolvimento da vagem (R3 e R4), desenvolvimento do grão (R5 e R6) e maturação da planta (R7 e R8) (FARIAS; NEPOMUCENO e NEUMAIER, 2007). O conhecimento dos estádios de desenvolvimento possibilita identificar as características morfológicas da planta, condição fisiológica e técnicas de manejo que atendam às necessidades da planta.

A cultivar de soja RK6316 IPRO com tecnologia Intacta foi utilizada nos pivôs. Durante o ciclo de desenvolvimento da cultura em campo houve registro de apenas 12 mm de chuva no dia 08 de dezembro de 2017 . O restante da água necessária para a cultura foi proveniente de irrigação. A Tabela 1 apresenta as datas de plantio e colheita, duração do ciclo de desenvolvimento da soja e posição geográfica dos pivôs.

Tabela 1: Datas de plantio e colheita, duração do ciclo de desenvolvimento e posição geográfica dos pivôs centrais da Fazenda Lote 54.

ID	Data de Plantio	Data de Colheita	Área do Parcela (ha)	Ciclo de Desenvolvimento (dias)	Coordenadas Planas
1	03/10/2017	09/01/2018	26,62	98	346940.02 m O 8115376.42 m S
2	01/10/2017	09/01/2018	26,62	100	347197.09 m O 8116590.73 m S
3	05/10/2017	09/01/2018	52,74	96	347710.16 m O 8117436.98 m S

Para a realização da comparação da evapotranspiração da cultura e a estimada pelo Metric foram utilizados os produtos Landsat 8 disponíveis, ou seja, 05 e 21 de outubro e 06 de novembro de 2017. Para essa comparação, os valores de evapotranspiração estimados pelo Metric foram obtidos no pixel central das parcelas dos pivôs.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados, na Tabela 2, os resultados da ET_c usando método de Penman-Monteith e os dados de ET_{24h} estimados por meio do METRIC, ambos com dados meteorológicos da estação de Unaí-MG. Na Figura 4 é apresentada a distribuição espacial de NDVI nas parcelas dos pivôs da cultura de soja e, na Figura 5, o ajuste entre as equações.

Observa-se, na Tabela 2, que para as imagens de 05 de outubro e 21 de outubro de 2017, para todas as datas de plantio, os valores de evapotranspiração da cultura foram inferiores aos dados estimados pelo METRIC, indicando uma superestimação dos valores quando avaliados pelo METRIC. Já para a imagem de 06/11/2017 ocorre o inverso. Essa variação de comportamento pode estar relacionada a presença de áreas de solo exposto, uma vez que a cultura encontra-se em desenvolvimento e há aumento da quantidade de folhas. A heterogeneidade na cobertura da superfície pode incorrer em variações de albedo e, conseqüentemente, influenciar nos valores de evapotranspiração obtidos pelo modelo. Conforme Martins (2015), alterações na cobertura do solo, podem provocar um aumento nas taxas de albedo e, conseqüentemente, interferir negativamente nos valores de evapotranspiração.

A variação de comportamento observada entre os valores de evapotranspiração da cultura e os dados estimados pelo METRIC, pode acarretar em excesso ou deficiência de aplicação da lâmina d'água dois estádios críticos de desenvolvimento da soja: germinação-emergência e floração-enchimento de grãos. Os estádios de floração e de enchimento de grãos

são os de maior consumo de água pela planta, sendo que o excesso ou deficiência hídrica entre esses estádios retardam o crescimento vegetativo e prejudicam a obtenção de uma boa uniformidade na população de plantas (FUZZO, 2015). Denota-se que a obtenção de dados durante os estágios de desenvolvimento da soja possibilitam uma ampla avaliação do desempenho do modelo METRIC.

Uma possível explicação para esta divergência pode estar associada à distância entre a estação meteorológica de Unaí-MG e a fazenda Lote 54 e, também, à diferença de altitude de 95 m. Desta forma, as variáveis meteorológicas registradas pela estação da IRRIGER são mais representativos das condições do entorno.

Também podem ocorrer variações nos resultados do modelo, ao se avaliar diferentes cultivares da mesma cultura, que apresentam características específicas quanto ao ciclo de desenvolvimento; cor, ângulo de orientação, tamanho e geometria da folha; distribuição horizontal das plantas na área e distribuição vertical da folhagem; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

Tabela 2: Evapotranspiração da cultura (ETc) usando método Penman-Monteith e por meio do METRIC, ambos estimados com dados meteorológicos de estação de Unaí-MG.

Data da imagem	ID	Data de Plantio	Dias após Plantio	Coefficiente da cultura (Kc)	ETc (mm d ⁻¹)	ET _{24h} METRIC (mm d ⁻¹)
05/10/2017	3	05/10/2017	0	0,60	3,34	5,12
	2	01/10/2017	4	0,60	3,09	4,41
	1	03/10/2017	2	0,60	3,01	4,24
21/10/2017	3	05/10/2017	16	0,67	4,37	4,75
	2	01/10/2017	20	0,71	5,21	6,12
	1	03/10/2017	18	0,71	5,21	7,32
06/11/2017	3	05/10/2017	32	0,83	3,68	2,25
	2	01/10/2017	36	0,87	3,68	3,17
	1	03/10/2017	34	0,87	3,68	3,07

A cultura encontrava-se no estádio vegetativo de emergência (VE) no dia 05 de outubro de 2017 e no estádio vegetativo de formação de nós (VC), nos dias 21 de outubro e 06 de novembro de 2017. Sendo que no dia 21 de outubro, o estádio correspondia a VC-V1 e, no dia 06 de novembro, V3-V5.

Na Figura 4, nota-se que os valores de NDVI, em 05 de outubro, foram inferiores a 0,50, denotando a presença de solo exposto. Sendo que nos demais estágios, as parcelas dos pivôs apresentaram maior proporção de áreas com NDVI superiores a 0,69. De acordo com Rosendo (2005), valores de NDVI mais próximos de 1, indicam que a vegetação é mais densa e o valor

0 (zero) indica superfície não vegetada. Os histogramas da distribuição do NDVI são apresentados no Apêndice.

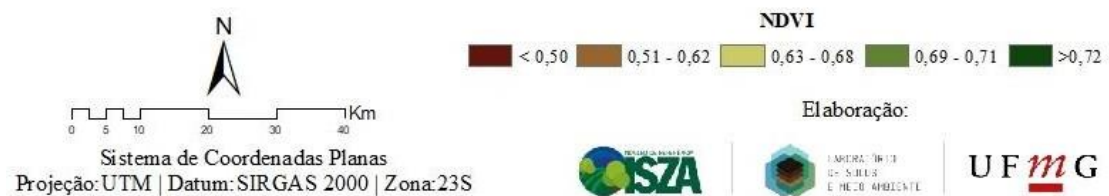
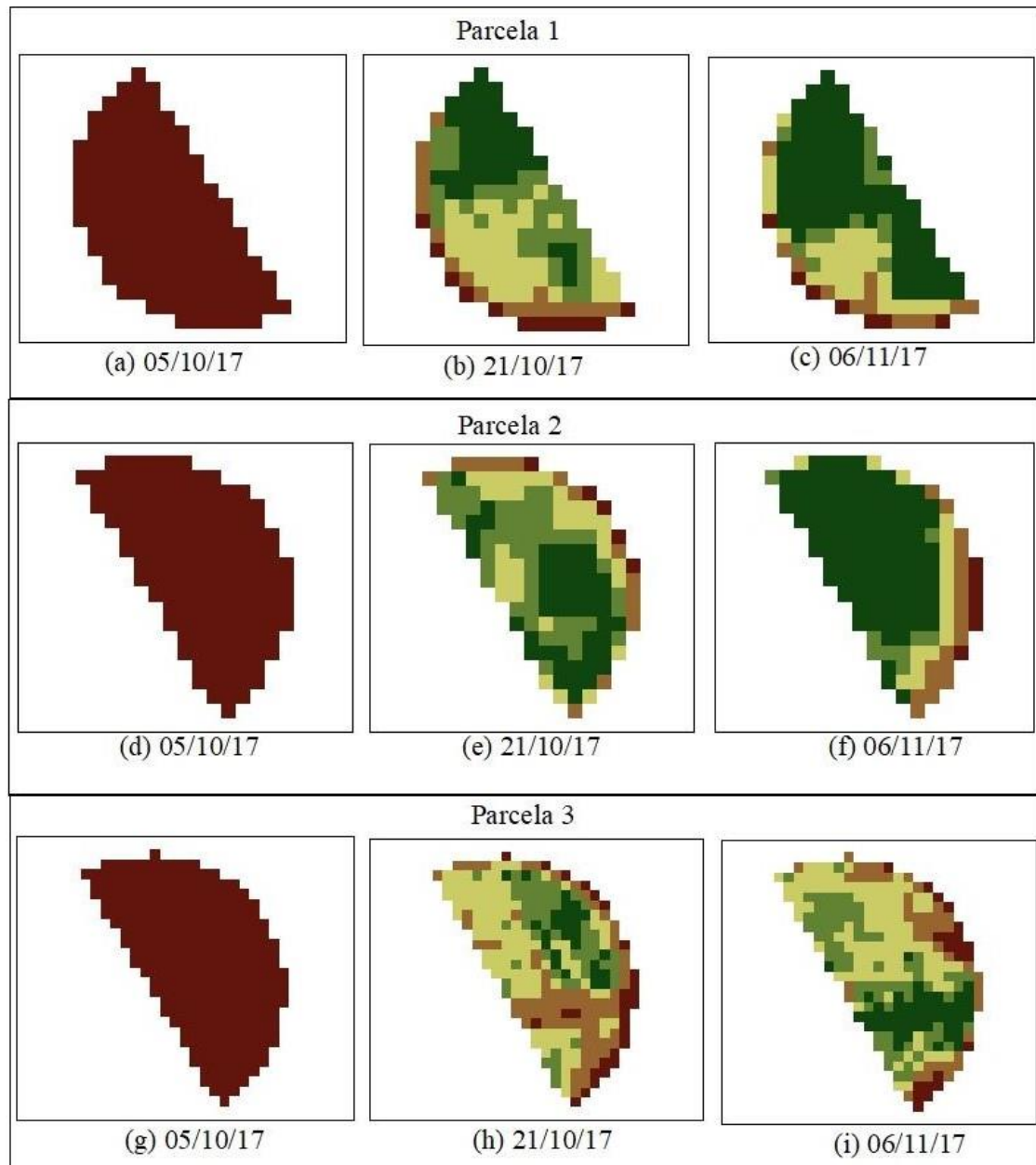


Figura 4: Distribuição espacial do NDVI, nas parcelas 1, 2 e 3 da cultura de soja da Fazenda Lote 54, nas datas de 05/10/2017, 21/10/2017 e 06/11/2017, utilizando imagem Landsat-8.

O coeficiente de determinação foi de 0,44, com tendência de superestimativa para os valores do METRIC. O coeficiente de correlação foi de 0,66, REQM e o EAM foram de 1,62 mm d⁻¹ e 1,14 mm d⁻¹, respectivamente. Este valor do coeficiente de correlação indica que a associação entre os dados é positiva, portanto cada incremento na evapotranspiração do METRIC, resulta em aumento na evapotranspiração da cultura.

Estes resultados se diferenciaram daqueles encontrados por Lima (2010), que utilizou imagens do sensor MODIS para aplicar o SEBAL nas sub-bacias do rio Preto e ribeirão Entre-Ribeiros no ano de 2007. Ao comparar os valores de evapotranspiração da cultura de feijão, em pivô central, com a evapotranspiração diária obtida pelo SEBAL, este autor obteve R² de 0,65 com tendência de subestimativa, coeficiente de correlação de 0,81, REQM de 0,93 mm d⁻¹ e EAM de 0,76 mm d⁻¹. Cabe salientar que o pivô central estava localizado fora da área de estudo.

O erro absoluto de evapotranspiração, para 36 dias após plantio, foi de 0,61 mm d⁻¹. Este valor se assemelha ao encontrado por Bezerra et al. (2014), em estudo do SEBAL na cultura de soja, no município de São Desidério – BA. Este autor obteve valores da evapotranspiração, variando de 5,6 mm d⁻¹ (42 dias após plantio) a 5,2 mm d⁻¹ (73 dias após plantio,) com erro absoluto de 0,4 mm d⁻¹ e 1,8 mm d⁻¹, respectivamente.

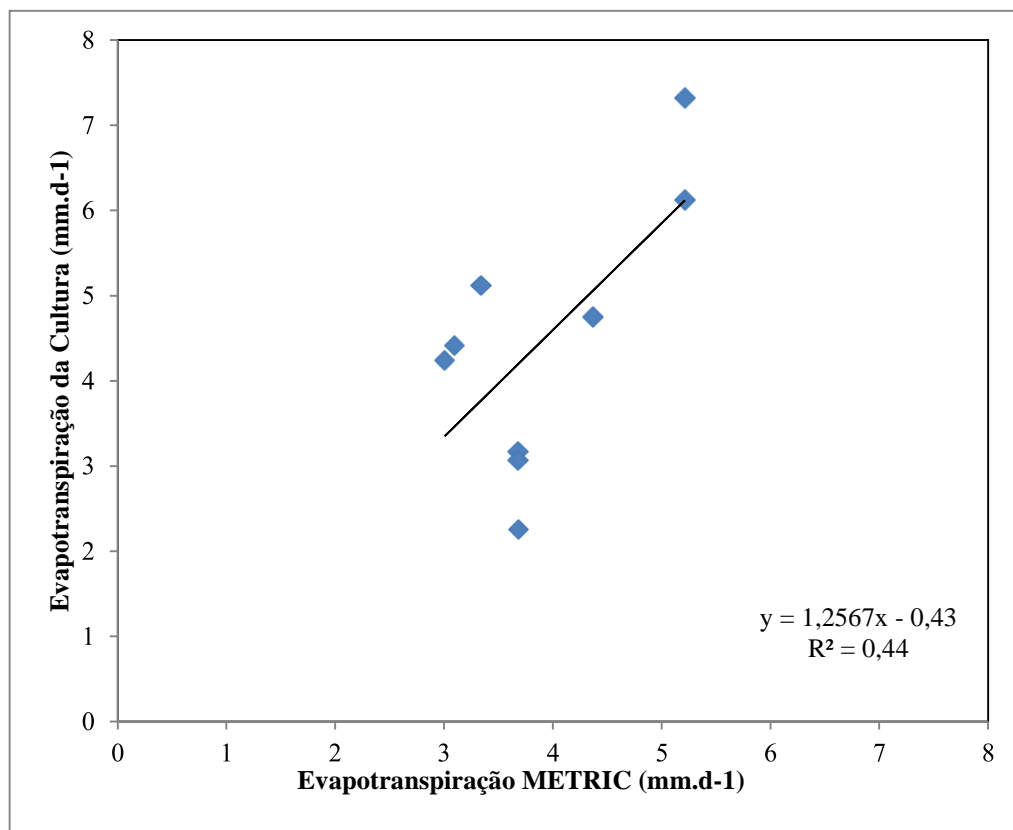


Figura 5: Comparativo da ETc determinada pelo método padrão (FAO-56), e evapotranspiração dada pelo METRIC, nas datas de 05/10/2017, 21/10/2017 e 06/11/2017, ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura de soja, utilizando imagem Landsat-8.

Embora os valores de evapotranspiração tenham sido superiores aos citados na literatura, vale ressaltar que o maior erro absoluto encontrado foi de 2,11 mm d⁻¹ com 18 dias após plantio. Considera-se que os valores foram satisfatórios, tendo em vista que no modelo METRIC, foram utilizados dados de estação meteorológica distante em 71,15 km da Fazenda estudada. Além disso, o modelo é uma alternativa de baixo custo na obtenção da evapotranspiração em larga escala para muitas regiões do país que não possuem ou têm deficiências de estações meteorológicas. Assim, como é observado na sub-bacia do ribeirão Entre-ribeiros.

Diante das constatações deste trabalho, recomenda-se que para as próximas pesquisas, o modelo METRIC seja aplicado em mais áreas irrigadas, onde seja possível avaliar seu desempenho na estimativa de evapotranspiração em todo o ciclo da cultura. Além disso, recomenda-se comparar o desempenho do modelo considerando diferentes distâncias das estações meteorológicas em relação a área de estudo.

4. CONCLUSÕES

Os valores da evapotranspiração diária, estimados por meio do METRIC apresentaram baixa correlação com os valores de evapotranspiração da cultura da soja, com tendência de superestimativa. A cobertura do solo e a distância da área de estudo à estação meteorológica adotada influenciaram nos resultados do modelo.

Os valores de R, EAM e REQM foram de 0,66, 1,62 mm d⁻¹ e 1,14 mm d⁻¹, respectivamente. Estes valores foram considerados satisfatórios, tendo em vista a distância de 71,15 km da estação meteorológica à Fazenda.

Denota-se o potencial de uso do modelo em regiões do país que não possuem ou possui estações meteorológicas deficitárias. Assim como, reconhece-se que os métodos de estimativas por meio de dados de sensoriamento remoto orbital possuem limitações de resolução espacial e temporal e são complementares aos métodos clássicos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Minas Gerais e ao Laboratório de Solos e Meio Ambiente, do Instituto de Geociências, pela infraestrutura e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 no desenvolvimento deste trabalho.

5. REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. **FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, v. 56, n. 97, p. e156, 1998.
- ALLEN, R. G.; TREZZA, R.; TASUMI, M. Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.139, n.1, p.55-73, 2006.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L.; BASTIAANSSEN, W.; KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C. W. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration, METRIC - Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, p. 395–406, 2007.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; HOWELL, T.A.; JENSEN, M.E. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 921-929, 2011.
- ARAÚJO, A. L. **Operacionalização do balanço de energia e evapotranspiração em escala regional com dados de sensores orbitais**. 2014. 101 f. Tese (Doutor em Meteorologia) - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.
- BEZERRA, A. R. G.; SILVA, M. A. V.; MATOS, R. E.; PINHEIRO, A. C. T.; MOSCON, E. S. Componentes do balanço de energia da soja estimada por meio de imagens via satélite. **Revista Agroambiente**, v. 8, n. 1, p. 59-65, 2014.
- BORGES, A.C.; MENDIONDO, E.M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.3, p. 293-300, 2007.
- FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. **Circular Técnica 48 - Embrapa Soja**, Londrina, 2007.
- FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stage of soybean development**. Iowa State University, Ames, IA. 11 p., 1977.
- FURLEY, P. A. The nature and diversity of neotropical savanna vegetation with particular reference to the Brazilian cerrados. **Global Ecology And Biogeography**. Vol. 8 (3-4), p.223-241, 1999.
- FUZZO, D. F. S. **Estimativa de evapotranspiração e produtividade da soja utilizando o método do triângulo simplificado**. 2015. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Agropecuário 2006**. Disponível em:<
<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/default.shtm>>. Acesso em 12/05/2018.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS –IGAM. **Resumo executivo: Plano diretor de recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu.** Comitê da Sub- Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu. Belo Horizonte: IGAM, 384 p., 2006.

IRMAK, A.; RATCLIFFE, I.; RANADE, P.; HUBBARD, K.G.; SINGH, R.K.; KAMBLE, B.; KJAERGAARD, J. Estimation of Land Surface Evapotranspiration with a Satellite Remote Sensing Procedure. **Great Plains Research**, v. 21, n. 1, p. 73-88, 2011.

LI, Z.; TANG, R.; WAN, Z.; BI, Y.; ZHOU, C.; TANG, B.; YAN, G.; ZHANG, X. A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data. **Sensors**, v. 9, p. 3801-3853, 2009.

LIMA, E. P. **Estimativa da Evapotranspiração e do Balanço Hídrico a partir de imagens de Satélite de Duas Sub-Bacias do Paracatu.** 2010. 185 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

MARTINS, A.P. **Uso de dados do sensor Modis/Agua e do algoritmo Sebal para estimativa da evapotranspiração real na bacia do Rio Paranaíba.** 2015. 151 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

MEDINA, J. L.; CAMACHO, E.; RECA, J.; LOPEZ, R.; ROLDAN, 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.

NICÁCIO, R.M. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco.** 2008. 320 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas.** Livraria e Editora Agropecuária. Guaíba, RS. 478p., 2002.

PROFETA, A. L. **Estimativa da evapotranspiração real em área de relevo acidentado utilizando o SEBAL.** 2017. 80f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUEZ, R. D. G.; NOVAES, L. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M.; TEIXEIRA, A. F. Impacto das vazões demandadas pela irrigação e pelos abastecimentos animal e humano, na bacia do Paracatu. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 2, p. 199–210, 2007.

RAMPAZO, N. A. M. **Modelagem da evapotranspiração da cana-de-açúcar por sensoriamento remoto.** 2017. 108 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

REZENDE, P. S. **Estudo ambiental no município de Paracatu, MG: quantificação, especiação e transporte de elementos tóxicos.** 139f. Tese (Doutorado em Ciências – Química) - Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

RODRIGUEZ, R. D. G. **Metodologia para Estimativa de Demandas e Disponibilidades Hídricas: estudo de caso da Bacia do Paracatu.** 2004. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

RODRIGUEZ, R. D. G.; PRUSKI, F. F.; NOVAES, L. F.; RAMOS, M. M.; SILVA, D. D.; TEIXEIRA, A.F. Estimativa da demanda de água nas áreas irrigadas da Bacia do Rio Paracatu. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 172–179, 2007.

ROSENDO, J. dos S. **Índices de Vegetação e Monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na Bacia do rio Araguari -MG - utilizando dados do sensor Modis.** 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geografia e Gestão do Território) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2005.

SILVA, B. B. **Estimativa da evapotranspiração real por meio de imagens do satélite landsat8.** 2015. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação "Stricto Sensu" em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2015.

SILVA, J. S. V.; GUIMARÃES, P.; CECIM, J. S. R. Mapeamento do uso e cobertura vegetal da bacia hidrográfica do rio Paracatu: comparação 2002 e 2013. In: VI Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 2016, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 826 -835, 2016.

SOUSA, W. S.; VIANA, J. F. S.; SILVA, R. R.; IRMÃO, R. A. Estimativa do balanço hídrico de uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema com o Modelo SWAT. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 03, n. 01, 146-154, 2018.

SOUZA, J. M. F. **Aplicação do algoritmo SAFER na obtenção da evapotranspiração atual das culturas em condições de cerrado.** 2016. 95 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

TASUMI, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery.** Ph.D. dissertation, University of Idaho, Moscow, 2003.

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

VASCONCELOS, V. V.; MARTINS JUNIOR, P. P.; HADAD, R. M. Hydrographic and hydrogeological basin of Entre-Ribeiros: probable recharge zone delimitation and environmental impact assessment. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 3, p. 560-572, 2012.

CONCLUSÃO GERAL

A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto para a estimativa da evapotranspiração e dos componentes do balanço de energia apresenta-se como alternativa, principalmente, para áreas onde os dados meteorológicos são limitantes, como verificado na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros.

A aplicação do METRIC com imagens Landsat 8 propiciou a estimativa e identificação da variabilidade espacial e temporal do saldo de radiação, fluxos de calor sensível, calor latente, calor no solo e evapotranspiração real diária na sub-bacia.

Quanto à comparação entre a evapotranspiração obtida pelo METRIC e os dados reais da cultura de soja, Os valores da evapotranspiração diária, estimados por meio do METRIC apresentaram baixa correlação com os valores de evapotranspiração da cultura do soja, com tendência de superestimativa. No entanto, denota-se o potencial de uso do modelo em regiões do país que não possuem ou possui estações meteorológicas esparsas.

O Landsat 8 se destaca por dispor de sensores termais e pela resolução espacial, no entanto possui limitações quanto a resolução temporal, uma vez que o padrão espaço-temporal da precipitação/irrigação varia a evapotranspiração em intervalos menores a 16 dias.

Tendo em vistas as limitações e desafios deste trabalho, ressalta-se que a correção de estabilidade atmosférica é uma das etapas mais trabalhosas e exige cautela na escolha dos pixels âncoras. Desta forma, a escolha incorreta pode incorrer em valores discrepantes da literatura.

Sugere-se que na execução de outros trabalhos seja realizada a comparação dos resultados do METRIC com dados reais de mais áreas irrigadas e em todo o ciclo de desenvolvimento da cultura, assim como, sejam utilizados dados de estações meteorológicas mais próximas à essas áreas.

Apêndice

APÊNDICE A: FÓRMULAS UTILIZADAS PARA O CÁLCULO DE DISTÂNCIA RELATIVA, DECLINAÇÃO SOLAR E ÂNGULO HORÁRIO

A distância inversa relativa entre a Terra e o Sol “ d_r ” (rad) é calculada por:

$$d_r = 1 + 0,003 \cos \frac{2\pi}{365} J \quad (1)$$

sendo "J" o dia juliano do ano (de 1 a 365 ou 366, para bissexto).

A declinação solar δ (radianos) é dada por:

$$\delta = 0,409 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39 \right) \quad (2)$$

O ângulo horário ao nascer do sol “ ω_s ”(radianos) é calculado por:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\phi) \tan(\delta)] \quad (3)$$

O valor de “ ϕ ” representa a latitude do local em radianos.

**APÊNDICE B: EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA HORÁRIA E DIÁRIA
PARA A ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE UNAÍ-MG**

Neste apêndice é apresentado o resultado da evapotranspiração de referência (ET_0) horária e diária, seguindo orientações do documento Crop Evapotranspiration número 56 da FAO (Allen et al., 1998).

Dados da estação de Unaí:

Hora	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pressão (hPa)			Vel.Vento	Radiação	Chuva
UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	(m/s)	(kJ/m ²)	(mm)
13	28,6	28,8	27,0	56	63	54	942,7	942,8	942,7	1,8	3016,6	0
CONVERSÃO DE UNIDADES												
Hora	Temperatura (K)			Pressão (kPa)			Radição					
UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	(MJ/m ²)					
	301,75	301,95	300,15	94,27	94,28	94,27	3,02					

Evapotranspiração de referência (ET_0) horária para o dia juliano 6:

CÁLCULO DO SALDO DE RADIAÇÃO (R_n)				FLUXO DE CALOR NO SOLO (G)			
Eq.	Variável	Valor	Unidade	Eq.	Variável	Valor	Unidade
Saldo de radiação de onda longa (R_{nl})				45	G	0,22	MJ/m ³ /h
23	d_r	1,03	rad	CORREÇÃO DA VEL. DO VENTO (u_2)			
24	δ	-0,39	rad	Eq.	Variável	Valor	Unidade
25	ω_s	1,69	rad	47	u_2	1,35	m/s
29	ω_1	-0,06	rad	CORREÇÃO DA VEL. DO VENTO (u_2)			
30	ω_2	0,20	rad	Eq.	Variável	Valor	Unidade
31	W	0,07	rad	13	Δ	0,23	kPa/°C
32	S_c	-0,09	h	CONSTANTE PISCOMETRICA (γ)			
33	b	-1,29		Eq.	Variável	Valor	Unidade
	Lz	45	W	8	λ	2,45	MJ/kg
	Lm	46,87	W		c_p	0,001	MJ/kg/°C
	t	12,5	h		ϵ	0,62	
	G_{sc}	0,08	MJ/m ² /min		γ	0,06	kPa/°C
28	R_a	5,03	MJ/m ² /h	CONSTANTE PISCOMETRICA (γ)			
37	R_{so}	3,83	MJ/m ² /h	Eq.	Variável	Valor	Unidade
	R_s	3,02	MJ/m ² /h	11	$e^{\circ}Thr$	3,91	kPa
	R_s/R_{so}	0,79		CORREÇÃO DA VEL. DO VENTO ($e^{\circ}Thr$)			
14	e_a	2,19	kPa	Eq.	Variável	Valor	Unidade
	Tmed	301,05	K	11	$e^{\circ}Thr$	3,91	kPa
	Stefan-B	$2,04E^{-10}$	MJ/m ² /h				

39	R_{nl}	0,16	MJ/m ² /h
Saldo de radiação de onda curta (R_{ns})			
38	albedo	0,23	
	R_{ns}	2,32	MJ/m ² /h
Saldo de radiação de radiação (R_n)			
40	R_n	2,16	MJ/m ² /h

ET _o / hora			
Eq.	Variável	Valor	Unidade
53	Eto	0,64	mm/h

Evapotranspiração de referência (ET_o) diária para o dia juliano 6:

CÁLCULO DO SALDO DE RADIAÇÃO (R_n)			
---	--	--	--

Saldo de radiação de onda longa (R_{nl})			
Eq.	Variável	Valor	Unidade
23	d_r	1,03	rad
24	δ	-0,39	rad
25	ω_s	1,69	rad
28	G_{sc}	0,08	MJ/m ² /min
	R_a	41,29	MJ/m ² /d
	R_s	30,65	MJ/m ² /d
37	R_{so}	31,49	MJ m ⁻² d ⁻¹
	R_s/R_{so}	0,97	

Saldo de radiação de onda curta (R_{ns})			
38	albedo	0,23	
	R_{ns}	23,60	MJ/m ² /d

11	Stefan-B	4,9E ⁻⁰⁹	MJ/m ² /d
	$e^\circ(T_{max})$	4,55	kPa
11	$e^\circ(T_{min})$	3,98	kPa
14	e_a	2,21	kPa
	e_s	4,26	kPa
	$e_s - e_a$	2,05	kPa
39	R_{nl}	5,27	MJ/m ² /dia

Saldo de radiação de radiação (R_n)			
40	R_n	18,33	MJ/m ² /d

FLUXO DE CALOR NO SOLO (G)			
Eq.	Variável	Valor	Unidade
42	G	0	MJ/m ³ /d

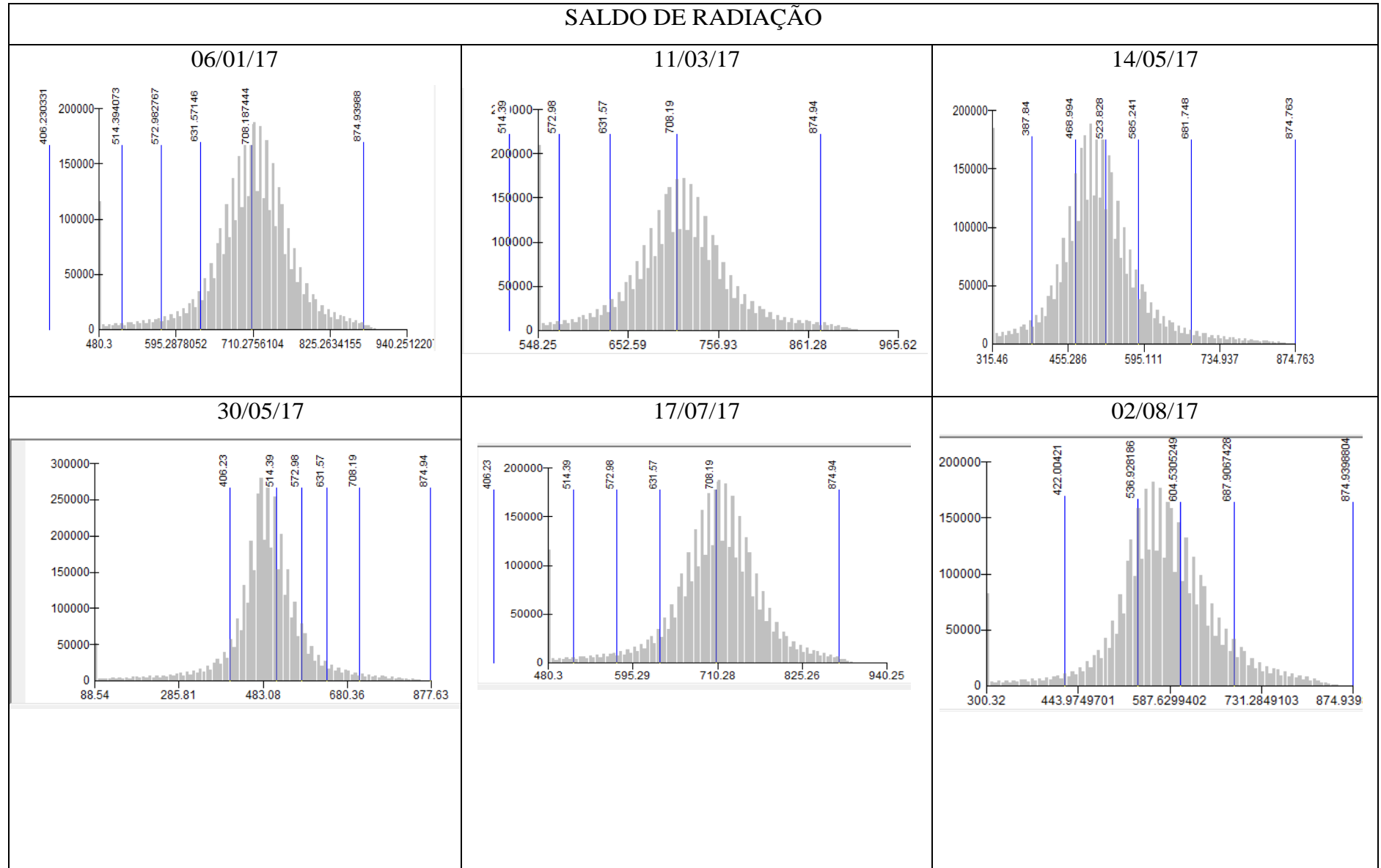
CORREÇÃO DA VEL. DO VENTO (u_2)			
Eq.	Variável	Valor	Unidade
47	u_2	1,12	m/s

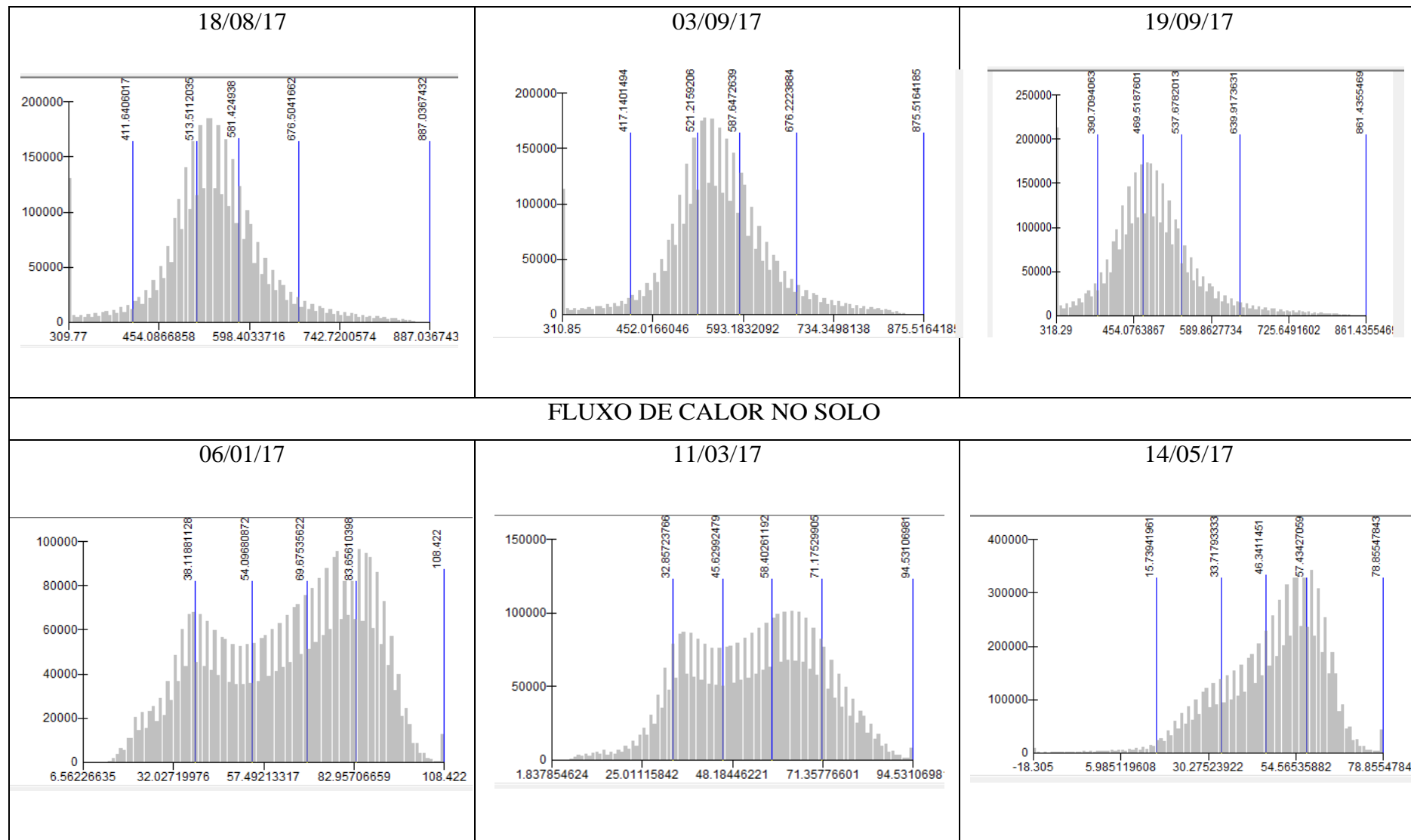
Δ			
Eq.	Variável	Valor	Unidade
13	T _{med}	30,05	°C
	Δ	0,24	kPa/°C

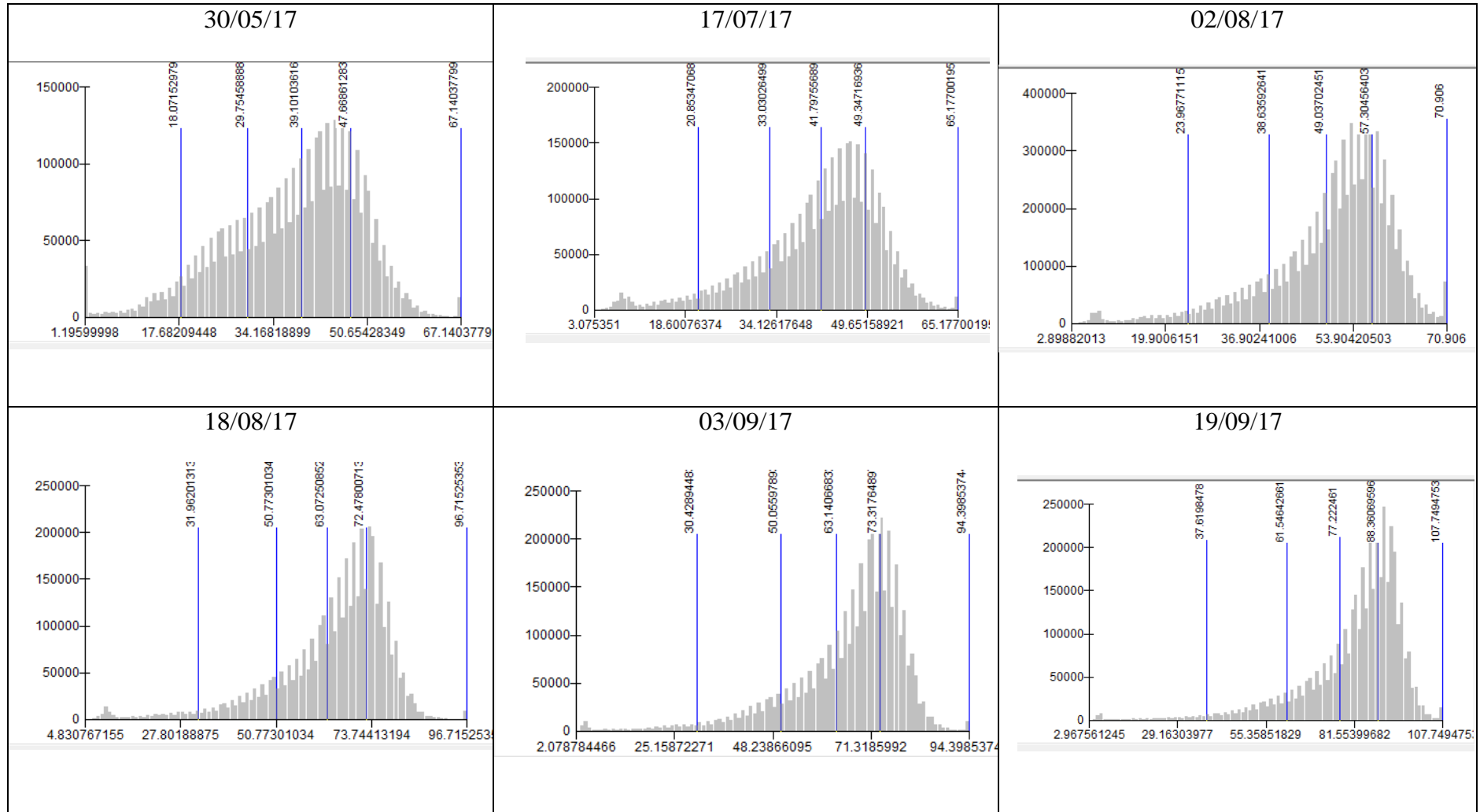
CONSTANTE PISCOMETRICA (γ)			
Eq.	Variável	Valor	Unidade
8	λ	2,45	MJ/kg
	c_p	0,001	MJ/kg/°C
	ϵ	0,62	
	γ	0,06	kPa/°C

ET _o / diária			
Eq.	Variável	Valor	Unidade
6	Eto	6,82	mm/h

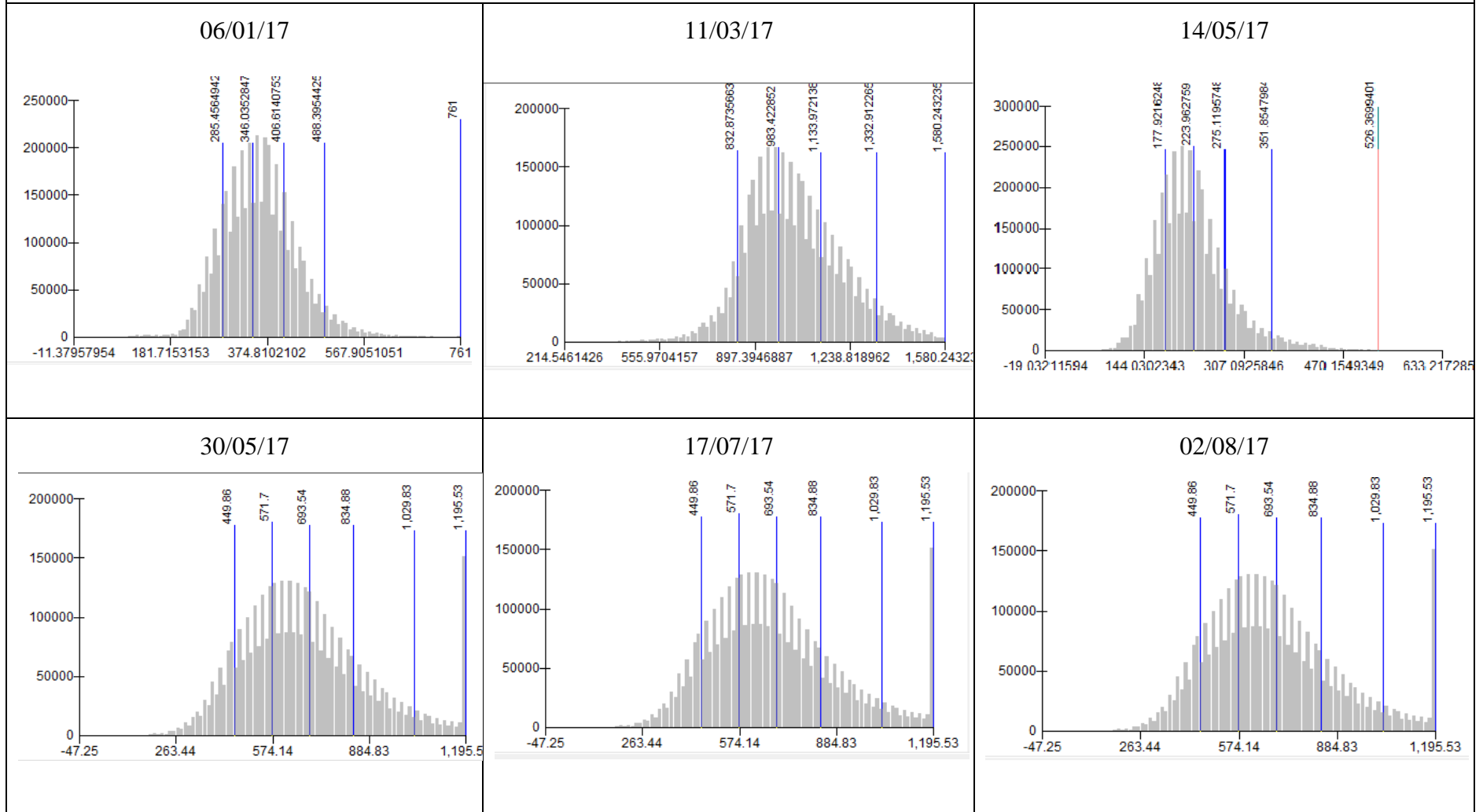
APÊNDICE C: HISTOGRAMAS DE SALDO DE RADIAÇÃO, FLUXO DE CALOR NO SOLO, FLUXO DE CALOR SENSÍVEL, FLUXO DE CALOR LATENTE E EVAPOTRANSPIRAÇÃO

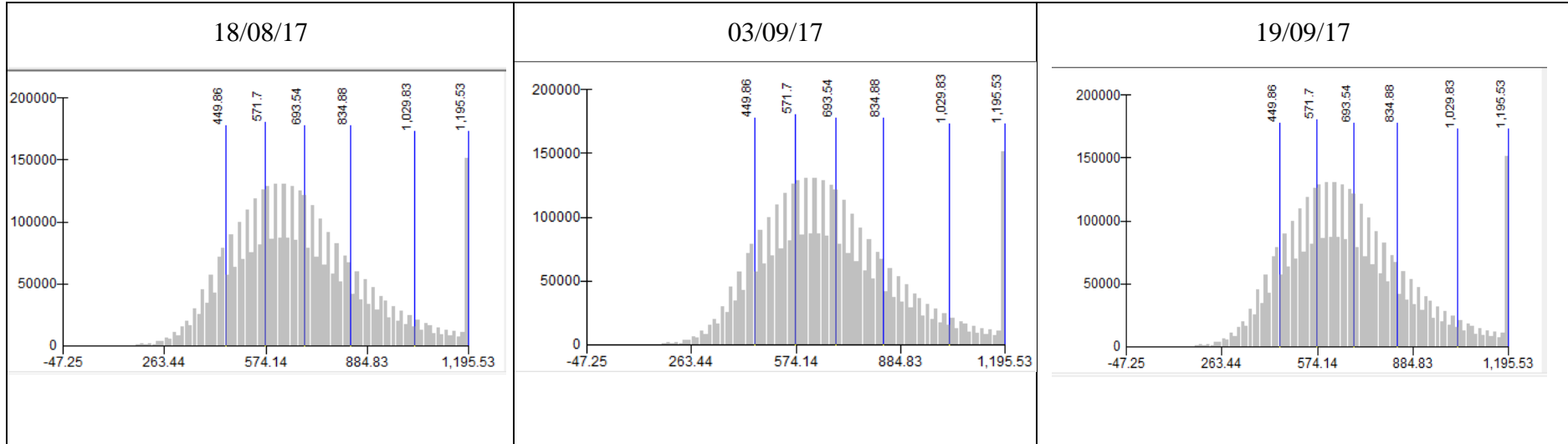




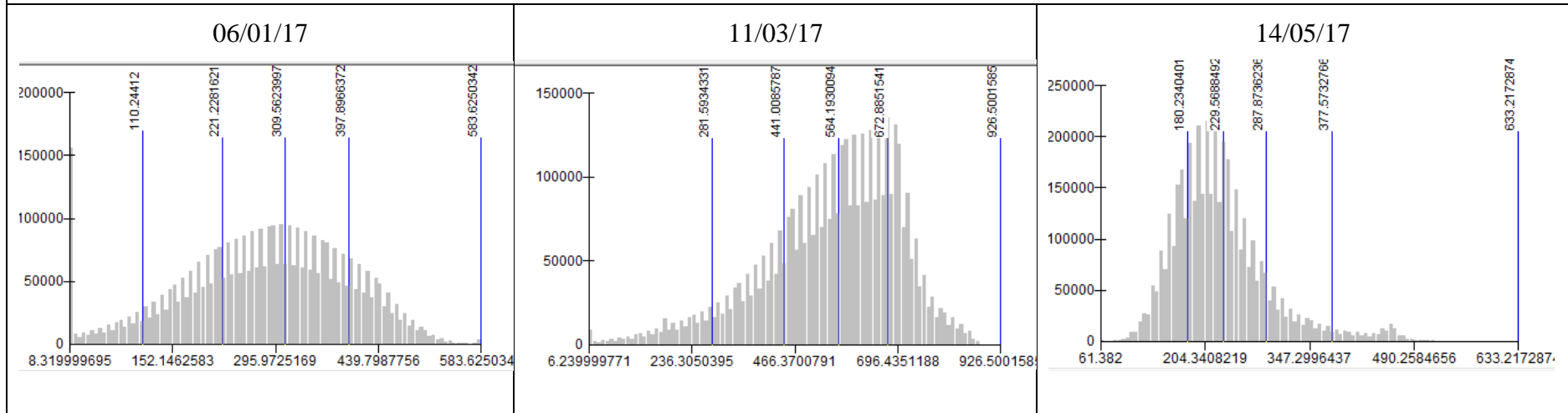


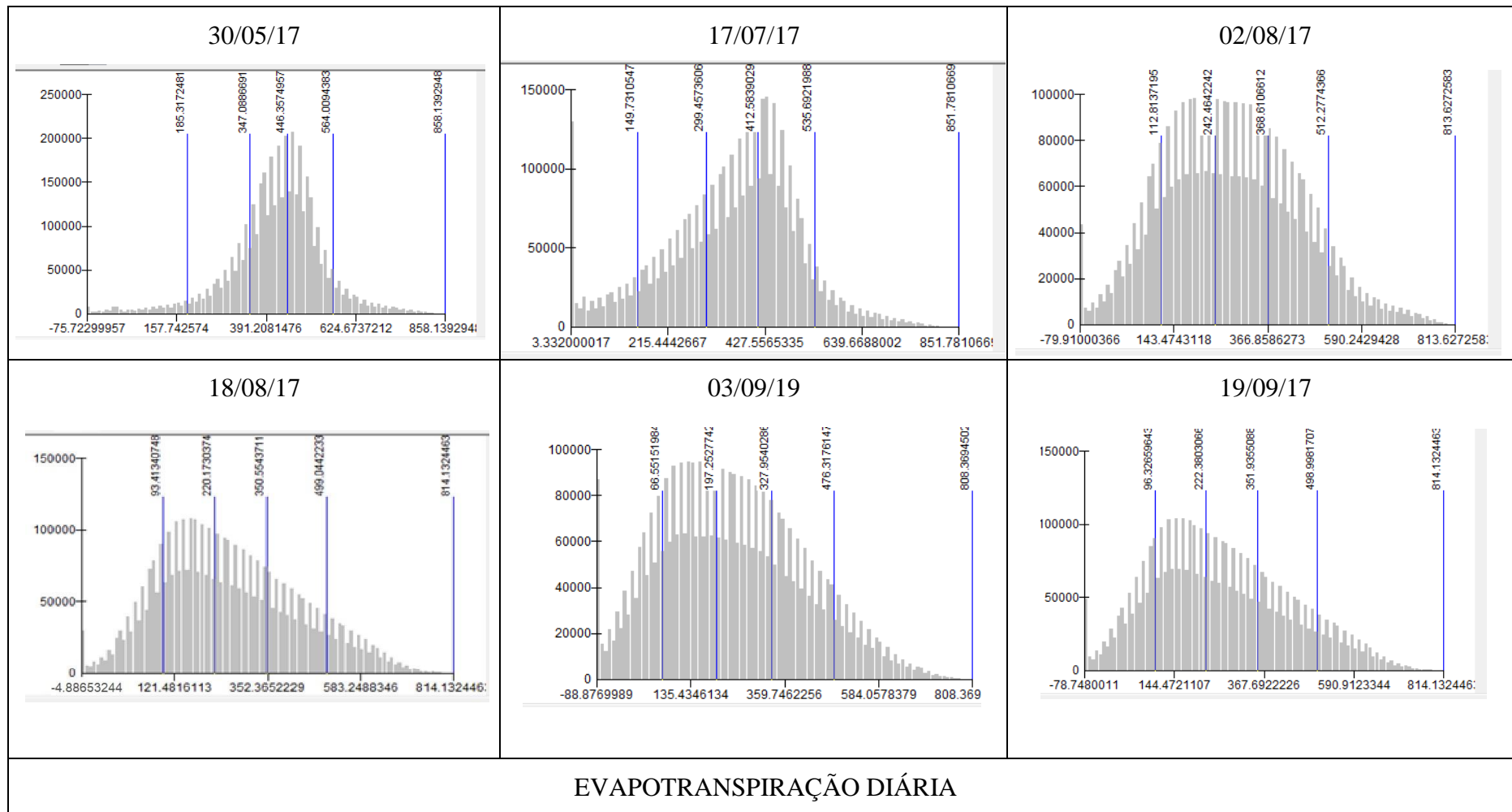
FLUXO DE CALOR SENSÍVEL

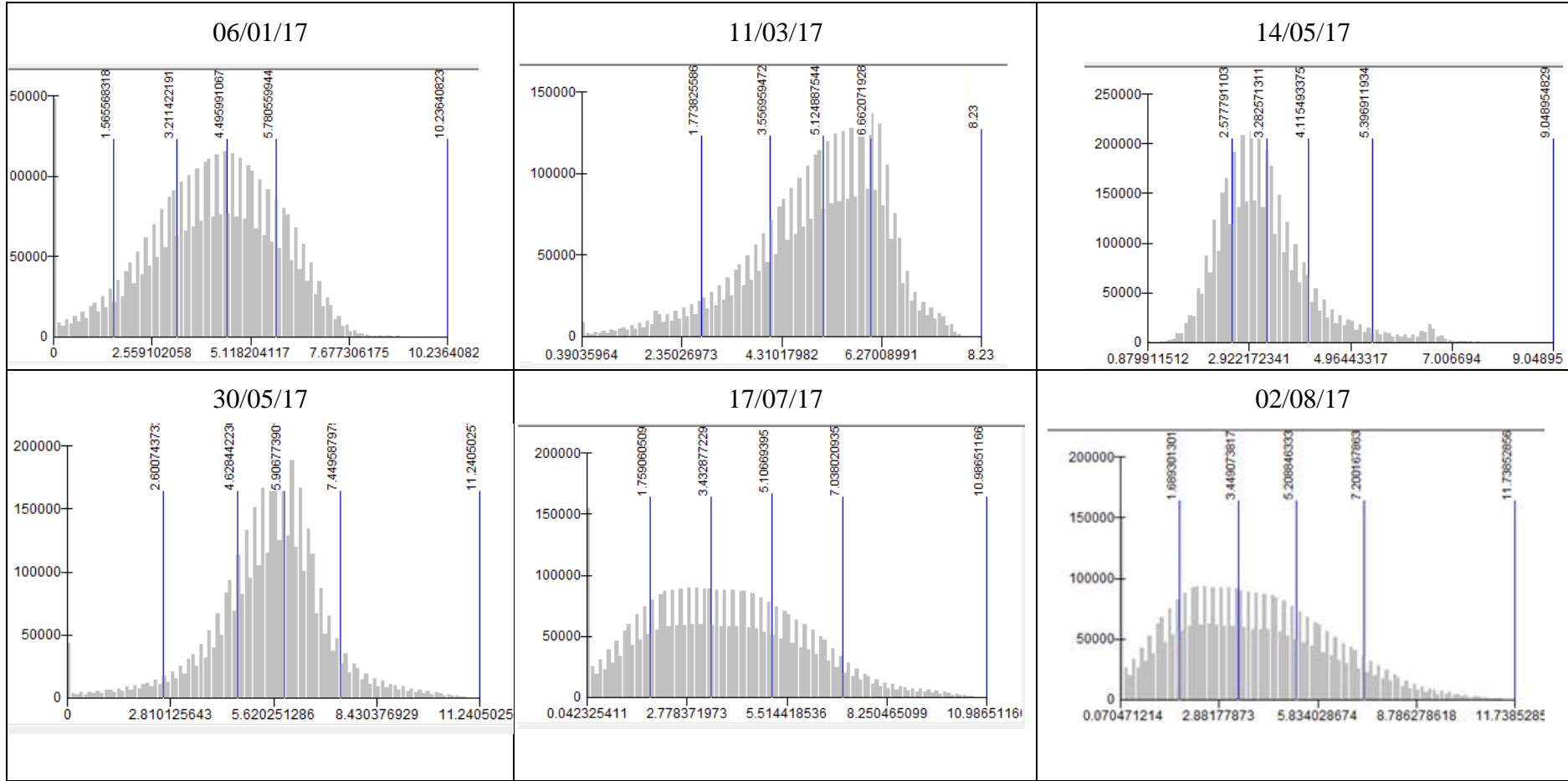


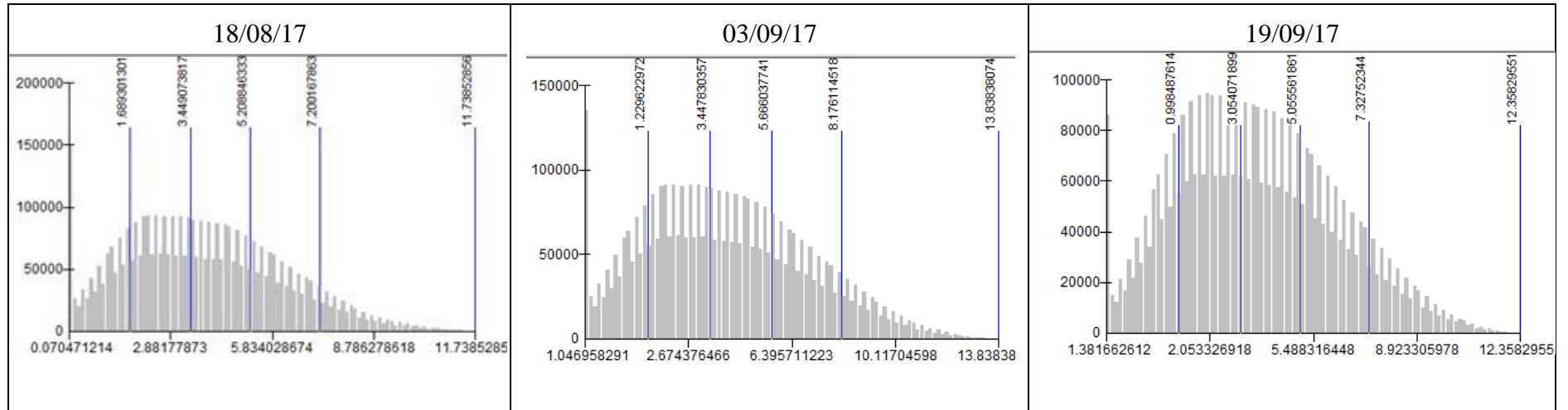


FLUXO DE CALOR LATENTE









APÊNDICE D: PROCESSO ITERATIVO PARA OBTENÇÃO DO FLUXO DE CALOR SENSÍVEL

Quadro 1 - Processo iterativo do dia 06/01/2017			
ITERAÇÃO	rah,q (Pixel Quente)	a	b
INÍCIO	55,782	-26,283	1,631
1 (corrigido)	23,633	-7,478	0,578
2 (corrigido)	20,648	-6,568	0,506
3 (corrigido)	25,486	-9,371	0,664
4 (corrigido)	26,817	-10,057	0,705
5 (corrigido)	25,772	-9,433	0,670
6 (corrigido)	25,391	-9,210	0,657
7 (corrigido)	25,576	-9,322	0,664
8 (corrigido)	25,676	-9,386	0,667

Quadro 2 - Processo iterativo do dia 11/03/2017			
ITERAÇÃO	rah,q (Pixel Quente)	a	b
INÍCIO	36,068	-38,474	1,882
1 (corrigido)	4,000	-4,267	0,209
2 (corrigido)	15,626	-16,668	0,815
3 (corrigido)	7,971	-8,502	0,416
4 (corrigido)	11,970	-12,768	0,625
5 (corrigido)	9,627	-10,269	0,502
6 (corrigido)	10,919	-11,647	0,570
7 (corrigido)	10,175	-10,854	0,531
8 (corrigido)	10,490	-11,297	0,543
9 (corrigido)	10,450	-11,241	0,540
10 (corrigido)	10,495	-11,295	0,548

Quadro 3 - Processo iterativo do dia 14/05/2017			
ITERAÇÃO	rah,q (Pixel Quente)	a	b
INÍCIO	36,832	-29,020	1,270
1 (corrigido)	5,298	-4,170	0,180
2 (corrigido)	5,458	-4,300	0,190
3 (corrigido)	5,193	-4,090	0,180
4 (corrigido)	5,237	-4,127	0,181
5 (corrigido)	5,340	-4,210	0,180
6 (corrigido)	5,566	-4,390	0,190
7 (corrigido)	5,420	-4,271	0,187
8 (corrigido)	5,118	-4,030	0,180
9 (corrigido)	4,566	-3,600	0,160
10 (corrigido)	5,128	-4,040	0,180
11 (corrigido)	5,105	-4,020	0,180
12 (corrigido)	5,055	-3,980	0,170

Quadro 4 - Processo iterativo do dia 14/05/2017			
ITERAÇÃO	rah,q (Pixel Quente)	a	b
INÍCIO	36,857	-45,360	2,170
1 (corrigido)	5,117	-6,298	0,301
2 (corrigido)	5,111	-6,290	0,301
3 (corrigido)	5,113	-6,292	0,301
4 (corrigido)	5,118	-6,298	0,301
5 (corrigido)	5,132	-6,316	0,302
6 (corrigido)	5,124	-6,307	0,302
7 (corrigido)	5,103	-6,281	0,301
8 (corrigido)	5,092	-6,266	0,300
9 (corrigido)	5,106	-6,283	0,301

Quadro 5 - Processo iterativo do dia 17/07/2017			
ITERAÇÃO	rah,q (Pixel Quente)	A	b
INÍCIO	37.,08	-37,974	1,872
1 (corrigido)	5,204	-5,325	0,263
2 (corrigido)	5,179	-5,300	0,261
3 (corrigido)	5,218	-5,340	0,263

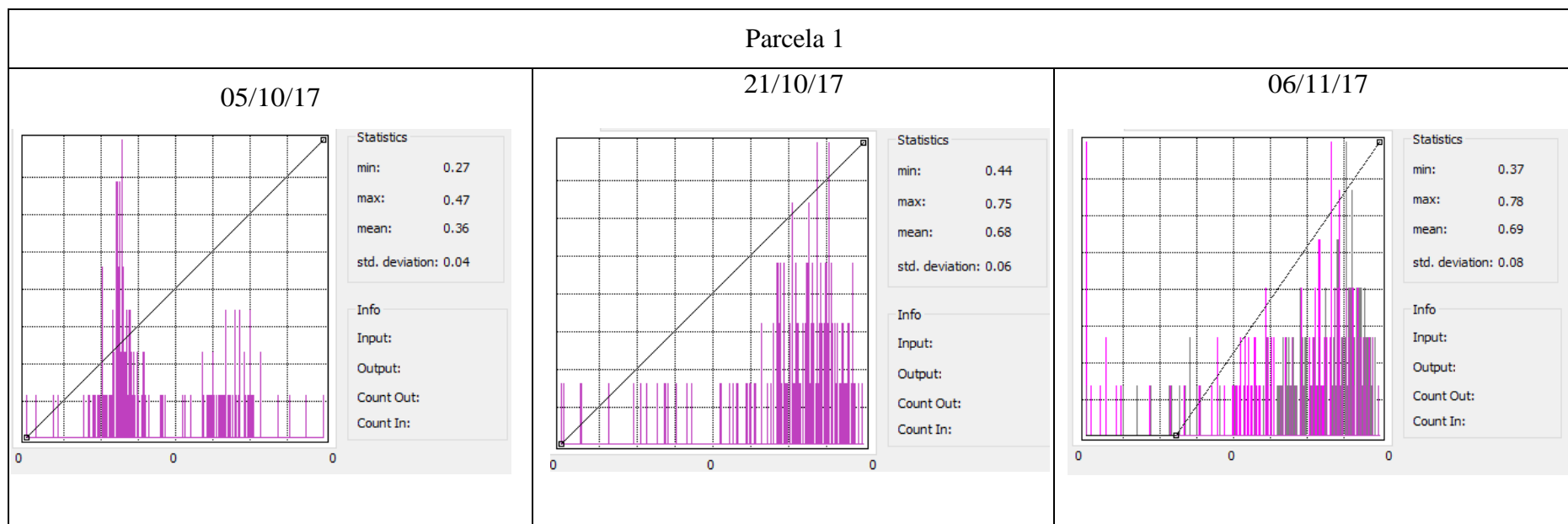
Quadro 6 - Processo iterativo do dia 02/08/2017			
ITERAÇÃO	rah,q (Pixel Quente)	a	b
INÍCIO	25,049	-20,046	0,976
1 (corrigido)	6,451	-5,162	0,251
2 (corrigido)	16,797	-13,442	0,654
3 (corrigido)	11,575	-9,263	0,451
4 (corrigido)	12,334	-9,870	0,481
5 (corrigido)	11,088	-8,873	0,432
6 (corrigido)	11,736	-9,392	0,457
7 (corrigido)	11,409	-9,130	0,445
8 (corrigido)	11,553	-9,245	0,450
9 (corrigido)	11,498	-9,201	0,448

ITERAÇÃO	rah,q (Pixel Quente)	a	b
INÍCIO	37,126	-29,341	1,336
1 (corrigido)	4,853	-3,835	0,175
2 (corrigido)	15,836	-12,516	0,570
3 (corrigido)	14,303	-11,304	0,515
4 (corrigido)	14,534	-11,486	0,523
5 (corrigido)	9,692	-7,660	0,349
6 (corrigido)	12,183	-9,628	0,438
7 (corrigido)	10,871	-8,592	0,391
8 (corrigido)	11,540	-9,121	0,415
9 (corrigido)	11,354	-8,974	0,408
10 (corrigido)	11,298	-8,929	0,406
11 (corrigido)	11,326	-8,951	0,407

ITERAÇÃO	rah,q (Pixel Quente)	a	b
INÍCIO	37,126	-31,654	1,474
1 (corrigido)	4,704	-4,011	0,187
2 (corrigido)	15,413	-13,142	0,612
3 (corrigido)	8,759	-7,468	0,348
4 (corrigido)	12,108	-10,324	0,481
5 (corrigido)	10,252	-8,741	0,407
6 (corrigido)	11,231	-9,576	0,446
7 (corrigido)	10,700	-9,123	0,425
8 (corrigido)	10,979	-9,361	0,436
9 (corrigido)	10,832	-9,236	0,430

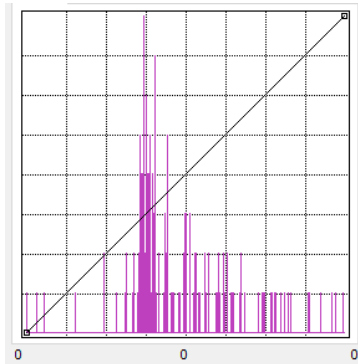
ITERAÇÃO	rah,q (Pixel Quente)	a	b
INÍCIO	37,190	-32,944	1,331
1 (corrigido)	5,786	-5,082	0,205
2 (corrigido)	14,753	-13,069	0,528
3 (corrigido)	9,445	-8,367	0,338
4 (corrigido)	12,110	-10,728	0,433
5 (corrigido)	10,683	-9,463	0,382
6 (corrigido)	11,419	-10,115	0,409
7 (corrigido)	11,007	-9,750	0,394
8 (corrigido)	11,230	-9,948	0,402
9 (corrigido)	11,113	-9,844	0,398

APÊNDICE E: HISTOGRAMA DA DISTRIBUIÇÃO DE NDVI PARA AS PARCELAS DA CULTURA DE SOJA



Parcela 2

05/10/17



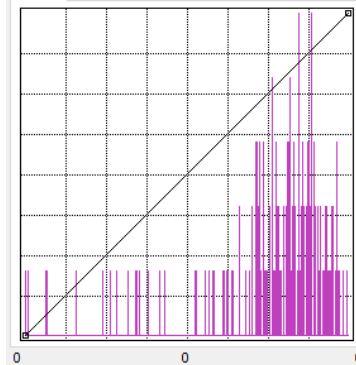
Statistics

min: 0.26
max: 0.45
mean: 0.35
std. deviation: 0.03

Info

Input:
Output:
Count Out:
Count In:

21/10/17



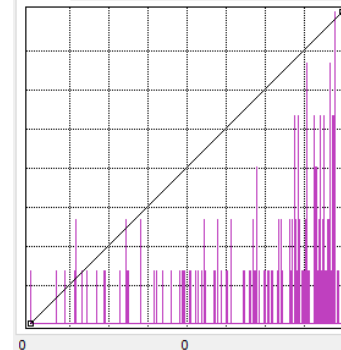
Statistics

min: 0.44
max: 0.75
mean: 0.68
std. deviation: 0.06

Info

Input:
Output:
Count Out:
Count In:

06/11/17



Statistics

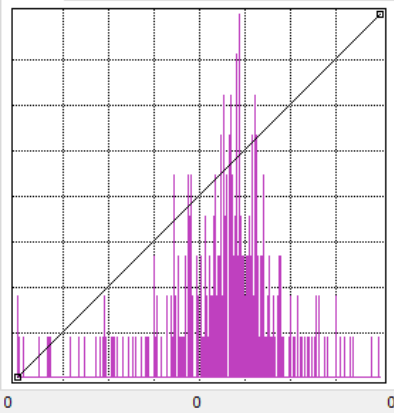
min: 0.44
max: 0.81
mean: 0.72
std. deviation: 0.09

Info

Input:
Output:
Count Out:
Count In:

Parcela 3

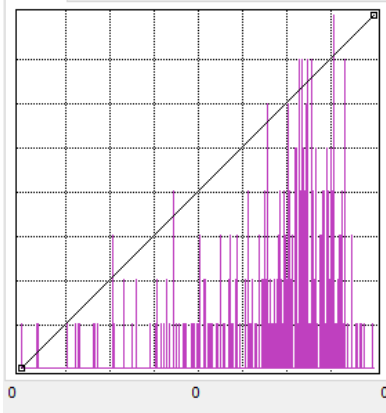
05/10/17



Statistics
 min: 0.25
 max: 0.37
 mean: 0.32
 std. deviation: 0.02

Info
 Input:
 Output:
 Count Out:
 Count In:

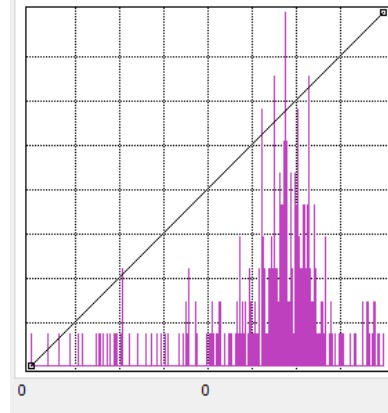
21/10/17



Statistics
 min: 0.31
 max: 0.75
 mean: 0.63
 std. deviation: 0.08

Info
 Input:
 Output:
 Count Out:
 Count In:

06/11/17



Statistics
 min: 0.36
 max: 0.79
 mean: 0.65
 std. deviation: 0.08

Info
 Input:
 Output:
 Count Out:
 Count In: