

LAURO PESSOA MAIA JÚNIOR

**EMPREGO DO *SURFACE ENERGY BALANCE ALGORITHM FOR LAND* NA
ANÁLISE DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS NO USO E COBERTURA DA TERRA
SOBRE A VARIABILIDADE DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SOROCABUÇU (IBIÚNA - SP)**

Sorocaba
2020

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

*ciências
ambientais*

LAURO PESSOA MAIA JÚNIOR

**EMPREGO DO *SURFACE ENERGY BALANCE ALGORITHM FOR LAND* NA
ANÁLISE DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS NO USO E COBERTURA DA TERRA
SOBRE A VARIABILIDADE DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SOROCABUÇU (IBIÚNA - SP)**

Tese apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais, pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, na Área de Concentração Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Wagner Lourenço.

Sorocaba

2020

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

*ciências
ambientais*



M217e

Maia Júnior, Lauro Pessoa

Emprego do *Surface Energy Balance Algorithm for Land* na Análise dos Impactos das Mudanças no Uso e Cobertura da Terra Sobre a Variabilidade de Parâmetros Biofísicos na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabaçu (Ibiúna - SP) / Lauro Pessoa Maia Júnior. -- Sorocaba, 2020

107 f. : il., tabs., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: Roberto Wagner Lourenço

1. Modelo SEBAL. 2. Albedo da superfície. 3. Saldo de radiação na superfície. 4. Fluxo de calor no solo. 5. Temperatura da superfície. I. Título.

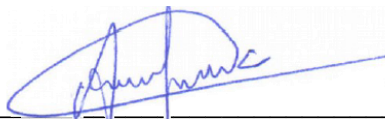
LAURO PESSOA MAIA JÚNIOR

**EMPREGO DO SURFACE ENERGY BALANCE ALGORITHM FOR LAND NA
ANÁLISE DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS NO USO E COBERTURA DA TERRA
SOBRE A VARIABILIDADE DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SOROCABUÇU (IBIÚNA - SP)**

Tese apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais, pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, na Área de Concentração Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental.

Data de aprovação: 16 de outubro de 2020.

Membros componentes da banca examinadora:



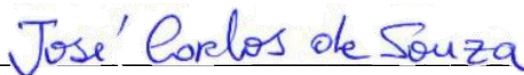
Prof. Dr. Roberto Wagner Lourenço (orientador)

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP)



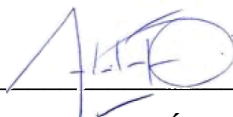
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP)



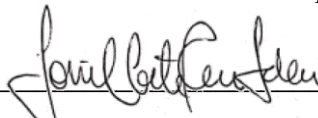
Prof. Dr. José Carlos de Souza

Universidade Estadual de Goiás (UEG)



Prof. Dr. Admilson Írio Ribeiro

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP)



Prof. Dr. Jomil Costa Abreu Sales

Universidade de Sorocaba (UNISO)

RESUMO

As mudanças climáticas derivam não apenas do aumento na concentração dos gases do efeito estufa na atmosfera, mas, também, das modificações nas características biofísicas da superfície terrestre. Esta pesquisa circunscreve-se à Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabaçu (Ibiúna - SP), inserida no interior da Área de Proteção Ambiental da represa de Itupararanga, espaço que abriga o maior remanescente vegetal da Bacia do Rio Sorocaba e Médio Tietê. Pretende demonstrar a relação entre as alterações no uso/cobertura da terra e a variabilidade espacial, temporal e estatística dos parâmetros biofísicos *albedo*, *saldo de radiação*, *fluxo de calor no solo* e *temperatura da superfície*, entre os anos de 2008 e 2018. A hipótese é que esses parâmetros possuem potencialidades e limitações distintas, no âmbito dos estudos que visam identificar as mudanças ocorridas no uso/cobertura da terra e os impactos climáticos derivados. Inicialmente, o trabalho detalha o trânsito de radiação e calor no sistema Terra-atmosfera, ressaltando o papel do Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento na análise dos fluxos de energia na superfície, além de destacar as características da modelagem desses fenômenos através do algoritmo SEBAL. Em seguida, apresenta os dados usados como insumo, referentes a imagens dos satélites Landsat 5 e 8, obtidas na plataforma *Earth Explorer*; bem como a registros de temperatura do ar e precipitação, oriundos de estações mantidas pelos órgãos CIIAGRO e DAEE. O programa ArcGIS Desktop 10.6 foi empregado tanto na implementação da série de equações que compõem o SEBAL, quanto na classificação das categorias de uso e cobertura da terra. A variabilidade espaço-temporal dos parâmetros biofísicos foi avaliada em função das mudanças nas dimensões dessas categorias, cotejando-as com o comportamento das variáveis estatísticas e histogramas das imagens de cada parâmetro. No caso do albedo, foi possível realizar a operação de subtração “pixel a pixel” entre imagens de diferentes datas. Os resultados indicaram que a ligeira retração da cobertura vegetal, decorrente da expansão das pastagens e áreas urbanas, implicou na elevação dos coeficientes de variação médios dos parâmetros biofísicos, assim como no incremento da dispersão e assimetria dos histogramas de suas imagens. O albedo mostrou-se como o parâmetro mais eficiente na identificação dos impactos climáticos associados às modificações no uso e cobertura, em virtude de ser inerte às oscilações na temperatura do ar. Os dados de fluxo de calor no solo demonstraram incorporar a maior quantidade de informação a respeito das características da superfície, o que foi atestado pelo fato de ter sido o único parâmetro a apresentar histogramas bimodais. Todavia, os valores de fluxo de calor no solo são afetados pelas flutuações na temperatura do ar, tal como, também, os valores de saldo de radiação e temperatura da superfície. As imagens de temperatura da superfície possuem um empecilho adicional, relativo à sua menor resolução espacial original, responsável por restringir a detecção dos valores extremos desse parâmetro. De todo modo, mesmo que com diferentes graus de contribuição, todos os parâmetros biofísicos estudados provaram-se úteis como indicadores dos impactos climáticos derivados das alterações ocorridas no uso e cobertura da terra.

Palavras-chave: Modelo SEBAL. Albedo da superfície. Saldo de radiação na superfície. Fluxo de calor no solo. Temperatura da superfície.

ABSTRACT

Climate changes not only derives from an increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere, but also emerges from modifications in the biophysical characteristics of the Earth's surface. This study encompasses the Sorocabuçu River Basin (Ibiúna - SP), located inside the Environmental Protection Area of the Itupararanga dam, an area which is home to the largest vegetal remnant of the Sorocaba and the Middle Tietê River Basin. It aims to demonstrate the relationship between alterations in land use/cover and the spatial, temporal and statistical variability of biophysical parameters *albedo*, *net radiation*, *soil heat flux* and *surface temperature*, between the years 2008 and 2018. Its hypothesis is that these parameters have distinct potentials and limitations, within the scope of studies that aim to identify the changes occurred in land use/cover and the resulting climate impacts. Initially, it details the transit of radiation and heat in the Earth-atmosphere system, emphasizing the role of Remote Sensing and Geoprocessing in the analysis of energy fluxes on the surface, as well as highlighting the characteristics of the modeling of these phenomena through the SEBAL algorithm. Afterwards, it presents the data used as input, referring to images of the Landsat 5 and 8 satellites, obtained in the Earth Explorer platform; and to records of air temperature and precipitation, coming from stations maintained by CIIAGRO and DAEE. The ArcGIS Desktop 10.6 program was used both in the implementation of the series of equations which comprise SEBAL, and in the classification of land use and coverage categories. The spatiotemporal variability of the biophysical parameters was evaluated according to the changes in the dimensions of these categories, comparing them with the behavior of the statistical variables and histograms of the images of each parameter. Regarding the albedo, it was possible to perform the “pixel-by-pixel” subtraction operation between images of different dates. The results indicated that the slight retraction of the vegetation cover, caused by the expansion of pasture and urban areas, led to the rise of the average coefficients of variation of the biophysical parameters, as well as to the increase of the dispersion and asymmetry of the histograms of its images. Albedo proved to be the most efficient parameter when it comes to the identification of climate impacts associated with changes in use and coverage, due to its being inert to fluctuations in air temperature. The data related to the soil heat flux demonstrated having the largest amount of information regarding the characteristics of the surface, which was attested by the fact that it was the only parameter to present bimodal histograms. Nonetheless, the values of soil heat flux are affected by fluctuations in air temperature, as well as the values of the net radiation and surface temperature. The surface temperature images pose an additional drawback, due to their lower original spatial resolution, responsible for restricting the detection of the extreme values of this parameter. Despite that, even with different degrees of contribution, all the biophysical parameters analyzed proved to be useful as indicators of climate impacts derived from changes in land use and coverage.

Keywords: SEBAL model. Surface albedo. Net radiation at the surface. Soil heat flux. Surface temperature.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Balanço de radiação anual médio (%) do sistema Terra-atmosfera entre 2000 e 2010	25
Figura 2	Principais módulos componentes do SEBAL	32
Figura 3	Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu	34
Figura 4	Precipitação mensal média na estação DAEE E4-047 (novembro de 1939 a agosto de 2018)	35
Figura 5	Estimativa das médias mensais de temperatura do ar no município de Ibiúna (1950 a 1990)	36
Figura 6	Unidades litoestratigráficas da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu	37
Figura 7	Hipsometria da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu	38
Figura 8	Tipos de solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu	39
Figura 9	Zoneamento da APA Itupararanga na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu	41
Figura 10	Localização das estações provedoras de dados meteorológicos	47
Figura 11	Sequência de implementação das equações do modelo SEBAL com o uso de imagens do satélite Landsat 5	55
Figura 12	Sequência de implementação das equações do modelo SEBAL com o uso de imagens do satélite Landsat 8	58
Figura 13	Distribuição espacial das classes de uso e cobertura da terra na BHRS em 18/08/2008 e 30/08/2018	61
Figura 14	Variação espaço-temporal dos valores de albedo da superfície na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018	63
Figura 15	Histogramas das imagens de albedo da superfície (%) na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018	65
Figura 16	Variação espaço-temporal dos valores de saldo de radiação na superfície na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018	68
Figura 17	Histogramas das imagens de saldo de radiação na superfície (W/m^2) na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018	70
Figura 18	Variação espaço-temporal dos valores de temperatura da superfície na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018	73

Figura 19	Histogramas das imagens de temperatura da superfície (°C) na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018	75
Figura 20	Variação espaço-temporal dos valores de fluxo de calor no solo na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018	78
Figura 21	Histogramas das imagens de fluxo de calor no solo (W/m ²) na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018	79
Figura 22	Diferença entre os valores de albedo da superfície na BHRS em 18/08/2008 e 14/08/2018	82
Figura 23	Histograma da imagem de diferença entre os valores de albedo da superfície na BHRS em 18/08/2008 e 14/08/2018 (pontos percentuais)	83
Figura 24	Variações de albedo da superfície acima de +5 p. p. no interior das categorias do zoneamento da APA Itupararanga, no âmbito da BHRS, entre 18/08/2008 e 14/08/2018	84
Figura 25	Mosaicos entre as imagens dos parâmetros biofísicos na BHRS em 17/07/2008 (porção maior) e 18/08/2008 (porção menor)	105

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Descrição dos tipos de solo presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu	40
Quadro 2	Identificação das imagens orbitais empregadas no SEBAL	43
Quadro 3	Descrição das bandas espectrais das imagens orbitais empregadas no SEBAL	43
Quadro 4	Transcrição das equações 7 a 25 para a ferramenta <i>Raster Calculator</i>	54
Quadro 5	Transcrição das equações 26 e 27 para a ferramenta <i>Raster Calculator</i>	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Descrição das estações meteorológicas provedoras dos dados de temperatura do ar	44
Tabela 2	Interpolação dos valores de temperatura do ar para os horários de captura das imagens	45
Tabela 3	Descrição das estações pluviométricas próximas à BHRS	45
Tabela 4	Acumulados pluviométricos diários durante os sete dias anteriores às datas de captura de cada imagem	46
Tabela 5	Valores de $ESUN_{\lambda}$ e ω_{λ} para as bandas espectrais do satélite Landsat 5	50
Tabela 6	Valores de ω_{λ} para as bandas espectrais do satélite Landsat 8	57
Tabela 7	Áreas aproximadas ocupadas pelas classes de uso e cobertura da terra em 18/08/2008 e 30/08/2018	60
Tabela 8	Variabilidade estatística dos valores de albedo da superfície na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018	64
Tabela 9	Valores médios de albedo da superfície (%) nas classes de uso e cobertura da BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018	66
Tabela 10	Variabilidade estatística dos valores de saldo de radiação na superfície na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018	69
Tabela 11	Valores médios de saldo de radiação na superfície (W/m^2) nas classes de uso e cobertura da BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018	71
Tabela 12	Variabilidade estatística dos valores de temperatura da superfície na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018	72
Tabela 13	Valores médios de temperatura da superfície ($^{\circ}C$) nas classes de uso e cobertura da BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018	76
Tabela 14	Variabilidade estatística dos valores de fluxo de calor no solo na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018	77
Tabela 15	Valores médios de fluxo de calor no solo (W/m^2) nas classes de uso e cobertura da BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018	80
Tabela 16	Comparação entre os valores das variáveis estatísticas dos parâmetros biofísicos em 18/08/08, considerando as imagens integrais e as desprovidas da extremidade sul da BHRS	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA	Área de Proteção Ambiental.
BHRS	Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabaçu
CIIAGRO	Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas.
CPRM	Serviço Geológico do Brasil.
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo.
FF	Fundação Florestal.
GEE	Gases do Efeito Estufa.
IAC	Instituto Agrônômico de Campinas.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IF	Instituto Florestal.
IGC	Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo.
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change.</i>
LAI	<i>Leaf Area Index.</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação.
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration.</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index.</i>
OLI	<i>Operational Land Imager.</i>
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.
RGB	Canais de cor vermelha (<i>red</i>), verde (<i>green</i>) e azul (<i>blue</i>).
SAVI	<i>Soil Adjusted Vegetation Index.</i>
SEADE	Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados.
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land.</i>
SIG	Sistemas de Informações Geográficas.
SIR-C	<i>C-band Spaceborne Imaging Radar.</i>
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas.
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission.</i>
TIRS	<i>Thermal Infrared Sensor.</i>
TM	<i>Thematic Mapper.</i>
UGRHI	Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos.
USGS	<i>United States Geological Survey.</i>

UTM	Projeção Universal Transversa de Mercator.
X-SAR	<i>X-Band Synthetic Aperture Radar.</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius.
A_L	Fator de escalonamento aditivo da radiância.
A_p	Fator de escalonamento aditivo da reflectância.
BOC	Balanço de radiação de ondas curtas.
BOL	Balanço de radiação de ondas longas.
cm	Centímetro.
d_{e-s}	Distância relativa entre a Terra e o Sol.
DN	Número digital de cada pixel das imagens orbitais.
$ESUN_{\lambda}$	Irradiância solar exoatmosférica média em cada banda.
G	Fluxo de calor no solo e na vegetação.
G_{SC}	Constante solar.
G_{water}	Fluxo de calor em lagos rasos, ou de águas turbidas.
K	Kelvin.
km	Quilômetro.
K_1	Constante de calibração 1 das bandas termais dos satélites Landsat 5 e 8.
K_2	Constante de calibração 2 das bandas termais dos satélites Landsat 5 e 8.
l	Fator de ajuste ao solo.
LMAX	Constante de calibração máxima para a radiância em cada banda espectral das imagens do satélite Landsat 5.
LMIN	Constante de calibração mínima para a radiância em cada banda espectral das imagens do satélite Landsat 5.
ln	Logaritmo natural.
L_{λ}	Radiância espectral em cada banda.
m	Metro.
M_L	Fator de escalonamento multiplicativo da radiância.
mm	Milímetro.
M_p	Fator de escalonamento multiplicativo da reflectância.
p. p.	Ponto percentual.
Q_{cal}	Número digital de cada pixel nas imagens do satélite Landsat 8.
$R_{L\uparrow}$	Radiação de onda longa emitida pela superfície.
$R_{L\downarrow}$	Radiação de onda longa incidente sobre a superfície.

R_n	Saldo de radiação na superfície.
$R_{S\downarrow}$	Radiação de onda curta incidente sobre a superfície.
sen	Senô.
sr	Esferorradiano.
T_a	Temperatura do ar, em K.
T_s	Temperatura da superfície.
T_{SC}	Temperatura da superfície, em °C.
T_{SK}	Temperatura da superfície, em K.
W	Watt.
z	Valores de altitude de cada pixel do Modelo Digital de Elevação.
α	Albedo da superfície.
$\alpha_{path_radiance}$	Porção da radiação solar espalhada pela atmosfera, na direção do satélite, antes de incidir sobre a superfície.
α_{toa}	Albedo no topo da atmosfera.
ϵ_a	Emissividade atmosférica.
ϵ_{NB}	Emissividade da superfície na faixa termal entre 10,4 e 12,5 μm .
ϵ_o	Emissividade da superfície na faixa termal entre 6 e 14 μm .
θ_{SE}	Ângulo de elevação solar.
λ	Cada uma das bandas espectrais dos satélites Landsat 5 e 8.
μm	Micrometro.
π	Pi.
ρ_λ	Reflectância planetária em cada banda.
σ	Constante de Stefan-Boltzmann.
τ_{SW}	Transmissividade da atmosfera para ondas curtas.
ω_λ	Coeficiente de peso para cada banda.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo geral	20
2.2	Objetivos específicos	20
3	REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1	Parâmetros biofísicos	21
3.1.1	Albedo da superfície	21
3.1.2	Saldo de radiação na superfície	21
3.1.3	Fluxo de calor no solo	22
3.1.4	Temperatura da superfície	23
3.2	Dinâmica do balanço de radiação no sistema Terra-atmosfera	24
3.3	Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento e Sistemas de Informações Geográficas	29
3.4	Caracterização do modelo SEBAL	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1	Caracterização da área de estudo	34
4.2	Elaboração da base cartográfica de referência	42
4.3	Obtenção e tratamento dos dados orbitais	42
4.4	Obtenção e tratamento dos dados meteorológicos	44
4.5	Classificação das imagens e mapeamento das categorias de uso e cobertura da terra	47
4.6	Implementação do modelo SEBAL	48
4.6.1	Modelo SEBAL aplicado a imagens Landsat 5	48
4.6.2	Modelo SEBAL aplicado a imagens Landsat 8	56
4.7	Subtração entre imagens de albedo da superfície	59
5	RESULTADOS	60
5.1	Distribuição espacial, quantificação e mudança nas classes de uso e cobertura da terra	60
5.2	Variabilidade dos parâmetros biofísicos e os impactos das mudanças sobre a superfície	62
5.2.1	Comportamento do albedo da superfície	62

5.2.2	Comportamento do saldo de radiação na superfície	67
5.2.3	Comportamento da temperatura da superfície	72
5.2.4	Comportamento do fluxo de calor no solo	77
5.3	Detecção de mudanças no uso e cobertura da terra a partir da subtração entre imagens de albedo da superfície	81
6	CONCLUSÃO	86
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE A – A não realização de mosaicos entre imagens de diferentes datas para suprir a falta da extremidade sul da bacia na imagem do dia 17/07/2008 e o impacto sobre a variabilidade estatística dos parâmetros biofísicos	104

1 INTRODUÇÃO

A tese do aquecimento global antropogênico alcançou, recentemente, o consenso entre os pesquisadores da área, de acordo com o exame de 11.602 artigos (revisados por pares) publicados durante os sete primeiros meses do ano de 2019 (POWELL, 2019). A síntese entre análises de artigos climáticos revisados por pares, pesquisas com membros de relevantes comunidades científicas, compilações de declarações públicas de cientistas especializados e análises matemáticas de padrões de citação, no período entre 1975 e 2015, já apontava uma concordância da ordem de 90 a 100 % (COOK *et al.*, 2016). Tal fato justifica a grande atenção dada às previsões a respeito das mudanças climáticas futuras.

Segundo o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2016), com base nos diferentes cenários de emissão dos gases do efeito estufa (GEE), estimados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), as projeções das mudanças climáticas globais ao longo do século XXI indicam a elevação sistemática da temperatura do ar junto à superfície, variando entre 2 °C, no cenário de baixas emissões, até 4 °C, no de altas emissões. Nesse contexto de clima mais quente, há uma probabilidade significativa de incremento na frequência e intensidade dos eventos extremos, como furacões, inundações e secas prolongadas, além do aumento nas precipitações em regiões atualmente muito chuvosas e a sua redução em regiões que já sofrem com a escassez de água.

Assim como os GEE derivados da queima de combustíveis fósseis, as emissões provenientes das alterações antrópicas causadas à cobertura da superfície terrestre também atuam como forçantes do sistema climático global. A agricultura, silvicultura e outras formas de uso da terra são uma fonte significativa de GEE, contribuindo com cerca de 23 % das emissões antropogênicas de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, no período entre 2007 e 2016. Outro modo pelo qual a superfície influi na dinâmica climática é através das trocas de energia com a atmosfera. Características como o albedo e a emissividade da superfície determinam a quantidade de radiação por ela absorvida, tanto quanto o montante da radiação refletida/emitida para a atmosfera. Além disso, a superfície terrestre constitui-se numa fonte de calor sensível e latente, transferindo essa energia para a atmosfera por meio dos processos de condução, convecção e evapotranspiração (IPCC, 2019).

Nas últimas décadas houve um enorme avanço no entendimento das interações entre superfície e atmosfera, responsáveis pelas trocas de energia ocorridas sob as formas de processos radiativos e de fluxos de calor sensível/latente. Tal avanço decorre tanto do

desenvolvimento de sofisticados equipamentos para o registro das trocas de energia *in situ*, quanto de técnicas para a modelagem desses fenômenos (PBMC, 2016). Em aplicações práticas do primeiro caso, os equipamentos apresentam custos elevados, demandam a presença frequente de técnicos especializados para a manutenção do seu funcionamento, e geram resultados representativos, tão somente, de áreas com características ambientais idênticas às dos locais de instalação (SANTOS, 2011). Essas medições pontuais são de difícil extrapolação a outras escalas, devido à diversidade de agroecossistemas presentes nas paisagens regionais (FRANCO; HERNANDEZ; TEIXEIRA, 2016). Nas aplicações do segundo caso, modelos alimentados por dados de sensoriamento remoto têm permitido a espacialização de diversos parâmetros associados às trocas de energia entre superfície e atmosfera, com rapidez e precisão satisfatória (PAVÃO *et al.*, 2017). As técnicas baseadas em imagens de satélites – cuja disponibilização é, na maioria dos casos, gratuita – apresentam uma aplicação relativamente simples, e possibilitam a determinação dos parâmetros em escala regional, sobre áreas com características heterogêneas (SANTOS, 2011).

Dentre as ferramentas que propiciam a produção de informações espacializadas está o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL). O modelo foi concebido para a implementação em Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), a partir do emprego de dados radiométricos obtidos via sensoriamento remoto. Conforme Kich (2018), o algoritmo é bastante utilizado desde o seu lançamento, tendo seus resultados já validados em diversas aferições, com o uso de imagens oriundas de diferentes satélites.

O SEBAL efetua o mapeamento da distribuição espacial de vários parâmetros de natureza biofísica, os quais são componentes dos balanços de radiação e energia calculados sobre a superfície terrestre. Alguns dos parâmetros biofísicos mais amplamente estudados nas avaliações dos impactos climáticos decorrentes das alterações na cobertura da terra correspondem ao albedo, saldo de radiação, fluxo de calor no solo e temperatura da superfície. Segundo Pavão *et al.* (2017), variáveis desse gênero são diretamente afetadas pela conversão dos espaços naturais em áreas antropizadas, sendo o seu exame fundamental na identificação dos impactos derivados.

A pesquisa acerca dos parâmetros biofísicos aprimora o entendimento relativo a inúmeras questões ambientais. De acordo com Silva, Lopes e Azevedo (2005a), o conhecimento do albedo tem um papel significativo nos estudos sobre mudanças climáticas, desertificação e queimadas. Sua avaliação temporal permite inferir a respeito da derrubada de florestas e da ocorrência de demais mudanças no uso e cobertura da terra (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008).

Quanto ao saldo de radiação, constitui-se num dos mais importantes fatores nas estimativas de perda de água da superfície para a atmosfera, sendo indispensável às atividades de planejamento e gestão do uso dos recursos hídricos (VELOSO, 2014). As informações sobre esse parâmetro são, ainda, utilizadas em diversas outras aplicações, tais como a previsão do tempo e o monitoramento climático (SILVA *et al.*, 2014). A compreensão do fluxo de calor no solo é especialmente relevante para fins agrônômicos, uma vez que, conforme Vianello e Alves (1991), o comportamento térmico do solo influi na ocorrência de geadas, na formação de orvalho, no crescimento das culturas e em sua produtividade. Já a temperatura da superfície atua como um indicador de áreas propensas a incêndios (BEZERRA *et al.*, 2014), sendo útil na detecção de queimadas, avaliação do estresse hídrico das culturas, e no monitoramento das secas (SANTOS, 2016). De um modo geral, a quantificação dos componentes dos balanços de radiação e energia é crucial para a elaboração de modelos ambientais, necessários ao embasamento das decisões públicas sobre a gestão dos recursos naturais (FRANCO; HERNANDEZ; TEIXEIRA, 2016).

A preservação e conservação dos recursos naturais são particularmente prementes nas áreas rurais, espaços nos quais a dinâmica dos ecossistemas ainda está submetida a modificações de menor intensidade, comparativamente às áreas urbanas. Segundo Arraes, Andrade e Silva (2012), no Brasil, o processo de exploração agropecuária corresponde à maior força de alteração das paisagens. A expansão das fronteiras agrícolas, com seus possíveis impactos ambientais e socioeconômicos, tem despertado o interesse do meio científico, das agências governamentais e das organizações do terceiro setor pelas pesquisas referentes às rápidas mudanças no uso e cobertura da terra, verificadas ao longo das últimas décadas. No âmbito de uma unidade espacial natural como as bacias hidrográficas, o monitoramento dos parâmetros biofísicos possibilita, de acordo com Oliveira *et al.* (2012), o diagnóstico das alterações na paisagem, ajudando a estabelecer condições de uso e ocupação mais sustentáveis, e orientando a implementação de políticas de reversão dos quadros de degradação ambiental.

A Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabaçu (BHRS), recorte espacial adotado nesse trabalho, está localizada no município de Ibiúna (SP), ocupando aproximadamente 19 % do seu território. Conforme a Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados (SEADE, [2019a]), dentre os 645 municípios paulistas, Ibiúna colocava-se, em 2017, na 11ª posição do *ranking* relativo ao Produto Interno Bruto Agropecuário Municipal. O dado demonstra o grau de magnitude que as atividades agropecuárias assumiram no referido município, indicando o elevado potencial de transformação da paisagem e de geração de danos ao meio ambiente.

Tais ameaças assumem uma importância ainda maior quando se considera o fato de que a área de estudo está situada numa região de relevante interesse ecológico.

A extensão espacial da BHRS corresponde a cerca de 22 % da Área de Proteção Ambiental (APA) da represa de Itupararanga, delimitada pela bacia hidrográfica desse reservatório. Instituída pela Lei Estadual nº 10.100 (SÃO PAULO, 1998), a mencionada unidade de conservação tem o objetivo de assegurar a manutenção da quantidade e qualidade dos recursos hídricos locais, mediante a determinação de restrições ao uso da terra e a proteção dos remanescentes florestais de Mata Atlântica. De acordo com a Fundação Florestal (FF, [2010]), a área contém o maior remanescente vegetal de toda a Bacia do Rio Sorocaba e Médio Tietê; encontrando-se na região onde a APA está inserida o número de 396 diferentes espécies arbóreas, das quais 362 são observadas nas cabeceiras do Rio Sorocabuçu (ALMEIDA; CARVALHO; CATHARINO, 2011). No que diz respeito à fauna regional, é igualmente composta por uma grande variedade de espécies, dentre mamíferos, aves e peixes, sendo algumas delas endêmicas e ameaçadas de extinção (CASTANHO; CARMIGNOTTO; SILVA, 2011).

A importância da APA também reside no fato de compreender diversos corpos hídricos e nascentes, cujas águas afluem para a represa de Itupararanga (BEU; MISATO; HAHN, 2011), responsável pelo abastecimento de mais de um milhão de pessoas nos municípios de Sorocaba, Votorantim, São Roque, Ibiúna, Mairinque e Alumínio (GOMES, 2018). No que se refere mais especificamente à BHRS, seu curso d'água principal responde pelo abastecimento da população urbana de Ibiúna (SABESP, 2018), estimada em cerca de 28.000 pessoas (SEADE, 2019b, 2019c).

Não obstante a relevância da unidade de conservação, como um todo, e da BHRS, em particular, para a proteção dos recursos hídricos, da biodiversidade e do equilíbrio climático local, o conjunto da área tem sido submetido ao avanço das atividades agropecuárias, com a consequente diminuição dos fragmentos vegetais remanescentes. Segundo Chinaque (2017), no interior da APA Itupararanga, somente entre os anos de 2010 e 2016, os espaços dedicados à agropecuária passaram por uma expansão superior a 90 %, ao passo que as áreas de vegetação nativa enfrentaram uma redução de aproximadamente 26 %. No período entre 2002 e 2010, Bernardi (2011) identificou uma ampliação em torno de 31 % nas áreas de agropecuária, enquanto os espaços recobertos por vegetação natural sofreram uma contração de 34 %. Embora a BHRS ainda não corresponda à porção da APA mais intensamente afetada pelo avanço das

atividades agropecuárias, o desmatamento na bacia tem apresentado um caráter progressivo, de modo que grande parte da sua cobertura florestal original já foi removida.

O presente trabalho é motivado pela constatação da gradativa deterioração do rico patrimônio ambiental da BHRS, decorrente das mudanças no uso e cobertura da terra, e pela possibilidade do emprego do modelo SEBAL na detecção dos impactos causados ao albedo, saldo de radiação, fluxo de calor no solo e temperatura da superfície, visando, desse modo, contribuir para o estabelecimento de práticas mais sustentáveis na área.

Paralelamente, pretende-se evidenciar que os mencionados parâmetros biofísicos apresentam características de manifestação próprias, o que demanda a utilização de abordagens diversas durante o tratamento dos seus dados. A hipótese subjacente é a de que os diferentes parâmetros possuem potencialidades e limitações distintas, no âmbito dos estudos voltados à identificação das alterações promovidas sobre a superfície terrestre. Por conseguinte, a inovação da pesquisa é concernente à avaliação do grau de contribuição que o exame de cada parâmetro pode proporcionar às análises de impactos ambientais baseadas na quantificação desses componentes dos balanços de radiação e energia.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Demonstrar a relação entre as modificações no uso e cobertura da terra e a variabilidade dos parâmetros biofísicos *albedo*, *saldo de radiação*, *fluxo de calor no solo* e *temperatura da superfície* na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabaçu, entre os anos de 2008 e 2018.

2.2 Objetivos específicos

- a) mapear e quantificar a área das principais categorias de uso e cobertura da terra, bem como a mudança na extensão desses espaços, ao longo do tempo;
- b) analisar o impacto das alterações no uso e cobertura da terra sobre a variabilidade espacial, temporal e estatística dos parâmetros biofísicos;
- c) avaliar a contribuição que o estudo de cada parâmetro pode proporcionar à identificação das mudanças ocorridas sobre a superfície terrestre.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Parâmetros biofísicos

3.1.1 Albedo da superfície

O albedo corresponde à propriedade física dos corpos de refletirem a radiação solar sobre eles incidente (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). Também conhecido como coeficiente de reflexão, é expresso na forma de um índice, que indica a fração da radiação solar reenviada ao espaço, após incidir sobre determinada superfície (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008). Seus valores são inversamente proporcionais à capacidade de absorção da radiação (MESQUITA, 2012); portanto, quanto mais um material devolver a radiação recebida, menos dessa será absorvida e maiores serão os valores de albedo (OLIVEIRA; VIANELLO; FERREIRA, 2001).

O albedo da superfície está na dependência das características de uso e cobertura da terra (VELOSO, 2014). Em áreas plano-horizontais, não-vegetadas, varia em conformidade com as propriedades físicas dos materiais, como cor e rugosidade. Em áreas recobertas por vegetação, seus valores associam-se às diferentes espécies vegetais, às suas fases de desenvolvimento, estados de sanidade, geometrias de copa e índices de área foliar (VAREJÃO-SILVA, 2006). De modo geral, seu comportamento também é variável em função da estação do ano e do ângulo zenital solar (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008), bem como em função das condições de umidade da superfície (VELOSO, 2014).

Alterações no albedo modificam os balanços de radiação e energia na superfície (SILVA *et al.*, 2016), de tal forma que esse parâmetro influencia diretamente o ciclo hidrológico e as condições climáticas locais (THOMPSON; BARBOSA; OLIVEIRA, 2017).

3.1.2 Saldo de radiação na superfície

O saldo de energia radiante diz respeito à quantidade de radiação efetivamente disponível num ecossistema, a ser empregada nos processos físicos e biológicos da natureza (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008). É determinado a partir da diferença entre a energia incidente sobre a superfície terrestre e a energia por ela refletida ou emitida (SILVA, 2015), mediante o cálculo do balanço de radiação ao nível do solo (WATERS *et al.*, 2002). Sendo assim, de acordo

com Gomes *et al.* (2009), representa a síntese da contabilidade entre os fluxos de radiação solar (ondas curtas – 0,3 a 4 μm) e os fluxos de radiação emitidos pela superfície e pela atmosfera (ondas longas – 4 a 100 μm).

O saldo de radiação é influenciado pelas características da superfície, tais como o uso e cobertura, albedo, umidade do solo (SILVA, A. *et al.*, 2017) e, especialmente, pela vegetação (MATOS; CANDEIAS; AZEVEDO, 2016). Também é dependente das mudanças na temperatura do ar (CARNEIRO *et al.*, 2014), além da sazonalidade associada à magnitude da radiação solar e ao seu ângulo de incidência (VELOSO, 2014).

Desempenhando um papel fundamental nos processos de troca de calor e matéria na baixa troposfera (SILVA; LOPES; AZEVEDO, 2005a), a energia do saldo de radiação na superfície é investida na geração dos fenômenos meteorológicos (TUBELIS; NASCIMENTO, 1980), sendo a sua variabilidade promotora de alterações tanto no perfil da taxa vertical de aquecimento do ar, quanto na circulação atmosférica (SILVA, A. *et al.*, 2017; SOUZA; SILVA; CEBALLOS, 2008).

3.1.3 Fluxo de calor no solo

Segundo Marin, Assad e Pilau (2008), enquanto o balanço de radiação na superfície quantifica a energia disponível aos ecossistemas (ou seja, o saldo de radiação), o balanço de energia discrimina a partição do saldo de radiação entre os seus três principais destinos, a saber: o fluxo de calor latente (empregado na evapotranspiração), o fluxo de calor sensível (utilizado no aquecimento do ar) e o fluxo de calor no solo (responsável pelo aquecimento desse corpo).

O fluxo de calor no solo equivale à fração da energia do saldo de radiação que foi transferida para os níveis inferiores do solo (GALVANI; ESCOBEDO; PEREIRA, 2001). Corresponde, portanto, ao transporte vertical de calor, por meio do processo de condução, desde as camadas superficiais do solo até aquelas de maior profundidade, durante o período diurno, e ao fluxo de calor no sentido inverso, quando do período noturno (BEZERRA, 2006).

Dentre os fatores externos que controlam a dinâmica do fluxo de calor no solo, Gomes, Santos e Almeida (2013) ressaltam as variações temporais na quantidade de energia solar incidente e a distribuição espacial da cobertura vegetal. Quanto aos controladores internos, Silva (2015) destaca o gradiente vertical de temperatura e a condutividade térmica. A magnitude do fluxo de calor no interior do solo é diretamente proporcional ao valor do seu gradiente de temperatura (VAREJÃO-SILVA, 2006), ao passo que a composição, porosidade e umidade do

solo determinam a sua condutividade térmica, referente à facilidade/dificuldade com que ocorre o transporte de calor (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

Durante o período diurno, o fluxo de calor no solo atua na remoção da energia do meio, enquanto promove o fornecimento de energia para o meio, ao longo do período noturno (GALVANI; ESCOBEDO; PEREIRA, 2001), balanceando o aquecimento radiativo no transcurso do dia, e o resfriamento radiativo no decorrer da noite (OLIVEIRA *et al.*, 2006). Além disso, os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no interior do solo dependem desse fluxo de calor (FUNARI; PEREIRA FILHO, 2017), cuja variação energética regula processos como a germinação de sementes, o crescimento do sistema radicular, a absorção de água e nutrientes, a atividade microbiana e a decomposição da matéria orgânica (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008).

3.1.4 Temperatura da superfície

Temperatura é um conceito que expressa o estado energético de uma substância (VIANELLO; ALVES, 1991). Vulgarmente associada às sensações de frio e calor, é definida como a medida da energia cinética vinculada à vibração aleatória das partículas que compõem uma substância, ou um corpo qualquer (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008). Desse modo, a temperatura da superfície pode ser conceituada como a medida do estado energético dos corpos que compõem uma determinada porção da superfície terrestre.

A temperatura [da superfície] de um solo decorre da quantidade de energia radiante incidente, do seu albedo (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008), condutividade térmica, calor específico e emissividade (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007). Em áreas vegetadas, a temperatura da superfície é tanto menor quanto maior a quantidade de biomassa e o vigor da vegetação (PAVÃO *et al.*, 2017). Já a temperatura do dossel, tanto menor quanto maior a disponibilidade hídrica na zona radicular (WARREN *et al.*, 2014). Nas cidades, a substituição da cobertura natural por materiais com elevada capacidade de acumulação térmica e baixa permeabilidade tem implicações significativas sobre as temperaturas da superfície (WERNECK, 2018), de tal forma que, em áreas densamente edificadas e desprovidas de vegetação, a taxa de absorção de calor pelos materiais construtivos urbanos pode chegar 98 % (AMORIM, 2010).

A energia derivada da superfície terrestre é a maior responsável pelo aquecimento do ar na Troposfera (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007), seja por intermédio da

emissão de energia radiante, ou através da transferência de calor por contato direto, responsável pela manifestação dos processos convectivos (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008). Ademais, as alterações na temperatura da superfície também influem na transferência de matéria para a atmosfera, mais especificamente, no que concerne ao fornecimento de água e dióxido de carbono (SANTOS *et al.*, 2015).

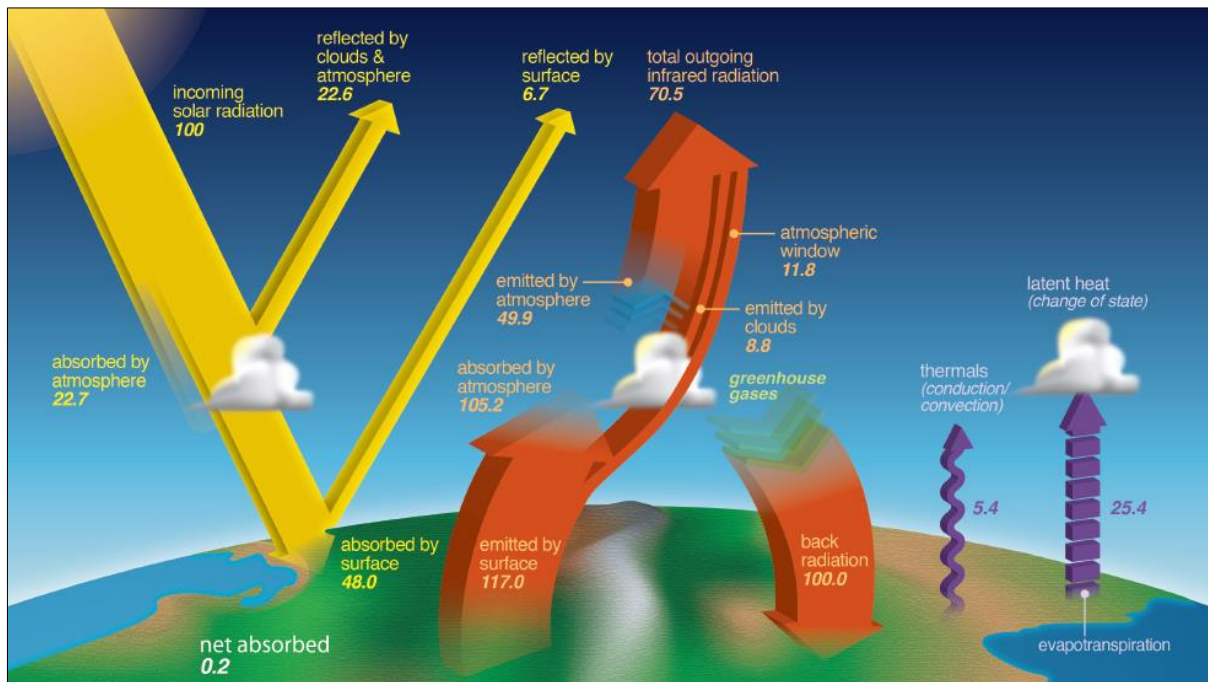
3.2 Dinâmica do balanço de radiação no sistema Terra-atmosfera

O balanço de radiação refere-se à contabilização líquida entre toda a energia radiante recebida e a perdida por uma determinada superfície (VIANELLO; ALVES, 1991). De maneira geral, o balanço de radiação na superfície terrestre é positivo durante o dia e negativo à noite. Ao longo de um ano, considerando-se a totalidade do sistema Terra-atmosfera, o balanço é positivo entre as latitudes 30° Sul e 40° Norte, enquanto é negativo no restante do planeta (AYOADE, 1996). Para facilitar a compreensão do trânsito de energia, o balanço de radiação anual médio do sistema Terra-atmosfera sintetiza as variações espaço-temporais na intensidade dos fluxos energéticos (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

A Figura 1 apresenta os percentuais do balanço global entre os anos de 2000 e 2010, calculados pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). No intervalo de tempo mencionado, a média da densidade de fluxo da radiação solar no topo da atmosfera foi equivalente a 340,4 W/m² (NASA, [2014]).

Ao atravessar a atmosfera, essa radiação é atenuada através dos processos de absorção e espalhamento. Na absorção, a temperatura ou a composição química das partículas constituintes do ar são alteradas pela assimilação da energia, ao passo que, no espalhamento, tais partículas apenas dispersam a energia, ocorrendo a sua difusão em todas as direções (VIANELLO; ALVES, 1991). A radiação solar também sofre o processo de reflexão, quando uma fração da energia espalhada é direcionada ao espaço (OLIVEIRA; VIANELLO; FERREIRA, 2001), ou quando a radiação é diretamente refletida para fora do sistema pelas nuvens (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Figura 1 – Balanço de radiação anual médio (%) do sistema Terra-atmosfera entre 2000 e 2010.



Fonte: NASA [2014].

A radiação solar que consegue atravessar a atmosfera é composta por um fluxo de energia diretamente incidente sobre a superfície terrestre (radiação solar direta), bem como por outro que a atinge indiretamente, após o processo de espalhamento (radiação solar difusa). Ambos alcançam a superfície concomitantemente, representando a radiação solar global, da qual uma parte será absorvida pela superfície, e outra refletida para o espaço (TUBELIS; NASCIMENTO, 1980).

O albedo planetário compreende o conjunto da radiação solar refletida pela superfície e pelas nuvens, além da radiação espalhada na direção do espaço pelas partículas constituintes do ar (VIANELLO; ALVES, 1991). Conforme os dados da Figura 1, do total da radiação solar interceptada pelo sistema Terra-atmosfera (100,0 %), um montante de 22,6 % é refletido pelas nuvens e pela atmosfera, enquanto a superfície responde pela reflexão de mais 6,7 %, totalizando um albedo planetário correspondente a 29,3 %.

O sistema Terra-atmosfera absorve 70,7 % do influxo de radiação solar, sendo 22,7 % pelos gases atmosféricos/nuvens e 48,0 % pela superfície. Constatase, portanto, a relativamente baixa capacidade de absorção da radiação de ondas curtas pelos gases que compõem o ar, o que denota, de acordo com Mendonça e Danni-Oliveira (2007), a pequena participação direta dessa faixa espectral no aquecimento da atmosfera.

A energia solar absorvida pela superfície terrestre é repassada à atmosfera por meio de processos radiantes (emissão de radiação infravermelha) e não-radiantes (condução, convecção e liberação de calor latente).

A condução de energia térmica ocorre mediante o contato direto entre as moléculas das substâncias, propagando o calor entre corpos com temperaturas diferentes (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008). O fenômeno permite que a superfície transfira calor sensível à atmosfera, ainda que o processo se restrinja à delgada camada de ar na interface entre ambas (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007). Quanto à convecção, relaciona-se às correntes aéreas ascendentes, devidas ao aquecimento do ar, por condução, junto à superfície (VAREJÃO-SILVA, 2006). Nesse caso, além do transporte de calor sensível, tem-se, também, a transferência de vapor d'água, os quais ascendem até camadas mais elevadas da atmosfera (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007). O vapor d'água conserva a energia consumida durante a evaporação, transformando em calor latente o calor sensível fornecido pela superfície (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). Ao atingir uma altitude propícia, o vapor d'água é submetido à condensação, o que promove a liberação do calor latente e o consequente aquecimento da atmosfera circundante (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

De acordo com a Figura 1, a superfície terrestre remete à atmosfera, por intermédio de processos não-radiantes, o equivalente a 30,8 % do total da energia associada ao influxo de radiação solar, sendo uma parcela de 25,4 % decorrente da liberação de calor latente, e outra de 5,4 % resultante da contribuição conjunta entre os processos de condução e convecção. Até a presente fase da sequência explicativa, a superfície conserva 17,2 % da energia do influxo de radiação de ondas curtas ($48,0 \% - 25,4 \% - 5,4 \% = 17,2 \%$). A quase totalidade desse remanescente será perdida através de processos radiativos.

Em razão do aquecimento vinculado à absorção da radiação solar, a superfície do planeta torna-se uma fonte de radiação de ondas longas, havendo a emissão de radiação infravermelha (no caso, radiação terrestre), cujo máximo situa-se nos comprimentos de onda em torno de 10 μm (AYOADE, 1996). Entretanto, como pode ser observado na Figura 1, o montante emitido pela superfície (117,0 %) é muito superior ao remanescente da radiação solar absorvida (17,2 %), e maior até do que o influxo de radiação de ondas curtas (100,0 %). Mendonça e Danni-Oliveira (2007) esclarecem que esse fato se deve à manifestação do efeito estufa atmosférico.

Embora a atmosfera absorva só uma pequena porção da radiação de ondas curtas, ela apresenta alta capacidade de absorção da radiação infravermelha, em função da presença de gases como o vapor d'água, ozônio e dióxido de carbono, bem como em virtude da ação absorvente das nuvens. O efeito estufa é caracterizado pela admissão da radiação solar no sistema Terra-atmosfera, paralelamente ao impedimento à perda da radiação terrestre para o espaço. Com a absorção de grande parte da radiação terrestre, e de uma fração da radiação solar, a atmosfera passa a emitir radiação infravermelha (no caso, radiação atmosférica), tanto na direção do espaço, quanto na direção da superfície (contrarradiação) (AYOADE, 1996). Emitida na mesma faixa de comprimentos de onda da radiação terrestre, a contrarradiação é totalmente absorvida pela superfície (TUBELIS; NASCIMENTO, 1980). Desse modo, a radiação terrestre é forçada a retornar, na forma de contrarradiação, por obra do efeito estufa, impondo à superfície valores de temperatura e emissividade superiores aos que ocorreriam na ausência da atmosfera (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Os dados da Figura 1 sugerem um acréscimo de radiação ao sistema, associado à atuação do efeito estufa. Na verdade, esse aparente ganho resulta do retardamento na perda de radiação para o espaço, dado que há um acúmulo temporário de energia pela atmosfera. Tal acúmulo traduz-se em um fluxo de contrarradiação com valor equivalente a 100,0 % do influxo de radiação solar.

A partir da absorção desse montante, a superfície reserva um total equiparável a 117,2 % da radiação fornecida ao sistema Terra-atmosfera. A fração de 0,2 % permanecerá retida na superfície, ao passo que a radiação terrestre responderá pela emissão da parcela restante de 117,0 %. Essa será dividida entre a porção de 105,2 %, absorvida pela atmosfera e pelas nuvens (efeito estufa); e a de 11,8 %, perdida para o espaço por via da “janela atmosférica”, correspondente, segundo Vianello e Alves (1991), aos comprimentos de onda infravermelhos para os quais a absorção é mínima.

Nessa fase da sequência explicativa, ainda conforme a Figura 1, a atmosfera concentra o equivalente a 158,7 % do aporte de radiação solar ($22,7 \% + 5,4 \% + 25,4 \% + 105,2 \% = 158,7 \%$). A parcela de 58,7 % será irradiada ao espaço, sendo composta pelos fluxos de radiação emitidos pela atmosfera (49,9 %) e pelas nuvens (8,8 %). Já a porção restante, de 100,0 %, constituirá a contrarradiação, a qual dará continuidade ao ciclo do efeito estufa.

Ao final do balanço, a soma dos fluxos de radiação de ondas curtas absorvidos pelos gases atmosféricos/nuvens e pela superfície ($22,7 \% + 48,0 \% = 70,7 \%$) aproxima-se da soma dos fluxos de radiação de ondas longas remetidos ao espaço pela atmosfera, pelas nuvens e

pela superfície (49,9 % + 8,8 % + 11,8 % = 70,5 %). A diferença (0,2 %) refere-se à média da energia efetivamente acrescida ao sistema Terra-atmosfera, durante o período considerado (anos de 2000 a 2010). De acordo com NASA [2014], a continuidade desse desequilíbrio é indicativa das mudanças climáticas pelas quais passa o planeta.

O balanço de radiação global pode ser calculado em diferentes níveis. No topo da atmosfera, o influxo de radiação solar é balanceado pelo albedo planetário e pelas emissões de radiação infravermelha para o espaço, conforme a Equação 1 (NASA, [2014]):

$$\begin{aligned} \text{Influxo de Rad. Solar} &= \text{Albedo Planetário} + \text{Emissão de Rad. Infrav. para o Espaço} \quad (1) \\ 100,0 \% &\approx (22,6 \% + 6,7 \%) + (49,9 \% + 8,8 \% + 11,8 \%) \\ 100,0 \% &\approx 99,8 \% \end{aligned}$$

No interior da atmosfera, o montante formado pela absorção dos fluxos de radiação solar e terrestre, acrescido à absorção da energia dos processos não-radiantes, é balanceado pela emissão da radiação atmosférica, de acordo com a Equação 2 (NASA, [2014]):

$$\begin{aligned} \text{Rad. Sol. Absorvida} + \text{Rad. Terrestre Absorvida} + \text{Proc. Não-Rad.} &= \text{Rad. Atmosférica} \quad (2) \\ 22,7 \% + 105,2 \% + (5,4 \% + 25,4 \%) &= (49,9 \% + 8,8 \% + 100,0 \%) \\ 158,7 \% &= 158,7 \% \end{aligned}$$

Na superfície, a absorção conjunta da radiação solar e da contrarradiação é balanceada pelos processos não-radiantes e pela emissão da radiação terrestre, conforme a Equação 3 (NASA, [2014]):

$$\begin{aligned} \text{Rad. Sol. Absorvida} + \text{Contrarradiação} &= \text{Proc. Não-Rad.} + \text{Rad. Terrestre} \quad (3) \\ 48,0 \% + 100,0 \% &\approx (5,4 \% + 25,4 \%) + 117,0 \% \\ 148,0 \% &\approx 147,8 \% \end{aligned}$$

Em aplicações práticas, com o emprego de valores absolutos mensurados em um determinado recorte da superfície do planeta, os procedimentos para o cálculo do balanço de radiação (cujo valor resultante corresponde ao saldo de radiação) são particionados entre a determinação do balanço de ondas curtas e o de ondas longas.

O balanço de ondas curtas (BOC) quantifica a radiação solar absorvida pela superfície, por meio da Equação 4 (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008):

$$BOC = \text{Radiação Solar Global} \cdot (1 - \text{albedo da superfície}) \quad (4)$$

O balanço de ondas longas (BOL) mensura a absorção da radiação infravermelha pela superfície, mediante a Equação 5 (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008):

$$BOL = \text{Contrarradiação} - \text{Radiação Terrestre} \quad (5)$$

Por fim, a obtenção do valor do saldo de radiação dá-se pela soma entre BOC e BOL, através da Equação 6 (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008):

$$\text{Saldo de Radiação na Superfície} = BOC + BOL \quad (6)$$

3.3 Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento e Sistemas de Informações Geográficas

Ao interagir com objetos e superfícies, a radiação eletromagnética emitida pelo Sol pode ser refletida, ou absorvida e reemitida. As características do fluxo refletido/reemitido dependem fortemente das propriedades físico-químicas dos elementos irradiados, constituindo-se, portanto, numa valiosa fonte de informação a seu respeito (ROSA, 2009).

O Sensoriamento Remoto pode ser definido como o emprego de sensores, colocados a bordo de aeronaves ou espaçonaves, com o objetivo de estudar fenômenos e processos que ocorrem sobre a superfície do planeta Terra, a partir do registro e análise da radiação eletromagnética (NOVO, 2010). Também é conceituado como o conjunto das atividades voltadas à caracterização das propriedades físico-químicas dos alvos naturais, através da detecção da energia radiante por eles refletida/emitida (ROSA, 2009); ou como a ciência que visa à obtenção de imagens da superfície do planeta, por meio da medição das respostas derivadas da interação entre a radiação eletromagnética e os materiais terrestres (MENESES, 2012). Enquanto o termo “sensoriamento” faz referência ao processo de obtenção dos dados, o termo “remoto” ressalta o fato de que essa obtenção é feita à distância, sem contato físico entre o sensor e a superfície (FLORENZANO, 2007).

Ainda segundo Florenzano (2007), as imagens de satélites proporcionam uma visão sinótica (de conjunto) e multitemporal (dinâmica) de extensas áreas da superfície do planeta. Por esse motivo, o Sensoriamento Remoto é uma das mais bem-sucedidas tecnologias de coleta automática de dados para o levantamento e o monitoramento dos recursos terrestres (MENESES, 2012), tendo-se tornado uma poderosa ferramenta para a obtenção de informações necessárias ao manejo dos recursos naturais (BEZERRA *et al.*, 2014). As imagens de satélites mostram os ambientes no transcurso de suas transformações, apresentando os impactos decorrentes dos fenômenos naturais e os causados pelas ações humanas, no processo de uso e ocupação do solo (FLORENZANO, 2007). Adicionalmente, o Sensoriamento Remoto permite a determinação da magnitude, direção, sentido e intensidade das alterações impostas ao meio, informações essenciais à prognose ambiental (SILVA, 2009).

Ao longo dos últimos anos, as técnicas de Sensoriamento Remoto também têm assumido um papel relevante no monitoramento de fenômenos meteorológicos, bem como propiciado um melhor entendimento acerca do comportamento de variáveis climáticas e de parâmetros biofísicos da superfície terrestre (SILVA; SILVA; SILVA, 2015). De acordo com Veloso (2014), tais técnicas demonstram grande potencial na análise dos componentes dos balanços de radiação e energia, possibilitando vasta cobertura espaço-temporal na determinação dos fluxos energéticos da superfície (OLIVEIRA; MORAES; RUDORFF, 2014).

Enquanto o Sensoriamento Remoto vincula-se à obtenção de dados ambientais, o Geoprocessamento faz uso dos mesmos na geração de informação (SILVA, 2009), agregando valor aos dados derivados dos sensores remotos (NOVO, 2010). Define-se Geoprocessamento como a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemático-computacionais para o tratamento da informação geográfica (CÂMARA; DAVIS, 2001). Nesse contexto, o termo “informação” refere-se aos dados brutos já submetidos à seleção, organização e interpretação; ao passo que “geográfica” diz respeito à superfície da Terra, ou àquilo que lhe esteja próximo (LONGLEY *et al.*, 2013). Pode-se, ainda, definir Geoprocessamento como o conjunto de conceitos, técnicas e métodos que, atuando sobre bases de dados georreferenciados, através de computação eletrônica, viabiliza a realização de sínteses e análises, as quais consideram os atributos e as distribuições espaciais dos fenômenos estudados, gerando informações relevantes para o apoio às decisões relativas aos recursos ambientais (SILVA, 2009).

As ferramentas computacionais empregadas no Geoprocessamento são chamadas de Sistemas de Informações Geográficas (CÂMARA; DAVIS, 2001). Os SIGs correspondem a sistemas computacionais, integrantes de uma classe especial de sistemas de informação,

cujo propósito é armazenar e processar informações de natureza geográfica. Sua utilização proporciona a armazenagem de grandes volumes de informação espacial em bancos de dados, a automação dos processos de confecção de mapas, bem como a rápida implementação de operações analíticas, agilizando o exame das relações, padrões e anomalias associados aos dados geográficos (LONGLEY *et al.*, 2013).

Compreender a distribuição espacial dos fenômenos ocorridos sobre a superfície terrestre constitui um requisito central para a elucidação de várias questões, ligadas às mais diversas áreas do conhecimento, desde o zoneamento agrícola até a saúde e segurança públicas. A despeito dos diferentes objetos de estudo, a resolução dessas questões demanda a realização de análises espaciais sobre os seus respectivos dados geográficos, de modo a reconhecer suas propriedades e relacionamentos (CÂMARA *et al.*, 2004). Daí a utilidade e a importância dos SIGs, na medida em que são ferramentas especificamente voltadas à resolução de problemas espaciais, cujo uso permite revelar determinados aspectos que, de outra forma, estariam invisíveis no interior dos dados geográficos (LONGLEY *et al.*, 2013).

3.4 Caracterização do modelo SEBAL

O SEBAL constitui-se num dos mais completos modelos para o estudo dos fluxos de calor na superfície, sendo aplicado em diversos agrossistemas, por vários pesquisadores ao redor do planeta (MARTINS; ROSA, 2019). É consagrado mundialmente como uma metodologia eficaz na estimativa da evapotranspiração e dos componentes dos balanços de radiação e energia (VELOSO; FERREIRA; SILVA, 2017), estando entre os algoritmos mais utilizados no Brasil (FRANCO; HERNANDEZ; TEIXEIRA, 2016). Seu uso é frequente na determinação do consumo hídrico, biomassa e produtividade das culturas, bem como em análises de impactos ambientais (SILVA *et al.*, 2014).

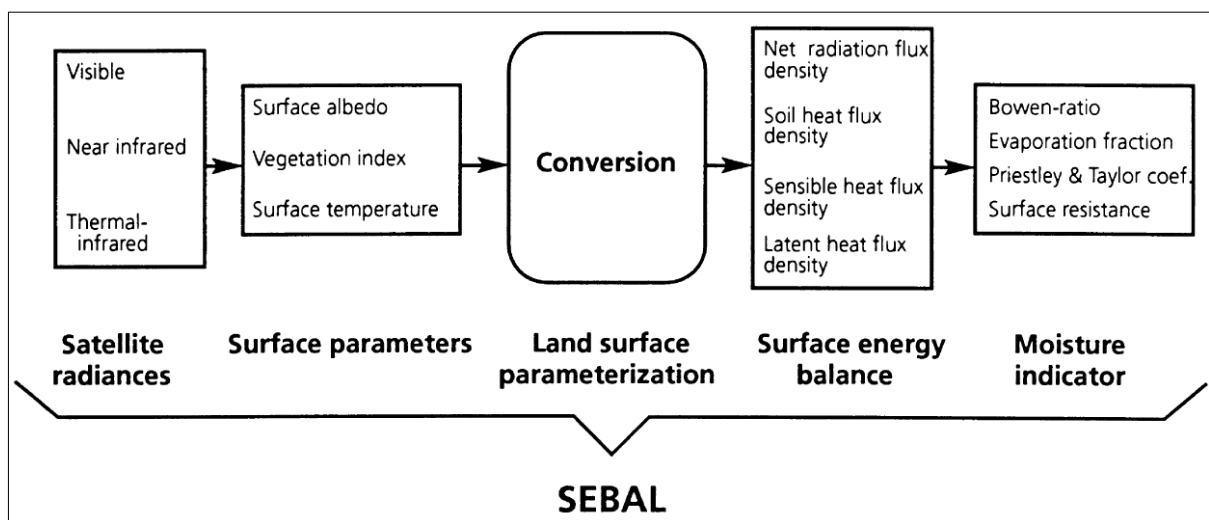
As formulações iniciais do SEBAL foram propostas por Bastiaanssen (1995). O modelo serve a aplicações de sensoriamento remoto, utilizando-se de dados espectrais nas regiões do visível e do infravermelho (próximo e termal). Os valores dos índices de vegetação, albedo e temperatura, obtidos para a superfície terrestre, permitem ao algoritmo o cálculo das densidades do saldo de radiação e dos componentes do balanço de energia, além da determinação dos indicadores de umidade. Seu emprego contempla desde a escala local até a regional, admitindo o vasto espectro de formas de uso e cobertura da terra, e requerendo a menor quantidade possível de medições em campo.

Embora o modelo implemente alguns relacionamentos empíricos entre os parâmetros da superfície, tais relacionamentos foram ajustados a diferentes regiões geográficas. Os mais importantes pressupostos do SEBAL são baseados nos princípios físicos fundamentais de transferência de calor e conservação de energia, o que possibilita a sua utilização em diferentes tipos climáticos. Por calcular os fluxos de radiação/energia independentemente do uso e cobertura da terra, o algoritmo torna-se adequado ao emprego em bacias hidrográficas heterogêneas e em áreas com distintas características fisiográficas. Também se adapta às diferentes resoluções espaciais de qualquer sensor remoto que obtenha dados espectrais nas regiões do visível, infravermelho próximo e termal (BASTIAANSEN *et al.*, 1998).

As principais vantagens do SEBAL relacionam-se à sua mínima exigência de dados meteorológicos auxiliares; ao fato de lidar com um grande número de variáveis ambientais, não as assumindo como distribuídas de modo uniforme sobre o espaço (COMPAORÉ *et al.*, 2008); à execução de correções atmosféricas simples, porém, produtoras de resultados consistentes, dispensando a aplicação de códigos de transferência radiativa de maior complexidade (SILVA; LOPES; AZEVEDO, 2005a); à possibilidade de uma grande cobertura espacial dos resultados, com economia na sua geração (SILVA; LOPES; AZEVEDO, 2005b); e à metodologia de mensuração dos parâmetros em separado, o que confere maior precisão às estimativas (MARTINS; ROSA, 2019).

O SEBAL possui uma estrutura modular, sintetizada no esquema apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Principais módulos componentes do SEBAL



Fonte: Bastiaanssen (1995).

Além dos dados de entrada indicados na Figura 2, as implementações mais recentes do algoritmo também utilizam Modelos Digitais de Elevação (MDEs), pois a espessura da coluna de ar acima da superfície varia com a altitude, contribuindo para a definição da magnitude de variáveis como a transmissividade e a emissividade atmosféricas.

As imagens multiespectrais são convertidas em dados de radiância e reflectância, para a posterior obtenção dos parâmetros de superfície. Conforme Waters *et al.* (2002), o albedo é determinado a partir da relação entre a irradiância solar exoatmosférica e a reflectância em cada banda. Quanto à temperatura, é calculada em função da radiância na banda termal, mediante modificações na equação de Planck. Já os índices de vegetação derivam de relações entre as reflectâncias nas bandas do vermelho e infravermelho próximo.

No cômputo do saldo de radiação na superfície, os fluxos radiantes incidentes são inferidos com base em dados medidos em campo, ao passo que os fluxos refletidos e emitidos são estimados remotamente, a partir da emissividade, albedo e temperatura da superfície¹ (BASTIAANSEN, 2000). A determinação final do valor do saldo de radiação é dada subtraindo-se do somatório dos fluxos de entrada (ganhos) o somatório dos fluxos de saída (perdas) (WATERS *et al.*, 2002).

O fluxo de calor no solo é obtido empiricamente, calculado como uma fração do saldo de radiação. A temperatura da superfície é incluída em sua parametrização para avaliar, com maior precisão, o intenso fluxo de calor que ocorre quando o solo possui uma baixa cobertura (BASTIAANSEN, 1998). Os índices de vegetação também são inseridos, na medida em que o dossel das plantas intercepta a luz solar, implicando no resfriamento da superfície (BASTIAANSEN; BANDARA, 2001). Nas áreas de baixa cobertura vegetal, a estimativa do fluxo de calor no solo toma como referência a temperatura da superfície; enquanto se baseia nos índices de vegetação, sobre os espaços em que a cobertura vegetal se faz presente. Leva-se em conta, ainda, o albedo, pois as áreas que apresentam alta reflexão, frequentemente, são indicativas de solo exposto (ALLEN *et al.*, 2011).

A implementação dos procedimentos anteriores será detalhada na próxima seção. Os procedimentos que possibilitam a determinação dos parâmetros restantes (fluxos de calor sensível, latente e indicadores de umidade) demandariam dados meteorológicos de campo (velocidade do vento) que não estão disponíveis nas proximidades da BHRS. Desse modo, a descrição dos demais processos envolvidos no modelo não será apresentada nesse trabalho.

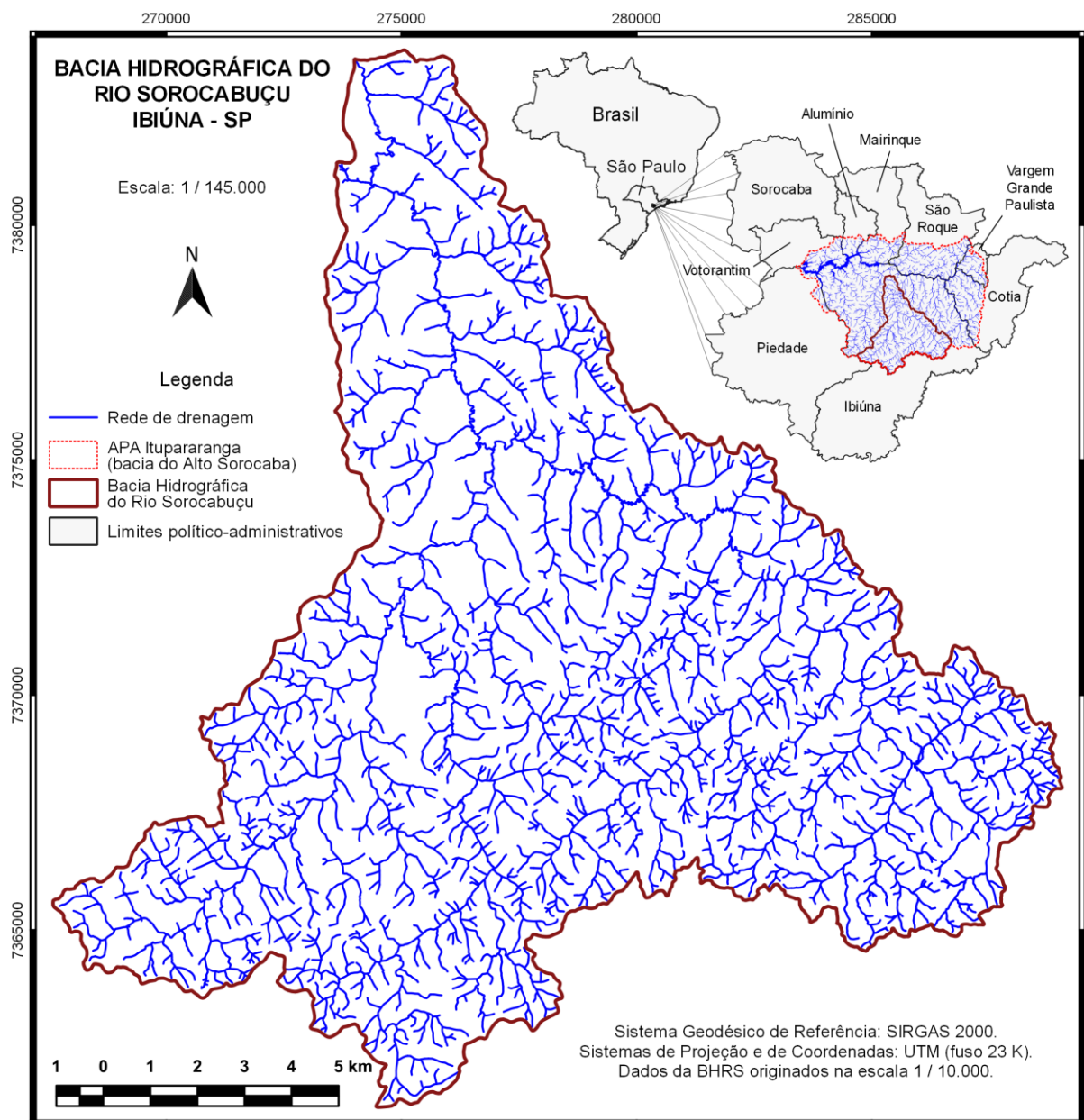
¹ Os dados de campo correspondem à temperatura do ar e à altitude local (substituível por altitudes espacialmente distribuídas, provenientes do MDE). A emissividade da superfície é estimada a partir dos índices de vegetação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

A BHRS está inteiramente inserida no interior do município de Ibiúna, estado de São Paulo, ocupando cerca de 202,67 km² (Figura 3).

Figura 3 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu



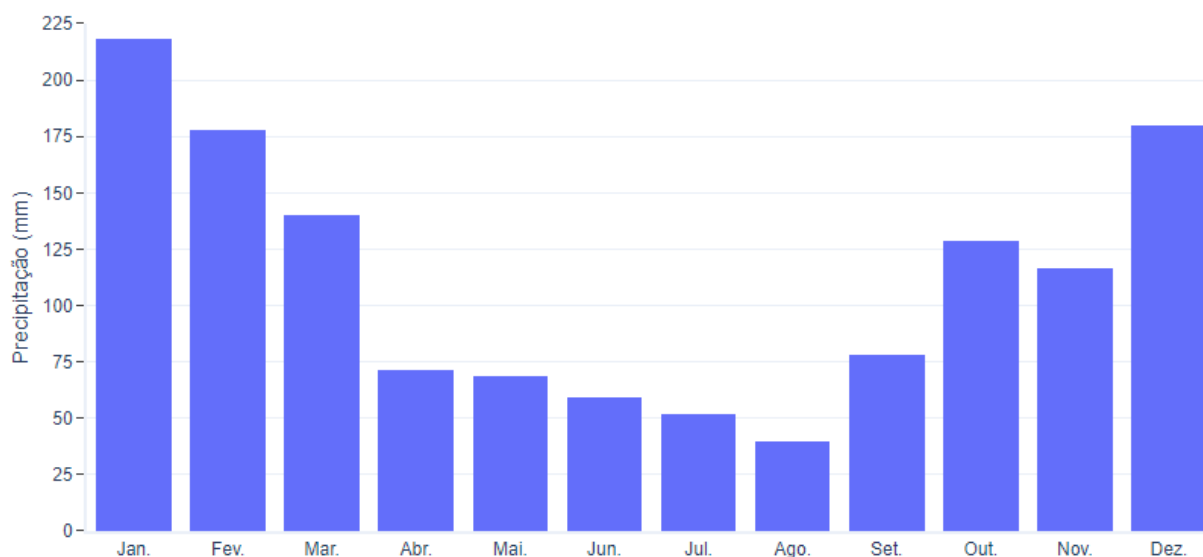
Fonte: Autoria própria. Hidrografia da Bacia do Sorocabuçu: IGC (2014). Divisores de drenagem da bacia do Alto Sorocaba: Gestão da APA Itupararanga [201-]. Drenagem da Bacia do Alto Sorocaba: São Paulo (2013). Limites político-administrativos: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018a, 2018b).

A área integra a bacia do Alto Sorocaba, correspondente à bacia hidrográfica da represa de Itupararanga, cujos limites também definem a abrangência espacial da APA homônima. Tal região é incluída na Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) de número 10, referente à bacia do Rio Sorocaba e Médio Tietê.

A BHRS possui uma baixa densidade populacional, com a presença de pequenos aglomerados rurais. Na sua estrutura fundiária predominam as pequenas propriedades de terra, fundamentalmente voltadas às atividades de produção agropecuária.

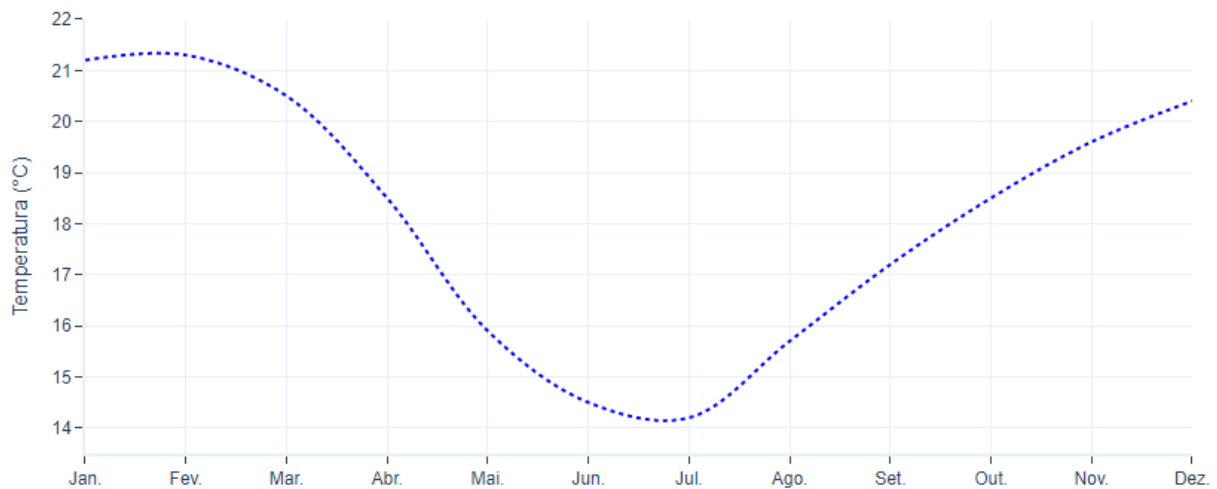
A precipitação anual média é igual a 1330 mm, com valores mensais médios variando entre 40 e 219 mm, relativos, respectivamente, aos meses de agosto e janeiro (Figura 4). Os dados provêm da estação pluviométrica da cidade de Ibiúna, mantida pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE). Quanto às médias mensais de temperatura do ar, variam entre 14,2 °C, em julho, e 21,3 °C, em fevereiro (Figura 5). Considerando-se que ainda não há estações termométricas instaladas no município, os referidos dados foram extraídos da estimativa realizada por Alvares *et al.* (2013a).

Figura 4 – Precipitação mensal média na estação DAEE E4-047
(novembro de 1939 a agosto de 2018)



Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por DAEE (2019).

Figura 5 – Estimativa das médias mensais de temperatura do ar no município de Ibiúna (1950 a 1990)

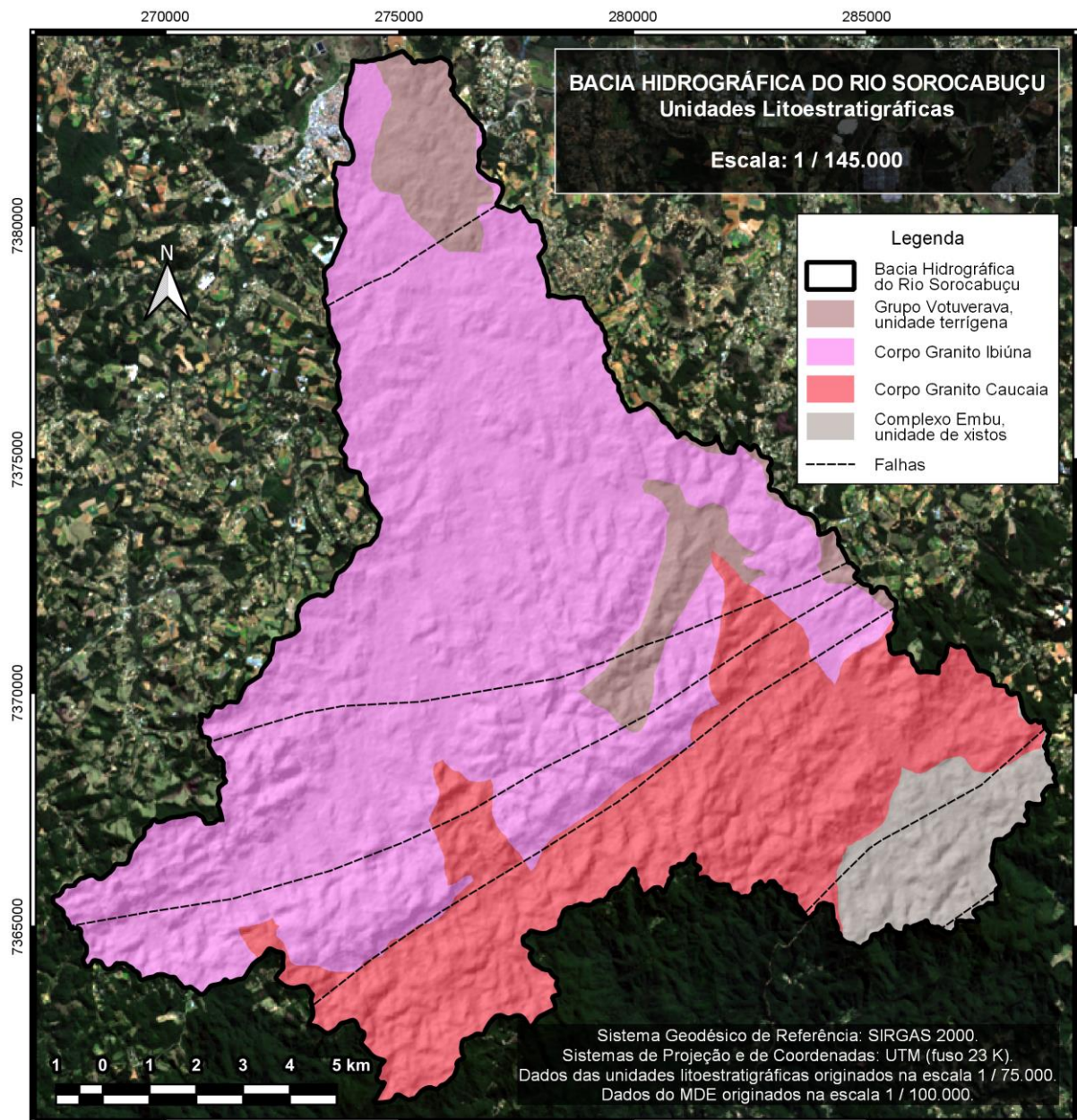


Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por Alvares *et al.* (2013b).

Alvares *et al.* (2013a), utilizando-se do sistema de classificação de Köppen, enquadram a região da BHRS no tipo climático Cfb, relativo aos climas subtropicais úmidos, de influência oceânica, sem estação seca e com verão moderado. Por sua vez, no trabalho de Dubreuil *et al.* (2018), a área da bacia está inserida numa região de predominância do tipo climático Cwa, correspondente a climas temperados, com verões quentes e úmidos. Ambos os levantamentos têm como resultado mapeamentos de escala nacional, podendo não refletir, com o detalhamento necessário, as variações sub-regionais do clima. A classificação possivelmente mais adequada é a do estudo local realizado por Salles *et al.* (2008), que atribui à bacia do Alto Sorocaba o tipo climático Cwb, caracterizado pelos verões chuvosos e pelas estiagens de inverno.

Em relação ao substrato geológico (Figura 6), a área da BHRS situa-se na unidade morfoestrutural do Cinturão Orogênico do Atlântico (SÃO PAULO, 2014a, 2014b). Estão presentes as seguintes unidades litoestratigráficas (CPRM, [2006]): Granito Ibiúna (granitoides foliados calcialcalinos), Granito Caucaia (granitoides foliados quimicamente indiferenciados), Complexo Embu, Unidade de Xistos (mica xistos e quartzo xistos alternados ritmicamente) e Grupo Votuverava, Unidade Terrígena (metassiltitos alternados com metargilitos, metarenitos e metaconglomerados). Suas idades variam desde os períodos Ediacarano (Granito Ibiúna/Caucaia) e Criogeniano (Complexo Embu, Unidade de Xistos) até o Período Calimiano (Grupo Votuverava, Unidade Terrígena) (CPRM, 2009). É possível reconhecer o controle estrutural, exercido pelas falhas, sobre parte da rede de drenagem (porção Sul/Sudeste da bacia), contribuindo para a compartimentação local do relevo.

Figura 6 – Unidades litoestratigráficas da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabaçu

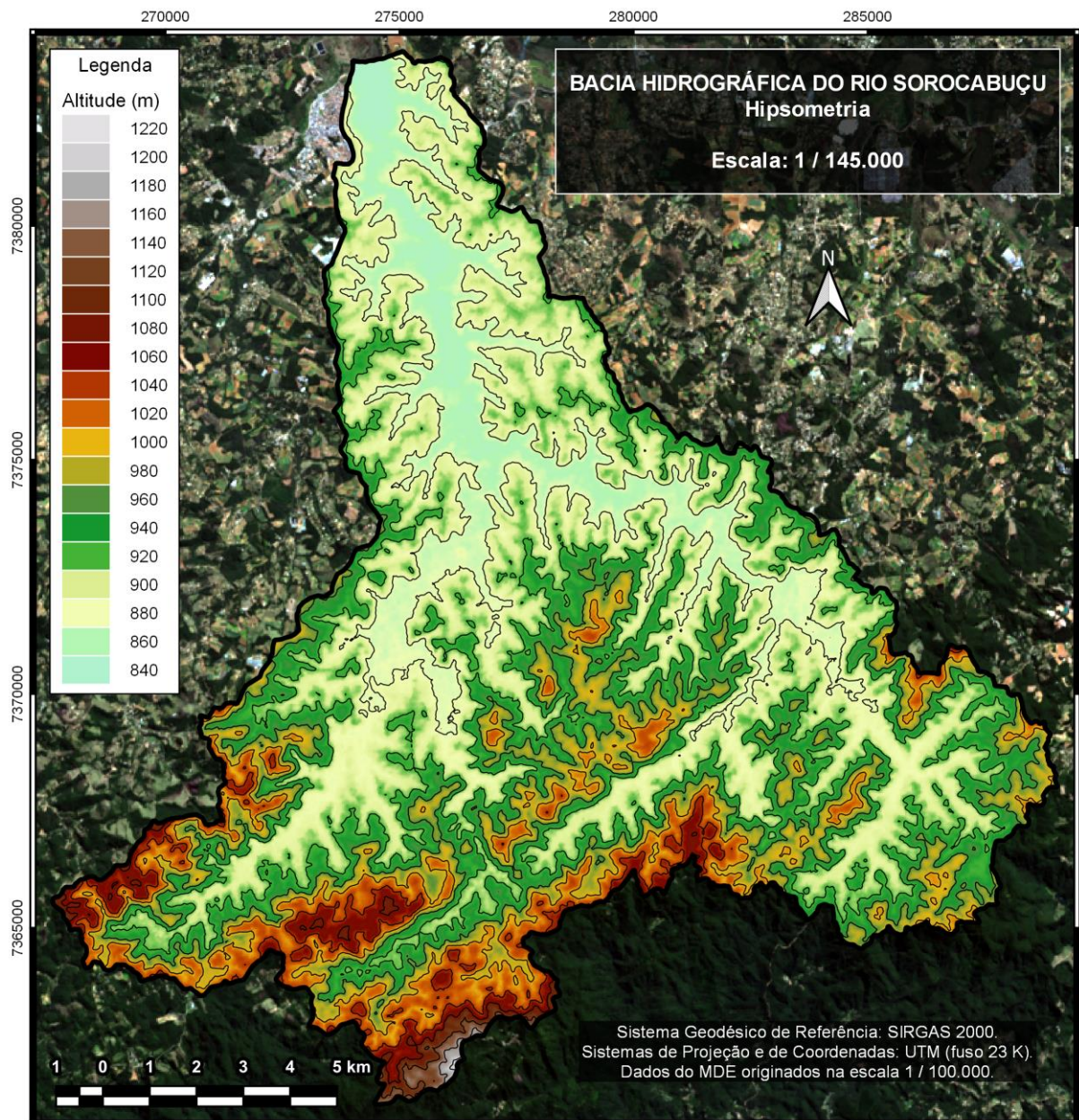


Fonte: Autoria própria. Unidades litoestratigráficas: São Paulo (2014a). Falhas geológicas: CPRM [2015]. Modelo digital de elevação: NASA (2013). Imagem de satélite: NASA (2018a).

A área da BHRS enquadra-se na unidade morfoescultural dos planaltos, mais especificamente, no trecho do Planalto de Ibiúna/São Roque (SÃO PAULO, 2014a, 2014b). Sua geomorfologia corresponde ao padrão que caracteriza o domínio morfoclimático dos “Mares de Morros”, de Ab’Sáber (2008), havendo extensiva convexização das vertentes (mamelonização), intensa decomposição das rochas cristalinas e a formação de planícies meândricas nas calhas fluviais, com a predominância de depósitos finos.

Sua amplitude altimétrica total é de 381 m, variando entre as altitudes de 837 e 1218 m (Figura 7). Em setores do alto curso, a diferença altimétrica entre talvegues e interflúvios ultrapassa 200 m, expressando uma acentuada dissecação do relevo. A altitude média da bacia equivale ao valor de 932 m.

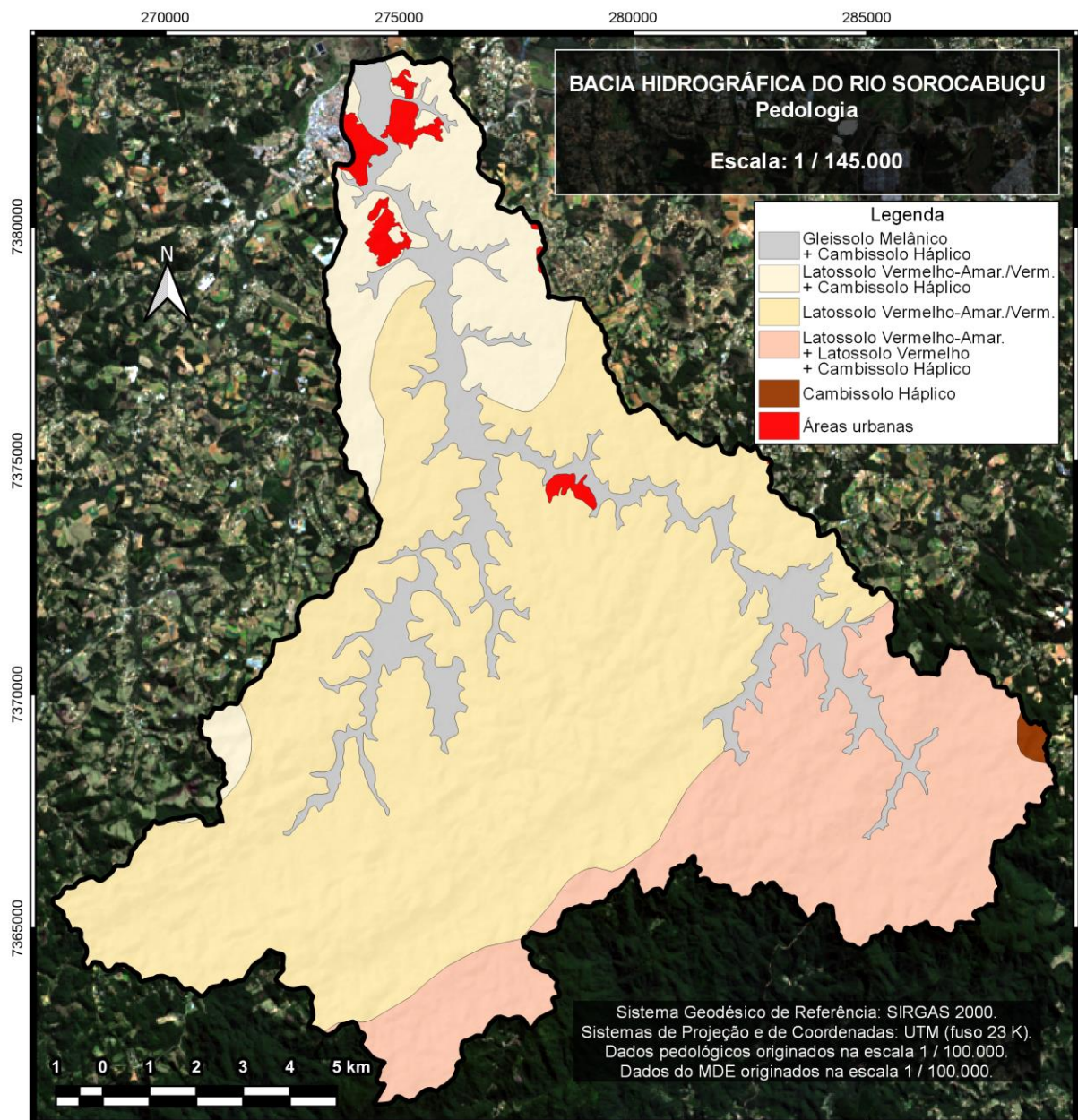
Figura 7 – Hipsometria da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu



Fonte: Autoria própria. Modelo digital de elevação: NASA (2013). Imagem de satélite: NASA (2018a).

A intensa decomposição das rochas cristalinas, em ambiente de clima subtropical úmido, possibilitou a formação de solos bem desenvolvidos, os quais são predominantes na bacia. Conforme o Mapa Pedológico do Estado de São Paulo (ROSSI, 2017a), a área contempla a ocorrência de Latossolos, Gleissolos e Cambissolos (Figura 8). As diferentes tipologias presentes, assim como suas associações, são brevemente descritas no Quadro 1.

Figura 8 – Tipos de solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabaçu



Fonte: Autoria própria. Tipos de solos: Rossi (2017a). Modelo digital de elevação: NASA (2013). Imagem de satélite: NASA (2018a).

Quadro 1 – Descrição dos tipos de solo presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu

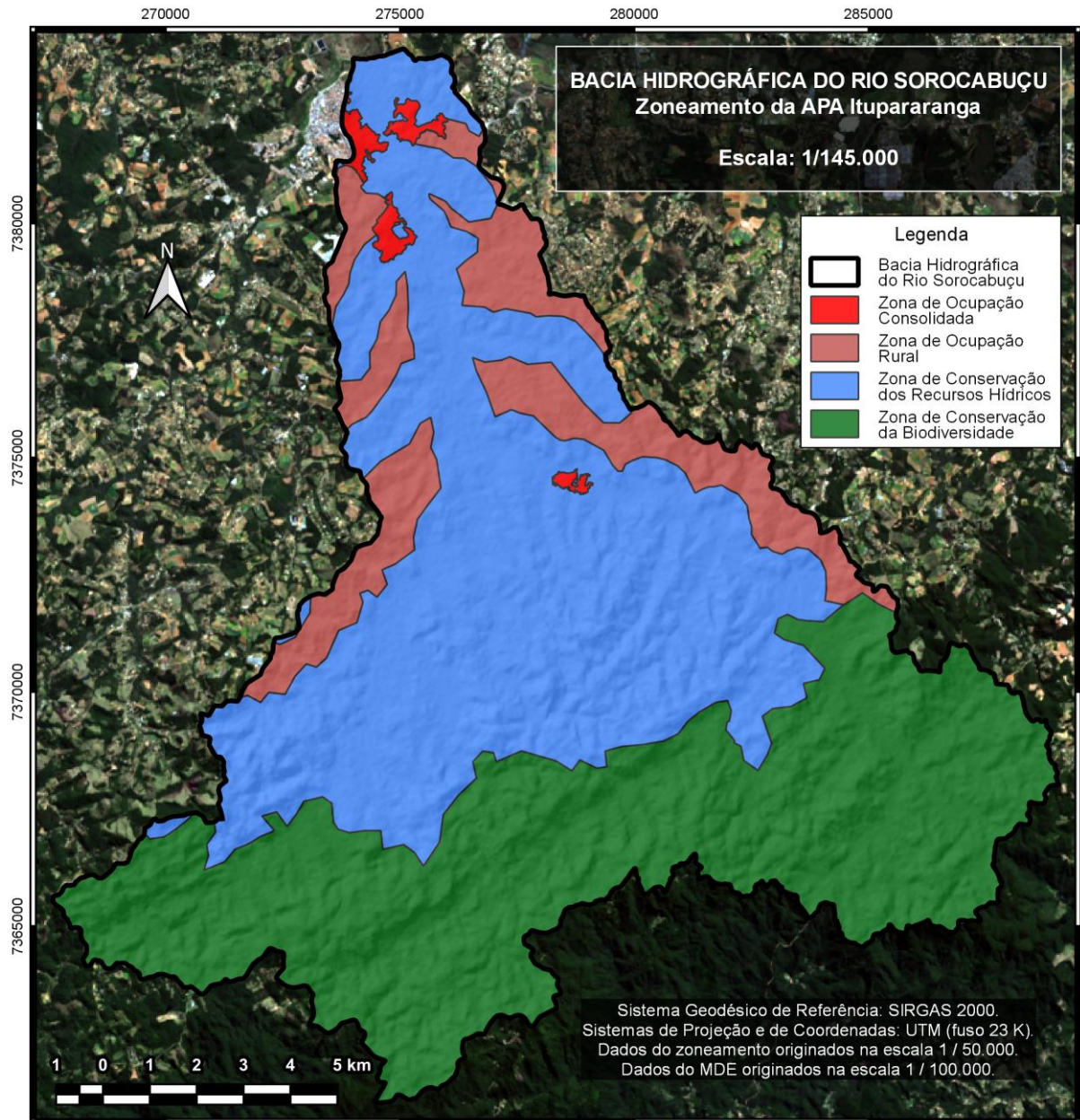
Solo ou associação de solos	Trofismo	Texturas	Profundidade	Outras características
Gleissolo melânico + Cambissolo háplico	Distróficos	Indiscriminada / média e argilosa	Pouco profundos	Hidromorfia
Latossolo vermelho-amarelo/vermelho + Cambissolo háplico	Distróficos	Média ou argilosa	Pouco a muito profundos	Eventualmente pedregosos
Latossolo vermelho-amarelo/vermelho	Distrófico	Argilosa	Muito profundo	-
Latossolo vermelho-amarelo + Latossolo vermelho + Cambissolo háplico	Distróficos	Argilosa e muito argilosa	Pouco a muito profundos	-
Cambissolo háplico	Indiscriminado	Média e argilosa	Pouco profundo	Eventualmente rochoso

Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por Rossi (2017a, 2017b).

A cobertura vegetal da bacia corresponde a uma expressão fisiográfica resultante da combinação desse conjunto de fatores ambientais. A área integra o bioma Mata Atlântica (IBGE, 2019a), situando-se, de acordo com o Instituto Florestal (IF, 2009), numa região de Floresta Ombrófila Densa. Esse tipo vegetacional, de grande riqueza florística, constitui o *core* do bioma Mata Atlântica, localizado junto às áreas costeiras das regiões Sul e Sudeste do Brasil, com clima quente e úmido, sem período seco sistemático, e com amplitudes térmicas amenizadas pela influência marítima (IBGE, 2019b).

Formalmente, os maciços florestais remanescentes estão protegidos pelo zoneamento do Plano de Manejo da APA Itupararanga. A Zona de Conservação da Biodiversidade e a Zona de Conservação dos Recursos Hídricos (Figura 9) possuem restrições expressas quanto à fragmentação dos seus maciços florestais (FF, [2010]). Aproximadamente 87 % da área da bacia está incluída no interior dessas duas zonas.

Figura 9 – Zoneamento da APA Itupararanga na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu



Fonte: Autoria própria. Zoneamento: Gestão da APA Itupararanga [201-]. Modelo digital de elevação: NASA (2013). Imagem de satélite: NASA (2018a).

Não obstante, o zoneamento da APA Itupararanga não tem resultado na proteção efetiva dos remanescentes florestais nessa área, na medida em que o avanço das atividades agrícolas tem promovido a intensa remoção de sua vegetação nativa (CHINAQUE, 2017). Os Planos Diretores municipais não incorporaram as diretrizes estabelecidas pelo Plano de Manejo da APA, de modo que as determinações dos primeiros têm prevalecido sobre as do segundo (ESTANCIONE, 2015). Na BHRS, parte considerável da cobertura vegetal já foi removida, tendo sido substituída por espaços dedicados às atividades agropecuárias.

4.2 Elaboração da base cartográfica de referência

O traçado dos cursos d'água e divisores de drenagem da BHRS foi executado sobre um mosaico de cartas topográficas, produzido pelo Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC) do Estado de São Paulo, a partir do Mapeamento Sistemático do Estado de São Paulo, elaborado na escala 1:10.000 (IGC, 2014). O acesso ao mosaico de cartas ocorre por intermédio de um *link* fornecido no sítio eletrônico da Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo (DataGEO). A base cartográfica foi vetorizada no programa *ArcGIS Desktop 10.6* (ESRI, 2018a), e retificada com base nas imagens atualizadas, de alta resolução espacial, do programa *Google Earth Pro 7.3.2.5776* (GOOGLE, 2019).

4.3 Obtenção e tratamento dos dados orbitais

As imagens multiespectrais empregadas no modelo SEBAL são provenientes dos satélites Landsat 5 e 8, adquiridas no sítio eletrônico da plataforma *EarthExplorer*, vinculada ao *United States Geological Survey* (USGS). Todas são disponibilizadas em conformidade com os padrões de qualidade dos produtos *Level-1*, possuindo garantias de registro, ortorretificação e calibragem radiométrica¹. Isso assegura que as mudanças verificadas nas respostas espectrais, ao longo do tempo e do espaço, sejam decorrentes, unicamente, das modificações no uso e cobertura da terra, e não de possíveis alterações nos instrumentos de medição, possibilitando a realização de comparações entre os dados oriundos dos diferentes sensores (USGS, 2019a). As cenas foram capturadas na órbita 219, ponto 76, durante a estação do inverno, período no qual são menores a cobertura por nuvens e a precipitação na região. A identificação das imagens e a descrição de suas bandas espectrais são apresentadas nos Quadros 2 e 3, respectivamente.

O MDE utilizado corresponde à terceira versão dos dados resultantes da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Nomeado como SRTM3 SRTMGL1, o produto apresenta melhorias relativas ao preenchimento de pixels vazios e à precisão posicional (KOBICK; CRIPPEN, [201-]). Segundo Moraes (2017), até a escala 1:100.000, o referido MDE mantém o Padrão de Exatidão Cartográfica Classe “A”, equivalente à categoria de maior precisão. Igualmente disponível na plataforma *EarthExplorer*, o arquivo SRTM (NASA, 2013) está identificado no Quadro 2, e tem a descrição de sua banda espectral apresentada no Quadro 3.

¹ O SEBAL faz uso de imagens sem correção atmosférica (*Level-1*), as quais são corrigidas durante a determinação do albedo. O modelo ainda não foi adaptado às novas imagens de reflectância da superfície (*Level-2*).

Quadro 2 – Identificação das imagens orbitais empregadas no SEBAL

Plataforma	Identificador	Data de captura
Satélite Landsat 5	LT05_L1TP_219076_20080717_20161030_01_T1	17/07/2008
	LT05_L1TP_219076_20080818_20161030_01_T1	18/08/2008
Satélite Landsat 8	LC08_L1TP_219076_20180814_20180828_01_T1	14/08/2018
	LC08_L1TP_219076_20180830_20180911_01_T1	30/08/2018
Ônibus espacial <i>Endeavour</i>	S24W048.SRTMGL1	11/02/2000

Fonte: Dados dos satélites Landsat: arquivos de metadados das imagens (NASA, 2016a, 2016b, 2018a, 2018b); dados do Ônibus Espacial *Endeavour*: USGS [201-a].

Nota: A imagem do dia 17/07/2008 tem a sua extensão espacial ligeiramente reduzida, não recobrindo a extremidade sul da BHRS. A área faltante é igual a 1,52 km², equivalente a apenas 0,75 % do total da bacia. O Apêndice “A” apresenta a estimativa do impacto da ausência dessa área sobre a variabilidade estatística dos parâmetros biofísicos, assim como explica o porquê da não realização de mosaicos com uma imagem de outra data.

Quadro 3 – Descrição das bandas espectrais das imagens orbitais empregadas no SEBAL

Plataforma	Banda	Descrição	Comprimento de onda (µm)	Resolução espacial (m)	Sensor
Satélite Landsat 5	1	Azul	0,45 - 0,52	30	<i>Thematic Mapper (TM)</i>
	2	Verde	0,52 - 0,60	30	
	3	Vermelho	0,63 - 0,69	30	
	4	Infravermelho próximo	0,76 - 0,90	30	
	5	Infravermelho próximo	1,55 - 1,75	30	
	6	Infravermelho termal	10,40 - 12,50	30 ⁽¹⁾	
	7	Infravermelho médio	2,08 - 2,35	30	
Satélite Landsat 8	2	Azul	0,45 - 0,51	30	<i>Operational Land Imager (OLI)</i>
	3	Verde	0,53 - 0,59	30	
	4	Vermelho	0,64 - 0,67	30	
	5	Infravermelho próximo	0,85 - 0,88	30	
	6	Infrav. de ondas curtas	1,57 - 1,65	30	
	7	Infrav. de ondas curtas	2,11 - 2,29	30	
	10	Infravermelho termal	10,60 - 11,19	30 ⁽²⁾	TIRS
Ônibus Espacial <i>Endeavour</i>	Única	Radar (banda C)	5,6 cm	30	SIR-C / X-SAR

Fonte: Dados dos satélites Landsat 5 e 8: adaptado de USGS [201-b] e USGS (2017); dados do Ônibus Espacial *Endeavour*: USGS [201-c].

Nota: TIRS: *Thermal Infrared Sensor*; SIR-C: *C-band Spaceborne Imaging Radar*; X-SAR: *X-Band Synthetic Aperture Radar*.

⁽¹⁾ Resolução original de 120 m. Resolução final reamostrada pelo fornecedor do produto.

⁽²⁾ Resolução original de 100 m. Resolução final reamostrada pelo fornecedor do produto.

4.4 Obtenção e tratamento dos dados meteorológicos

Conforme Waters *et al.* (2002), os dados de temperatura do ar, necessários ao modelo, devem provir de uma localidade situada a uma distância máxima de 50 km da área de estudo. Dentre as estações meteorológicas que atendem a esse critério, as mais próximas são as instaladas nos municípios de Juquitiba e São Lourenço da Serra, ambas mantidas pelo Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO). O começo da operação desses postos em 2008 determinou o limite inicial do período de estudo, a partir do referido ano. A descrição básica das estações é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição das estações meteorológicas provedoras dos dados de temperatura do ar

Identificação (município)	Localização aproximada (Lat./Long.)	Distância aproximada até a BHRS		Altitude
		Até a extremidade mais próxima da bacia	Até a extremidade mais distante da bacia	
Juquitiba	23,9299° S 47,0728° W	13,0 km	34,9 km	690 m
São Lourenço da Serra	23,8578° S 46,9568° W	14,0 km	35,5 km	713 m

Fonte: Dados de localização e altitude fornecidos por Brunini (2019), servidor do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC); demais informações são de autoria própria.

A despeito da maior proximidade da estação de Juquitiba, deu-se preferência aos dados provenientes da estação de São Lourenço da Serra, devido à sua ligeiramente menor diferença altimétrica em relação à bacia, cuja altitude média é de 932 m. Apenas quando da ausência de dados no posto de São Lourenço da Serra, fez-se uso dos dados derivados do posto de Juquitiba.

O registro da temperatura do ar deve ocorrer, idealmente, no instante da captura da imagem pelo satélite. Em cada uma das estações há dois termômetros automáticos, sendo um deles configurado para a coleta dos dados no intervalo de uma hora, e o outro para o intervalo de vinte minutos. Os horários de captura das imagens pelos satélites Landsat 5 e 8 não coincidem com os de registro das temperaturas pelas estações. Em decorrência desse fato, as temperaturas no momento do imageamento foram interpoladas a partir dos dados computados a cada vinte minutos, e, na ausência desses, a partir dos registrados a cada hora. O procedimento foi baseado na aplicação do modelo de interpolação linear. A Tabela 2 apresenta as temperaturas finais, referentes aos instantes da captura de cada imagem.

Tabela 2 – Interpolação dos valores de temperatura do ar para os horários de captura das imagens

Data de captura da imagem	Horário de captura da imagem	Horários de registro da temperatura	Valores originais de temperatura	Temperatura interpolada para o horário de captura da imagem
17/07/08	09 h 51 min 08 s	09 h 00 min 00 s 10 h 00 min 00 s	9,56 °C 16,57 °C	15,53 °C
18/08/08	09 h 50 min 12 s	09 h 00 min 00 s 10 h 00 min 00 s	16,74 °C ⁽¹⁾ 22,02 °C ⁽²⁾	21,16 °C
14/08/18	10 h 03 min 47 s	10 h 00 min 00 s 10 h 20 min 00 s	19,32 °C 20,30 °C	19,51 °C
30/08/18	10 h 03 min 54 s	10 h 00 min 00 s 10 h 20 min 00 s	24,19 °C 25,14 °C	24,37 °C

Fonte: Horários de captura das imagens: adaptado a partir dos respectivos arquivos de metadados (NASA, 2016a, 2016b, 2018a, 2018b); horários de registro e valores originais de temperatura: CIIAGRO (2019); demais informações são de autoria própria.

Notas: Os dados históricos de temperatura fornecidos pelo CIIAGRO têm acesso restrito, sendo disponibilizados a partir de solicitação prévia.

Todos os horários são referentes ao Horário Oficial de Brasília.

^(1, 2) Dados oriundos da estação de Juquitiba, devido à ausência de registros na estação de São Lourenço da Serra, na respectiva data.

Quanto aos dados pluviométricos, esses foram analisados no intuito de identificar eventos chuvosos significativos, ocorridos em datas anteriores às de captura das imagens. As estações meteorológicas mencionadas também contribuíram com o provimento de dados de precipitação diária acumulada, usados na avaliação de alguma possível influência dos eventos chuvosos sobre os registros de temperatura. Além dessas, outras duas estações pluviométricas, mantidas pelo DAEE (Tabela 3), também forneceram dados de precipitação diária acumulada, utilizados na estimativa de alguma possível influência dos eventos pluviométricos sobre a dinâmica dos parâmetros biofísicos, na área da bacia. Os registros obtidos no conjunto dessas estações são apresentados na Tabela 4, enquanto suas respectivas localizações são destacadas no mapa da Figura 10.

Tabela 3 – Descrição das estações pluviométricas próximas à BHRS

Identificação / prefixo	Localização aproximada (Lat./Long.)	Altitude aproximada
Ibiúna / E4-047	23° 39' 00" S / 47° 13' 00" W	888 m
Mato do Gado / E4-131	23° 43' 00" S / 47° 07' 00" W	943 m

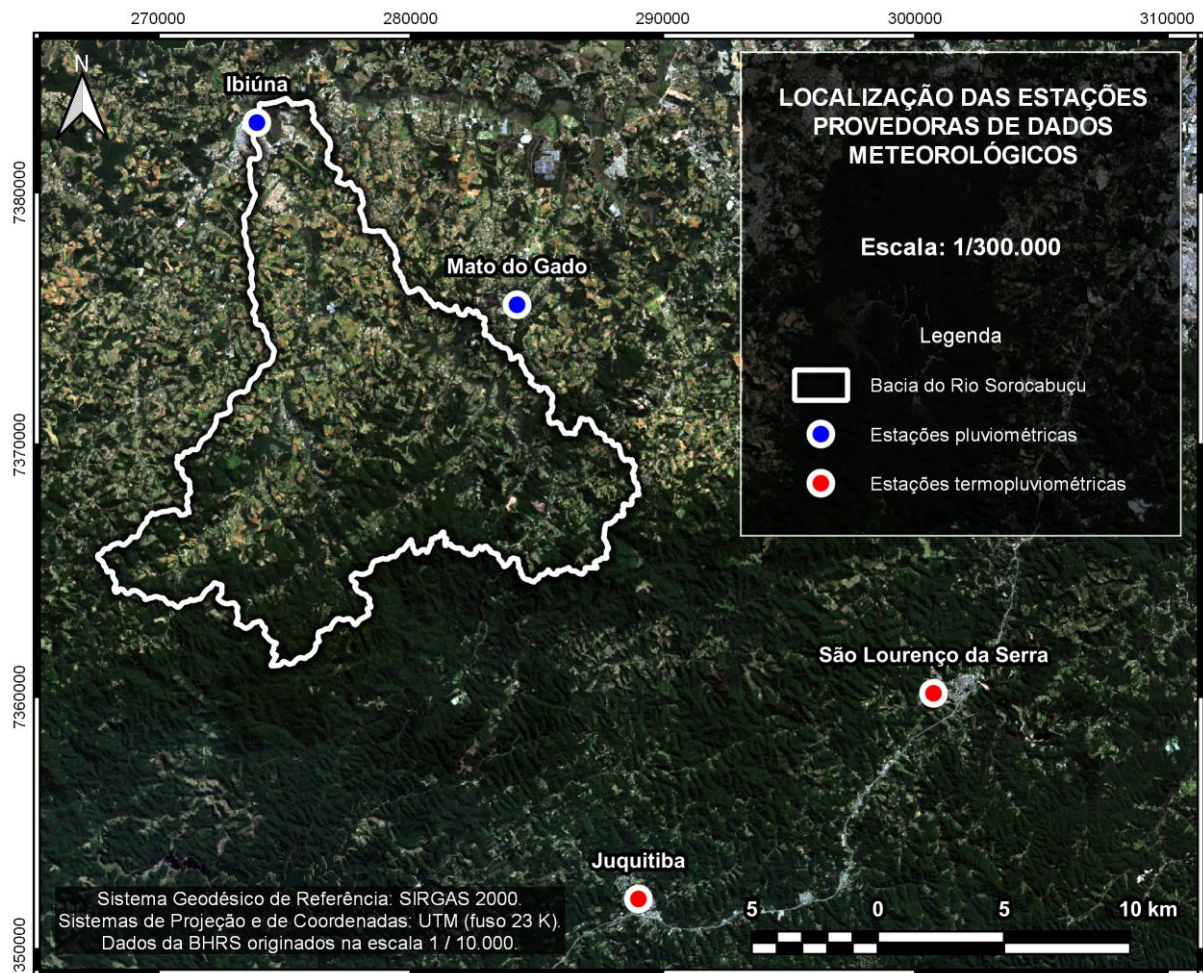
Fontes: Identificação e localização: DAEE (2019); altitudes: estimadas a partir do MDE SRTM (NASA, 2013).

Tabela 4 – Acumulados pluviométricos diários durante os sete dias anteriores às datas de captura de cada imagem

Datas de captura das imagens	Datas anteriores às de captura das imagens	Precipitação diária acumulada (mm)			
		Estação Ibiúna	Estação Mato do Gado	Estação São Lourenço da Serra	Estação Juquitiba
17/07/08	16/07/08	0,0	0,1	0,3	0,3
	15/07/08	0,0	0,2	0,0	0,0
	14/07/08	0,0	0,2	0,0	0,3
	13/07/08	0,0	0,1	0,0	0,3
	12/07/08	0,0	0,0	0,0	0,0
	11/07/08	0,0	0,1	0,3	0,0
	10/07/08	0,0	0,0	0,0	0,0
18/08/08	17/08/08	0,0	0,0	0,0	0,0
	16/08/08	0,0	0,0	0,0	0,0
	15/08/08	0,0	0,2	0,3	0,5
	14/08/08	0,0	0,3	7,9	5,3
	13/08/08	6,2	7,9	9,1	2,8
	12/08/08	0,0	0,2	0,0	0,6
	11/08/08	0,0	0,1	0,0	0,0
14/08/18	13/08/18	9,1	0,0	0,0	Sem dados
	12/08/18	0,6	0,0	0,0	Sem dados
	11/08/18	0,9	0,0	0,0	Sem dados
	10/08/18	0,8	1,9	0,0	Sem dados
	09/08/18	0,8	0,2	0,0	Sem dados
	08/08/18	0,5	2,9	2,3	Sem dados
	07/08/18	1,4	0,0	Sem dados	Sem dados
30/08/18	29/08/18	1,3	0,0	0,0	0,0
	28/08/18	1,2	0,0	0,0	Sem dados
	27/08/18	23,2	0,0	0,0	Sem dados
	26/08/18	20,4	0,0	1,0	Sem dados
	25/08/18	1,9	0,0	1,3	Sem dados
	24/08/18	0,7	5,5	14,5	Sem dados
	23/08/18	0,3	10	0,0	Sem dados

Fonte: Estações Ibiúna e Mato do Gado: DAEE (2019); estações São L. da Serra e Juquitiba: CIIAGRO (2019).

Figura 10 – Localização das estações provedoras de dados meteorológicos



Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2018a, 2018c), CIIAGRO (2019) e DAEE (2019).

4.5 Classificação das imagens e mapeamento das categorias de uso e cobertura da terra

Para a determinação da distribuição das áreas ocupadas pelas principais categorias de uso e cobertura utilizou-se as imagens já submetidas à correção atmosférica, correspondentes aos produtos *Level-2*, também disponíveis no site eletrônico da plataforma *EarthExplorer*. As novas imagens (NASA, 2019a, 2019b, 2019c, 2019d) são referentes às mesmas cenas discriminadas anteriormente, mas seus dados fornecem uma estimativa direta da reflectância da superfície, livre da dispersão e absorção atmosféricas (USGS, [201-d, 201-e]).

A composição multibanda RGB (*red, green, blue*) que apresentou o melhor contraste visual diz respeito à combinação 453 (Landsat 5) / 564 (Landsat 8), tendo sido adotada para a identificação dos alvos. Foram classificadas as composições elaboradas a partir das imagens obtidas nas quatro diferentes datas, empregando-se o algoritmo *Maximum Likelihood*,

presente no programa *ArcGIS Desktop 10.6* (ESRI, 2018a). Esse processo possibilitou a extração das principais classes de uso e cobertura da terra, a saber: vegetação arbórea, culturas, pastagem, corpos hídricos, áreas urbanas e solo exposto. A classe “vegetação arbórea” inclui a floresta nativa e as áreas de silvicultura, devido à dificuldade de separação espectral precisa entre ambos os tipos de vegetação arbórea. A classe “culturas” abrange principalmente os cultivos em fase de crescimento vegetativo, enquanto aqueles em fase de pós-colheita podem eventualmente ter sido associados à classe de “pastagem”, em função de sua semelhança espectral com essa categoria. A classe “solo exposto” engloba tanto as áreas de solo preparado para o cultivo, quanto os demais espaços desprovidos de qualquer forma de cobertura. A classe “áreas urbanas” contempla a parte da cidade de Ibiúna situada no interior da bacia, bem como a área referente ao bairro Sorocabuçu.

Com vistas à diminuição do ruído e ao aprimoramento do traçado dos limites entre as classes, as imagens classificadas foram submetidas aos processos de filtragem (ferramenta *Majority Filter*, com máscara ortogonal de 4x4) e generalização (ferramentas *Region Group*, *Set Null* e *Nibble*), segundo a metodologia descrita em ESRI (2019). Ao fim, realizou-se a avaliação da acurácia dos procedimentos de classificação, mediante o cálculo do Índice Kappa, em conformidade com Parece, Campbell e McGee [2014], e ESRI (2018b).

4.6 Implementação do modelo SEBAL

4.6.1 Modelo SEBAL aplicado a imagens Landsat 5

Toda a sequência de processamentos do algoritmo SEBAL foi automatizada através da construção de um modelo (ferramenta *ModelBuilder*) no programa *ArcGIS Desktop 10.6* (ESRI, 2018a). Após a reprojeção das imagens para o Hemisfério Sul, e o seu recorte a partir dos limites da bacia, aplicou-se às cenas provenientes do satélite Landsat 5 a série de equações apresentadas a seguir.

A radiância espectral (L) em cada banda (λ), designada como L_λ , é dada em $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$, e definida por Waters *et al.* (2002) como a energia radiante em determinada faixa espectral, no topo da atmosfera, de onde é registrada pelos satélites. Deve ser calculada conforme a Equação 7:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX - LMIN}{255} \right) \cdot DN + LMIN \quad (7)$$

em que “LMAX” e “LMIN” se referem, respectivamente, às constantes de calibração máxima e mínima, para cada banda; e “DN” ao número digital de cada pixel. Os valores de LMAX e LMIN, para as cenas processadas após 02/04/2007, foram determinados por Chander, Markham e Barsi (2007), estando disponíveis, também, nos arquivos de metadados das imagens, equivalendo aos parâmetros “RADIANCE_MAXIMUM” e “RADIANCE_MINIMUM”, em $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$.

A refletância planetária em cada banda (ρ_{λ}), expressa em valores adimensionais, corresponde à razão entre os fluxos de radiação solar refletida e incidente, nas respectivas faixas espectrais, excetuada a banda termal (6), para a qual o conceito não é aplicável (WATERS *et al.*, 2002). Pode ser obtida por meio da Equação 8, modificada a partir de Waters *et al.* (2002), Chander e Markham (2003), e USGS (2019b):

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d_{e-s}^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \sin \theta_{SE}} \quad (8)$$

na qual “ d_{e-s} ” se refere à distância relativa entre a Terra e o Sol, em unidades astronômicas, informada no parâmetro “EARTH_SUN_DISTANCE” dos metadados; “ $ESUN_{\lambda}$ ” aos valores da irradiância solar exoatmosférica média em cada banda, apresentados na Tabela 5; e “ θ_{SE} ” ao ângulo de elevação solar, cujo valor consta, em graus, no metadado “SUN_ELEVATION”.

O albedo no topo da atmosfera (α_{toa}), dado em valores adimensionais, diz respeito à razão entre o conjunto dos fluxos de radiação solar refletida e o conjunto dos fluxos de radiação solar incidente, quando ainda não efetuada a correção atmosférica (WATERS *et al.*, 2002). É determinado por intermédio da Equação 9, modificada a partir de Waters *et al.* (2002) e Batista *et al.* (2013):

$$\alpha_{toa} = (\omega_1 \cdot \rho_1) + (\omega_2 \cdot \rho_2) + (\omega_3 \cdot \rho_3) + (\omega_4 \cdot \rho_4) + (\omega_5 \cdot \rho_5) + (\omega_7 \cdot \rho_7) \quad (9)$$

sendo “ ω_{λ} ” correspondente aos coeficientes de peso para cada uma das bandas, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de $ESUN_{\lambda}$ e ω_{λ} para as bandas espectrais do satélite Landsat 5

Banda espectral (λ)	$ESUN_{\lambda}$ – em $W/(m^2 \cdot \mu m)$	ω_{λ}
1	1957	0,293462
2	1826	0,273818
3	1554	0,233030
4	1036	0,155353
5	215	0,032240
7	80,67	0,012097

Fonte: $ESUN_{\lambda}$: Chander e Markham (2003); ω_{λ} : autoria própria, a partir da divisão de cada valor individual de $ESUN_{\lambda}$ pelo somatório de todos os valores de $ESUN_{\lambda}$, segundo o proposto por Waters *et al.* (2002).

A transmissividade da atmosfera para ondas curtas (τ_{SW}), expressa em valores adimensionais, refere-se à porção fracional da radiação solar, direta e difusa, transmitida através da atmosfera até a superfície (WATERS *et al.*, 2002). Sua estimativa ocorre mediante a aplicação da Equação 10:

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

em que os valores de “z” são as altitudes (em metros) de cada pixel pertencente ao MDE (BEZERRA; SILVA; BEZERRA, 2011).

O albedo da superfície (α), dado em valores adimensionais, é atinente à razão entre o conjunto dos fluxos de radiação solar refletida e o conjunto dos fluxos de radiação solar incidente, quando devidamente efetuada a correção atmosférica (WATERS *et al.*, 2002). Deve ser calculado em conformidade com a Equação 11:

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{path_radiance}}{\tau_{SW}^2} \quad (11)$$

na qual “ $\alpha_{path_radiance}$ ” equivale ao valor adimensional de “0,03”, relativo à porção da radiação solar espalhada pela atmosfera, na direção do satélite, antes de incidir sobre a superfície.

A radiação de onda curta incidente (R_{SI}), em W/m^2 , é definida como a medida da densidade de fluxo da radiação solar, direta e difusa, que atinge a superfície. Pode ser estimada por meio da Equação 12, modificada a partir de Waters *et al.* (2002):

$$R_{S\downarrow} = G_{SC} \cdot \sin \theta_{SE} \cdot \frac{1}{d_{e-s}^2} \cdot \tau_{SW} \quad (12)$$

sendo “ G_{SC} ” referente à constante solar (1367 W/m^2).

A emissividade constitui-se na capacidade de emissão de radiação por um corpo qualquer, quando comparada à emissão de radiação por um corpo negro, à mesma temperatura (LUCENA; PERES; MARINO, 2019). A emissividade atmosférica (ε_a), expressa em valores adimensionais, é determinada por intermédio da Equação 13 (WATERS *et al.*, 2002):

$$\varepsilon_a = 0,85 \cdot (-\ln \tau_{SW})^{0,09} \quad (13)$$

A radiação de onda longa incidente ($R_{L\downarrow}$), em W/m^2 , diz respeito ao fluxo de radiação termal descendente emanado a partir da atmosfera (WATERS *et al.*, 2002). Sua estimativa dá-se mediante a aplicação da Equação 14:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (14)$$

em que “ σ ” é atinente à constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$); e “ T_a ” à temperatura do ar (em kelvin), registrada pela estação meteorológica.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) –, dado em valores entre -1 e 1, corresponde à razão entre a subtração e a soma das reflectâncias nas bandas do infravermelho próximo e do vermelho, conforme a Equação 15 (WATERS *et al.*, 2002):

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (15)$$

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo – *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) – é expresso em valores que variam de -1 a 1, e busca eliminar os efeitos decorrentes da interferência do solo sobre os resultados do NDVI. Deriva da implementação da Equação 16, modificada a partir de Waters *et al.* (2002):

$$SAVI = \frac{(1 + l) \cdot (\rho_4 - \rho_3)}{(l + \rho_4 + \rho_3)} \quad (16)$$

na qual “*l*” equivale ao valor adimensional de “0,5”, relativo ao fator de ajuste ao solo (GOMES; SANTOS; ALMEIDA, 2013).

O Índice de Área Foliar – *Leaf Area Index* (LAI) –, dado em valores adimensionais, refere-se à razão entre a área correspondente à superfície de todas as folhas numa determinada porção do terreno e a área desse espaço. Sua estimativa é efetuada em conformidade com a Equação 17 (WATERS *et al.*, 2002):

$$LAI = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (17)$$

A emissividade da superfície na faixa termal entre 10,4 e 12,5 μm (ϵ_{NB}), expressa em valores adimensionais, deve ser calculada apenas sobre os pixels cujos valores de NDVI sejam maiores do que 0 (zero), e cujos valores de LAI sejam menores do que 3, aplicando-se a Equação 18 (WATERS *et al.*, 2002):

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 \cdot LAI \quad (18)$$

Caso os valores de NDVI sejam inferiores a 0, deve-se atribuir aos correspondentes pixels de ϵ_{NB} o valor “0,99”. Nos casos em que os valores de NDVI sejam superiores a 0, e os de LAI maiores ou iguais a 3, deve-se atribuir o valor “0,98”. Condicionamentos tais como esses são implementados através da função “Con”, nas janelas da ferramenta *Raster Calculator* associadas a cada procedimento.

A emissividade da superfície na faixa termal entre 6 e 14 μm (ϵ_o), dada em valores adimensionais, deve ser calculada apenas sobre os pixels cujos valores de NDVI sejam maiores do que 0, e cujos valores de LAI sejam menores do que 3, aplicando-se a Equação 19 (WATERS *et al.*, 2002):

$$\epsilon_o = 0,95 + 0,01 \cdot LAI \quad (19)$$

Caso os valores de NDVI sejam inferiores a 0, deve-se atribuir aos correspondentes pixels de ϵ_o o valor “0,985”. Nos casos em que os valores de NDVI sejam superiores a 0, e os de LAI maiores ou iguais a 3, deve-se atribuir o valor “0,98”.

A temperatura da superfície (T_s), em K (T_{SK}), é obtida por intermédio da Equação 20, modificada a partir de Waters *et al.* (2002) e Chander e Markham (2003):

$$T_{SK} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} \cdot K_1}{L_6} + 1\right)} \quad (20)$$

sendo “ K_1 ” e “ K_2 ” concernentes às constantes de calibração da radiância na banda termal, informadas, respectivamente, nos parâmetros dos metadados “ $K1_CONSTANT_BAND_6$ ”, em $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$, e “ $K2_CONSTANT_BAND_6$ ”, em K.

A radiação de onda longa emitida ($R_{L\uparrow}$), em W/m^2 , é definida como o fluxo de radiação termal emanado a partir da superfície terrestre para a atmosfera. Sua determinação dá-se de acordo com a Equação 21 (WATERS *et al.*, 2002):

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_o \cdot \sigma \cdot T_{SK}^4 \quad (21)$$

O saldo de radiação na superfície (R_n), em W/m^2 , constitui-se na energia radiante instantânea disponível à superfície terrestre, computada segundo o estabelecido na Equação 22 (WATERS *et al.*, 2002):

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o) \cdot R_{L\downarrow} \quad (22)$$

A temperatura da superfície, em $^{\circ}C$ (T_{SC}), deriva da aplicação da Equação 23:

$$T_{SC} = T_{SK} - 273,15 \quad (23)$$

Por fim, o fluxo de calor no solo (G), em W/m^2 , diz respeito à medida do armazenamento de energia térmica no solo e na vegetação, decorrente da condução de calor. É calculado conforme a Equação 24, aplicável apenas sobre os pixels cujos valores de NDVI sejam maiores ou iguais a 0 (WATERS *et al.*, 2002):

$$G = \left\{ \frac{T_{SC}}{\alpha} \cdot [(0,0038 \cdot \alpha) + (0,0074 \cdot \alpha^2)] \cdot [1 - (0,98 \cdot NDVI^4)] \right\} \cdot R_n \quad (24)$$

Para pixels representativos de corpos hídricos ($NDVI < 0$), mais propriamente, lagos rasos ou de águas turbidas, a energia térmica armazenada (G_{water}) é estimada segundo a Equação 25 (WATERS *et al.*, 2002):

$$G_{water} = 0,5 \cdot R_n \quad (25)$$

O modo de transcrição das equações para a área de cálculo da ferramenta *Raster Calculator*, no aplicativo *ArcGIS Desktop 10.6* (ESRI, 2018a), é demonstrado no Quadro 4.

Quadro 4 – Transcrição das equações 7 a 25 para a ferramenta *Raster Calculator*

Equação	Transcrição
L_λ	$((193 - (-1.52)) / 255) * \%Banda_1\% + (-1.52)$
ρ_λ	$(3.14159265 * \%L_1\% * Square(1.0121219)) / (1957 * (Sin(40.39365164 * 0.01745329)))$
α_{toa}	$(0.293462 * \%p_1\%) + (0.273818 * \%p_2\%) + (0.233030 * \%p_3\%) + (0.155353 * \%p_4\%) + (0.032240 * \%p_5\%) + (0.012097 * \%p_7\%)$
τ_{SW}	$(0.00002 * \%SRTM\%) + 0.75$
α	$(\% \alpha_{toa}\% - 0.03) / Square(\% \tau_{SW}\%)$
$R_{S\downarrow}$	$1367 * Sin(40.39365164 * 0.01745329) * (1 / Square(1.0121219)) * \% \tau_{SW}\%$
ε_a	$Power((-Ln(\% \tau_{SW}\%), 0.09) * 0.85$
$R_{L\downarrow}$	$(294.31 ** 4) * 0.0000000567 * \% \varepsilon_a\%$
NDVI	$(\%p_4\% - \%p_3\%) / (\%p_4\% + \%p_3\%)$
SAVI	$(1.5 * (\%p_4\% - \%p_3\%)) / (0.5 + \%p_4\% + \%p_3\%)$
LAI	$- ((Ln((0.69 - \%SAVI\%) / 0.59)) / 0.91)$
ε_{NB}	$Con(\%NDVI\% > 0, Con(\%LAI\% < 3, 0.97 + (0.0033 * \%LAI\%), 0.98), 0.99)$
ε_o	$Con(\%NDVI\% > 0, Con(\%LAI\% < 3, 0.95 + (0.01 * \%LAI\%), 0.98), 0.985)$
T_{SK}	$1260.56 / Ln(((\% \varepsilon_{NB}\% * 607.76) / \%L_6\%) + 1)$
$R_{L\uparrow}$	$Power(\%T_{SK}\%, 4) * 0.0000000567 * \% \varepsilon_o\%$
R_n	$((1 - \% \alpha\%) * \%R_{S\downarrow}\%) + \%R_{L\downarrow}\% - \%R_{L\uparrow}\% - ((1 - \% \varepsilon_o\%) * \%R_{L\downarrow}\%)$
T_{SC}	$\%T_{SK}\% - 273.15$
G	$Con(\%NDVI\% \geq 0, ((\%T_{SC}\% / \% \alpha\%) * ((0.0038 * \% \alpha\%) + (0.0074 * Power(\% \alpha\%, 2)))) * (1 - (0.98 * Power(\%NDVI\%, 4)))) * \%R_n\%, \%R_n\% * 0.5)$

Fonte: Autoria própria.

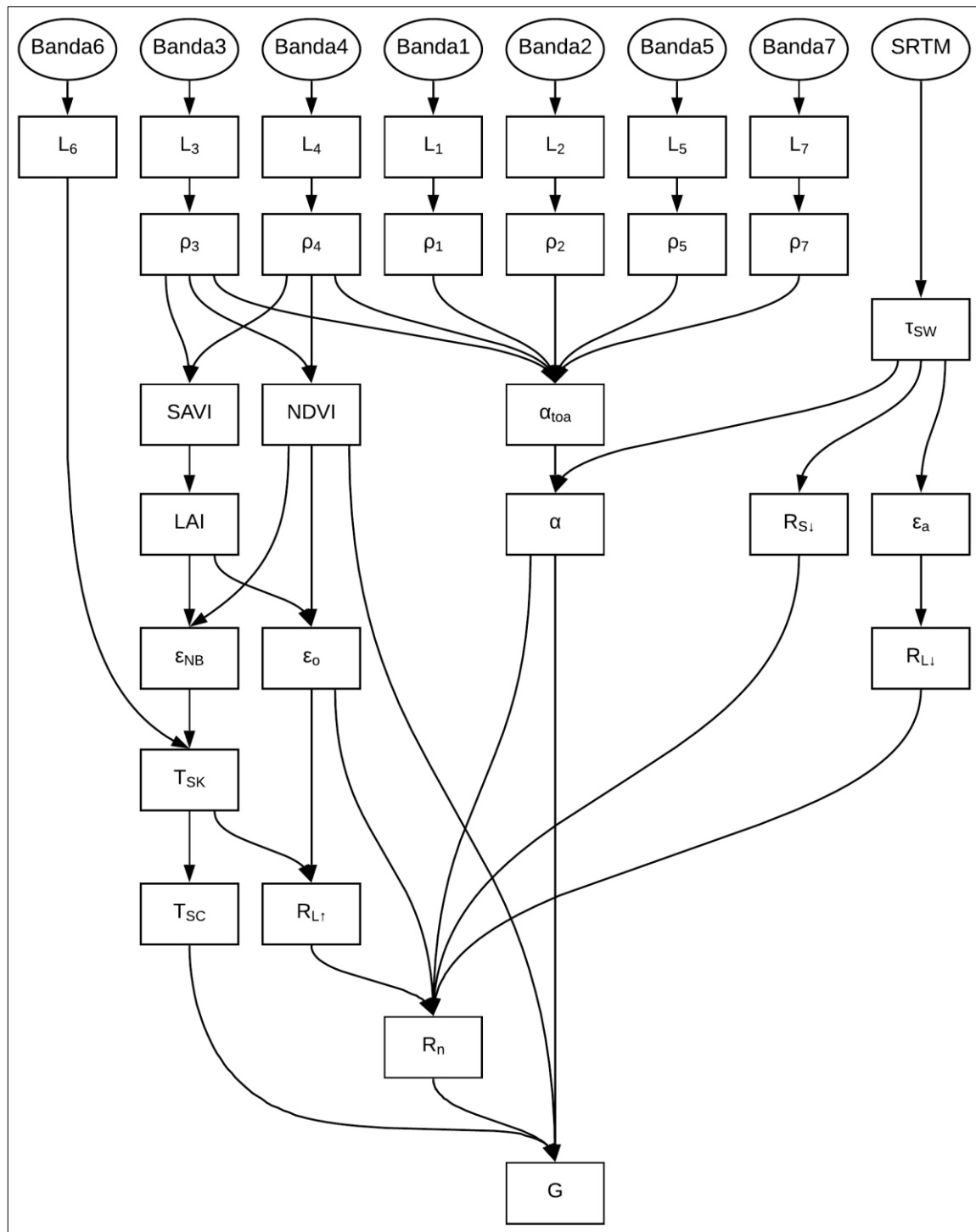
Notas: O coeficiente “0.01745329” (presente nas equações ρ_λ e $R_{S\downarrow}$) converte os valores angulares, dados em graus, para radianos, a unidade adotada pela calculadora raster do ArcGIS.

Informações destacadas em negrito referem-se a parâmetros cujos valores devem ter a sua substituição realizada em concordância com os dados de cada imagem, ou de suas respectivas bandas espectrais, constando aqui apenas como forma de exemplificação.

Informações ladeadas pelo sinal de aspas duplas (") e pelo símbolo de porcentagem (%) devem ser alteradas para a identificação atribuída a cada arquivo raster, podendo ser designadas livremente.

A sequência de implementação das equações é apresentada no fluxograma da Figura 11.

Figura 11 – Sequência de implementação das equações do modelo SEBAL com o uso de imagens do satélite Landsat 5



Fonte: Autoria própria.

4.6.2 Modelo SEBAL aplicado a imagens Landsat 8

Em se tratando das imagens provenientes do satélite Landsat 8, a conversão dos valores originais de DN em radiância espectral é aplicável apenas à banda termal (10)², conforme a Equação 26 (USGS, 2019b):

$$L_{10} = M_L \cdot Q_{cal} + A_L \quad (26)$$

em que “M_L” e “A_L” correspondem, respectivamente, aos fatores de escalonamento multiplicativo e aditivo da radiância, informados nos parâmetros dos metadados “RADIANCE_MULT_BAND_10” e “RADIANCE_ADD_BAND_10”; enquanto “Q_{cal}” se refere aos valores de cada pixel (DN).

A reflectância planetária em cada banda, excetuando-se a termal, deve ser calculada de acordo com a Equação 27, modificada a partir de USGS (2019b) e Silva *et al.* (2016):

$$\rho_\lambda = \frac{M_p \cdot Q_{cal} + A_p}{\sin \theta_{SE} \cdot \left(\frac{1}{d_{e-s}}\right)^2} \quad (27)$$

na qual “M_p” e “A_p” equivalem, respectivamente, aos fatores de escalonamento multiplicativo e aditivo da reflectância, em cada banda, disponíveis nos parâmetros dos metadados “REFLECTANCE_MULT_BAND” e “REFLECTANCE_ADD_BAND”.

Os demais procedimentos seguiram a mesma metodologia empregada no processamento das imagens Landsat 5, tal como também adotado em Pereira e Tavares Júnior (2017). Para além da diferente identificação numérica das bandas nas imagens Landsat 8, as únicas alterações dizem respeito aos valores dos coeficientes de peso utilizados no cômputo do albedo no topo da atmosfera (Tabela 6) e aos valores das constantes K₁ e K₂ (parâmetros “K1_CONSTANT_BAND_10” e “K2_CONSTANT_BAND_10”).

O modo de transcrição das equações 26 e 27 para a área de cálculo da ferramenta *Raster Calculator* é demonstrado no Quadro 5.

² A banda 11 também se constitui numa banda termal; porém, ainda não é recomendado o seu emprego na determinação da temperatura da superfície, devido à maior incerteza associada à sua calibração (USGS, 2019b).

Tabela 6 – Valores de ω_λ para as bandas espectrais do satélite Landsat 8

Banda espectral (λ)	ω_λ
2	0,300
3	0,277
4	0,233
5	0,143
6	0,036
7	0,012

Fonte: Silva *et al.* (2016).

Quadro 5 – Transcrição das equações 26 e 27 para a ferramenta *Raster Calculator*

Equação	Transcrição
L_{10}	(0.0003342 * "%Banda_10%") + 0.1
ρ_λ	((0.00002 * "%Banda_2%") + (-0.1)) / (Sin(46.11727539 * 0.01745329) * Square(1 / 1.0096443))

Fonte: Autoria própria.

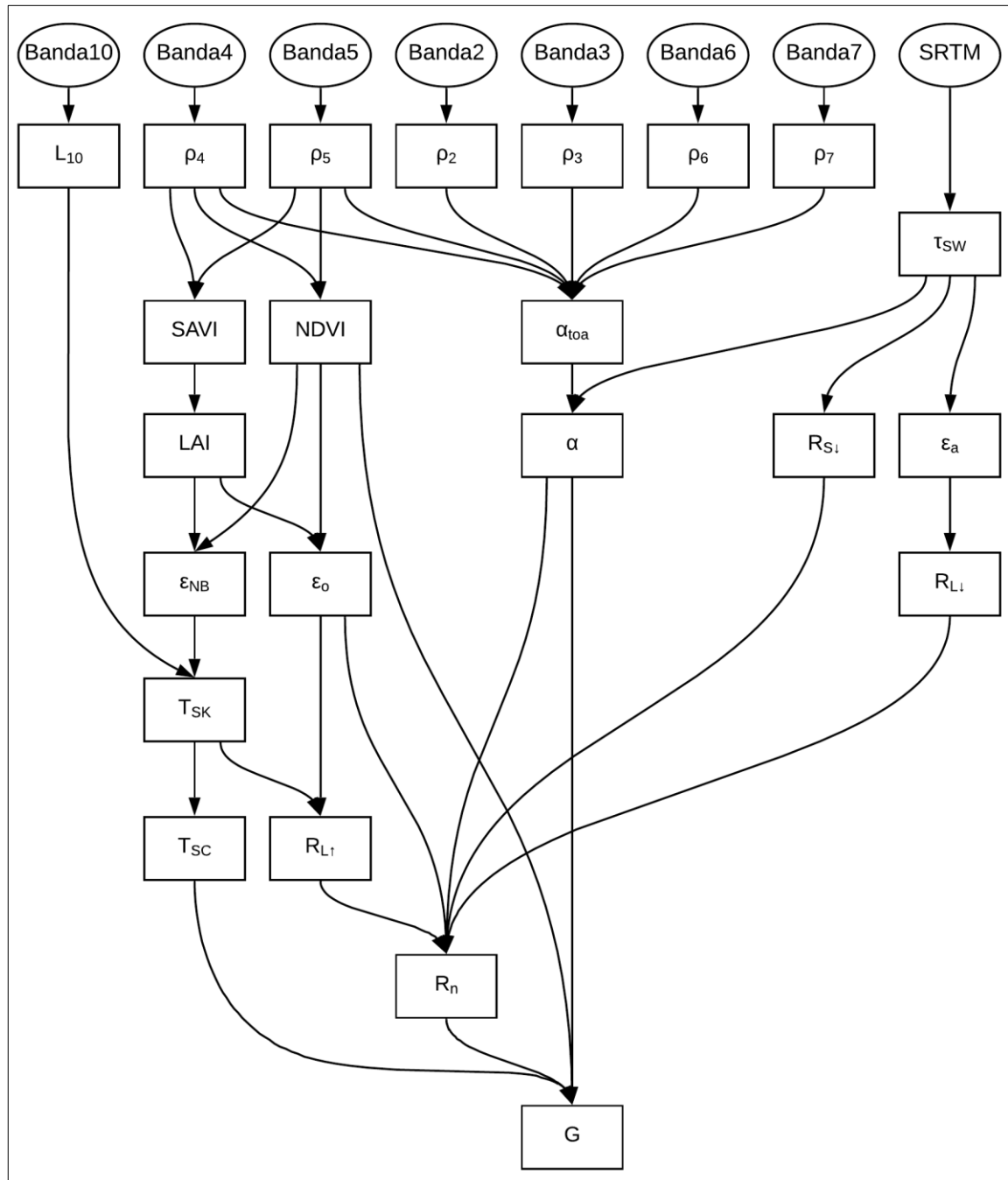
Notas: O coeficiente “0.01745329” (presente na equação ρ_λ) converte os valores angulares, dados em graus, para radianos, a unidade adotada pela calculadora raster do ArcGIS.

Informações destacadas em negrito referem-se a parâmetros cujos valores devem ter a sua substituição realizada em concordância com os dados de cada imagem, ou de suas respectivas bandas espectrais, constando aqui apenas como forma de exemplificação.

Informações ladeadas pelo sinal de aspas duplas (") e pelo símbolo de porcentagem (%) devem ser alteradas para a identificação atribuída a cada arquivo raster, podendo ser designadas livremente.

A sequência de implementação das equações do modelo SEBAL em imagens Landsat 8 é apresentada no fluxograma da Figura 12.

Figura 12 – Sequência de implementação das equações do modelo SEBAL com o uso de imagens do satélite Landsat 8



Fonte: Autoria própria.

4.7 Subtração entre imagens de albedo da superfície

Operações de subtração entre imagens de satélites são empregadas para realçar as diferenças espectrais entre os alvos, sendo um recurso de grande praticidade na detecção de alterações ao longo do tempo (MENESES; ALMEIDA, 2012). Devido a determinadas características das imagens de albedo (que serão oportunamente discutidas a diante), a técnica de subtração “pixel a pixel” pode ser empregada na identificação do sentido e intensidade das alterações no comportamento energético da superfície, decorrentes das mudanças no uso e cobertura da terra.

De acordo com Robinove (1983), quando uma imagem de albedo referente a um momento anterior é subtraída de outra referente a um momento posterior, o resultado é um mapa de variação do albedo, cujos pixels de sinal positivo indicam os locais nos quais os valores desse parâmetro foram submetidos a um incremento, enquanto os pixels de sinal negativo atestam o contrário. O procedimento foi implementado conforme a Equação 28:

$$\text{Diferença entre imagens de albedo} = \alpha_{2018} - \alpha_{2008} \quad (28)$$

em que “ α_{2008} ” e “ α_{2018} ” correspondem às imagens de albedo da superfície obtidas nos respectivos anos.

Nessa pesquisa, efetuou-se a subtração entre as imagens de albedo datadas de 18/08/2008 e 14/08/2018. A escolha dessas datas considerou a menor diferença entre os seus dias sequenciais do ano, de modo a reduzir a variação no ângulo de elevação solar (OLIVEIRA; MORAES; RUDORFF, 2014). Pelo mesmo motivo, é necessário que não haja uma grande diferença entre os horários de passagem dos satélites. Tais fatores interferem no registro dos valores de albedo, devendo ser levados em conta, juntamente com a ocorrência de possíveis eventos pluviométricos em datas anteriores, uma vez que, segundo Oliveira *et al.* (2012), as precipitações promovem a redução da radiação refletida pelo solo.

5 RESULTADOS

5.1 Distribuição espacial, quantificação e mudança nas classes de uso e cobertura da terra

A distribuição espacial das classes de uso e cobertura é apresentada nos mapas da Figura 13, elaborados a partir das imagens datadas de 18/08/2008 e 30/08/2018, as mais recentes de cada ano. Com base nos dados dessas mesmas imagens, a Tabela 7 mostra as medidas das áreas ocupadas por cada classe, bem como suas variações entre os limites do período mencionado¹.

Observa-se que grande parte da vegetação arbórea se mantém sobre as áreas de maior declividade, no médio e alto cursos da BHRS, dado serem espaços de mais difícil incorporação às atividades agropecuárias. Fragmentos florestais menores encontram-se dispersos no trecho do baixo curso. Nas áreas de declividade reduzida, ao longo dos vales escavados pelos principais cursos d'água, predomina a classe de pastagem, intercalada com espaços dedicados à agricultura. As áreas urbanas prevalecem na porção norte da bacia, sobre os terrenos com altimetria ligeiramente mais elevada, integrando parte da cidade de Ibiúna.

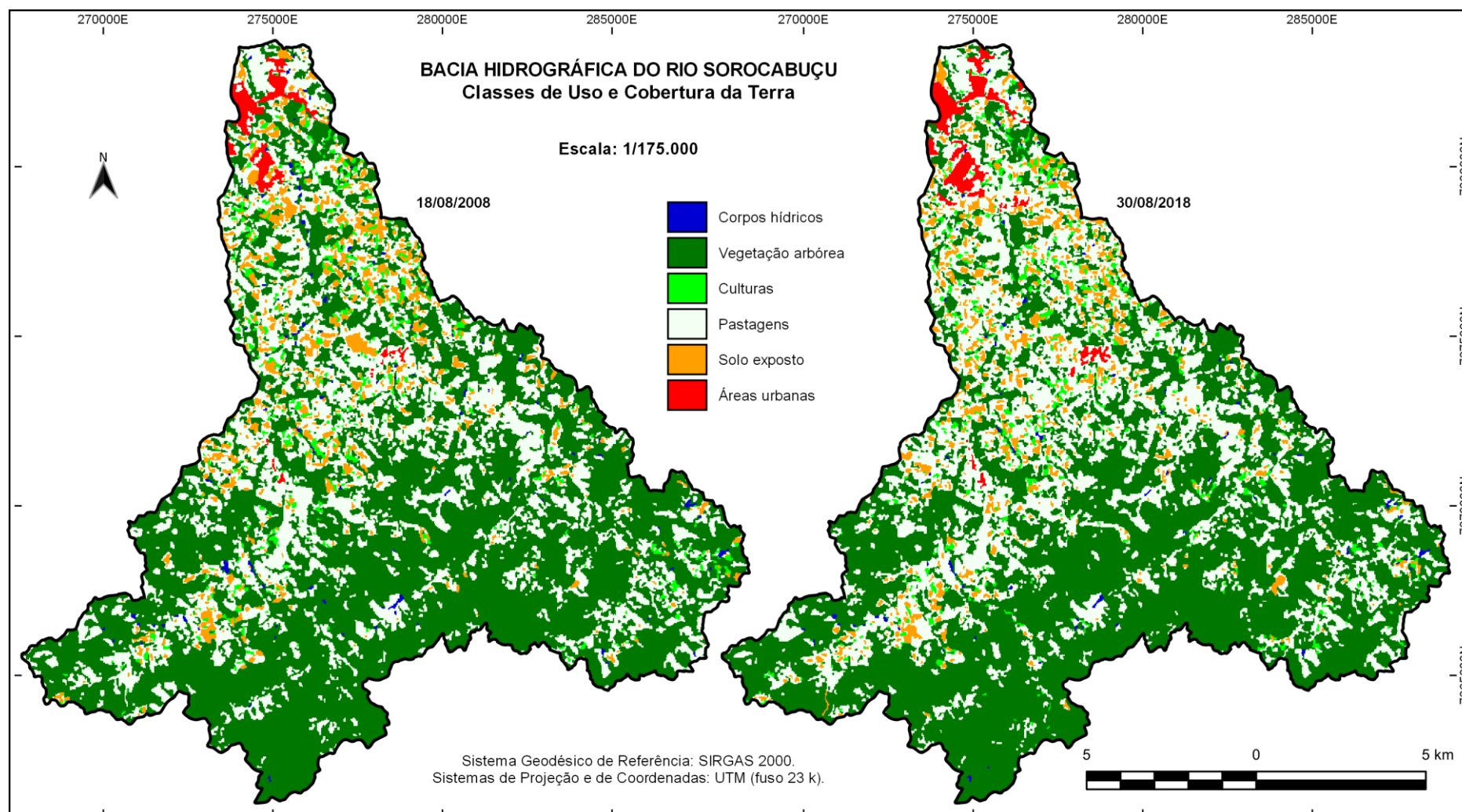
Tabela 7 – Áreas aproximadas ocupadas pelas classes de uso e cobertura da terra em 18/08/2008 e 30/08/2018

Classes de uso e cobertura da terra	Área aproximada				Variação	
	18/08/2008		30/08/2018			
	Absoluta (km²)	Relativa (%)	Absoluta (km²)	Relativa (%)	Absoluta (km²)	Relativa (%)
Corpos hídricos	0,91	0,45	0,69	0,34	-0,22	-24,2
Vegetação arbórea	118,76	58,60	114,03	56,26	-4,73	-4,0
Culturas	5,06	2,50	5,61	2,77	0,55	10,9
Pastagens	64,38	31,76	68,60	33,85	4,22	6,6
Solo exposto	11,35	5,60	10,64	5,25	-0,71	-6,3
Áreas urbanas	2,21	1,09	3,10	1,53	0,89	40,3
Total	202,67	100	202,67	100	0,0	-

Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2019b, 2019d).

¹ Apenas a imagem mais recente de cada ano foi considerada no cálculo das áreas ocupadas pelas categorias de uso e cobertura da terra, na medida em que as duas imagens do mesmo ano não apresentam variação significativa desse fator. A qualidade da classificação das quatro imagens, avaliada através do índice Kappa, obteve valores que variaram entre 0,78 e 0,86. Resultados superiores a 0,75 são tidos como muito bons (LIU; MASON, 2009 *apud* LIRA *et al.*, 2016).

Figura 13 – Distribuição espacial das classes de uso e cobertura da terra na BHRS em 18/08/2008 e 30/08/2018



Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2019b, 2019d).

A maior parte da área da bacia (quase 60 %) permaneceu recoberta por vegetação arbórea, seguida pelas classes de pastagem ($\approx 30\%$), solo exposto ($< 6\%$), culturas ($< 3\%$), áreas urbanas ($< 2\%$) e corpos hídricos ($< 1\%$). A categoria cuja área teve o maior ganho absoluto foi a de pastagem ($4,22 \text{ km}^2$), enquanto a de maior ganho percentual correspondeu às áreas urbanas ($40,3\%$). Mostrando a maior perda absoluta ($-4,73 \text{ km}^2$), a classe de vegetação arbórea teve uma redução aproximadamente compatível com a área de expansão das pastagens. Em termos relativos, as maiores perdas foram verificadas nas áreas das categorias de corpos hídricos ($-24,2\%$) e solo exposto ($-6,3\%$). Essa redução na área da categoria de solo exposto decorre da variabilidade momentânea entre terrenos que apresentam o solo preparado para o cultivo e terrenos com culturas já em desenvolvimento, no interior das glebas destinadas à agricultura. O decréscimo na área da categoria de solo exposto ($-0,71 \text{ km}^2$) foi relativamente próximo ao incremento na área da classe de culturas ($0,55 \text{ km}^2$).

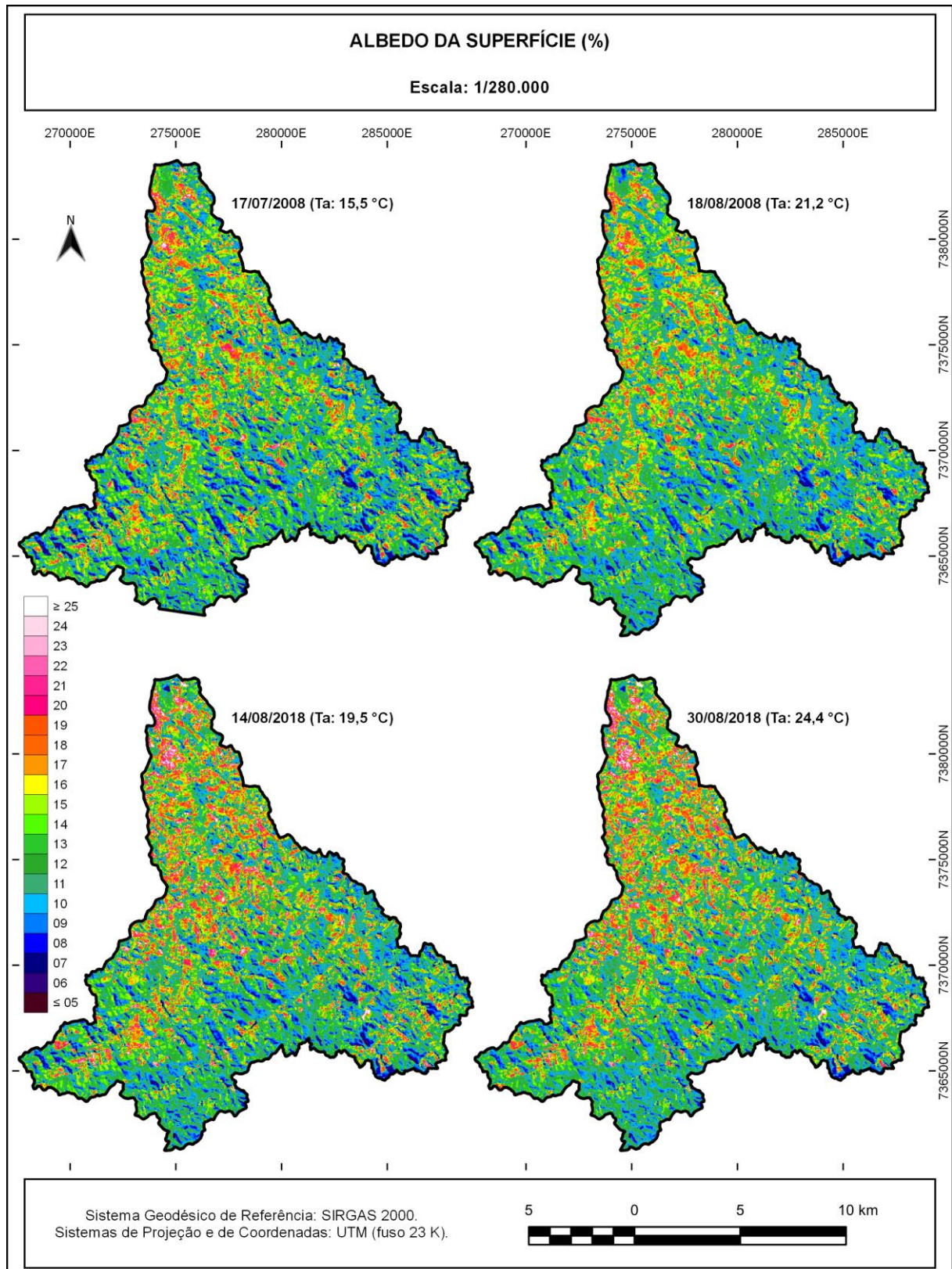
Pode-se afirmar que, no período entre julho de 2008 e agosto de 2018, a BHRS não enfrentou graves modificações no seu padrão espacial de uso e cobertura da terra, as quais estariam, também, expressas na variação da área ocupada pelas diferentes classes. Não obstante, mesmo pouco expressivas, as mudanças ocorridas imprimiram alterações no comportamento dos parâmetros biofísicos estudados através do modelo SEBAL.

5.2 Variabilidade dos parâmetros biofísicos e os impactos das mudanças sobre a superfície

5.2.1 Comportamento do albedo da superfície

A variação espaço-temporal do albedo é apresentada nos mapas da Figura 14. As manchas mais escuras, na metade sul da bacia, correspondem a áreas de sombra, provocadas por porções mais elevadas do relevo; e a algumas áreas de silvicultura com maior extensão, na porção sudeste das imagens. É possível constatar uma concordância geral entre a distribuição espacial de determinadas faixas de valores e as principais categorias de uso e cobertura, bem como a ampliação, entre os anos de 2008 e 2018, dos espaços representados pelos tons que variam da cor laranja à branca. Essa expansão das áreas com valores mais elevados de albedo está associada às mudanças no uso e cobertura da terra, discutidas anteriormente.

Figura 14 – Variação espaço-temporal dos valores de albedo da superfície na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018



Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b, 2018a, 2018b) e CIIAGRO (2019).

Outra constatação diz respeito ao fato de que a variação temporal na temperatura do ar não implicou em qualquer influência sobre a magnitude dos valores de albedo, dado que esse parâmetro é determinado, basicamente, pela cor e constituição dos corpos que integram a superfície (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

A Tabela 8 traz as informações referentes à variabilidade estatística dos dados apresentados nos mapas de albedo. Comparando-se o comportamento das variáveis entre os anos de 2008 e 2018 percebe-se a elevação dos valores médios, acompanhada de um aumento nas amplitudes, sendo esse último resultante, principalmente, do incremento nos valores máximos. Maiores valores de albedo representam um acréscimo na radiação refletida, em detrimento da radiação absorvida (OLIVEIRA; VIANELLO; FERREIRA, 2001). Quanto ao crescimento dos valores do coeficiente de variação², expressa a redução da homogeneidade dos dados de albedo, o que está associado à maior heterogeneidade das classes de uso e cobertura da terra em 2018.

Tabela 8 – Variabilidade estatística dos valores de albedo da superfície na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018

Variável estatística	Data de captura da imagem			
	17/07/2008	18/08/2008	14/08/2018	30/08/2018
Valor máximo (%)	41,16	44,09	67,79	67,66
Valor médio (%)	12,60	12,48	13,01	13,00
Valor mínimo (%)	3,48	3,14	2,35	2,43
Amplitude (p. p.) ⁽¹⁾	37,68	40,95	65,44	65,23
Coeficiente de variação (%)	25,19	23,12	27,38	26,53
Média dos coeficientes de variação (%)	24,16		26,96	

Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b, 2018a, 2018b).

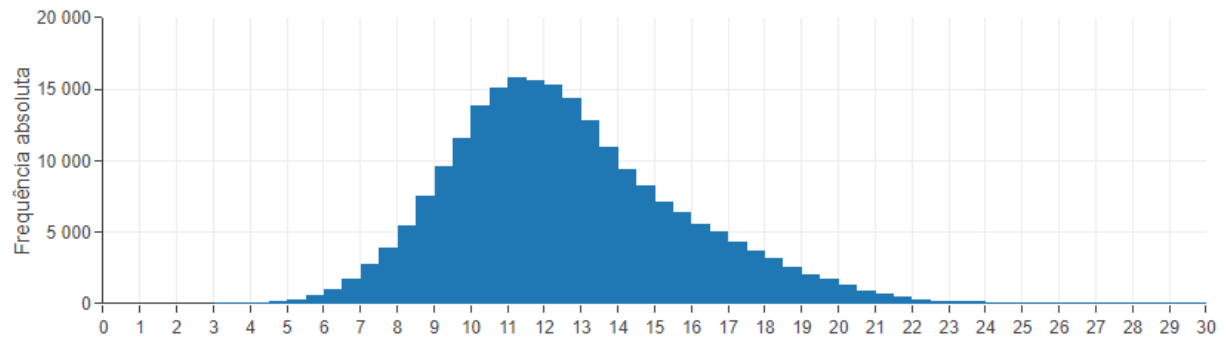
⁽¹⁾ Ponto percentual.

A Figura 15 apresenta os histogramas das imagens utilizadas na elaboração dos mapas de albedo.

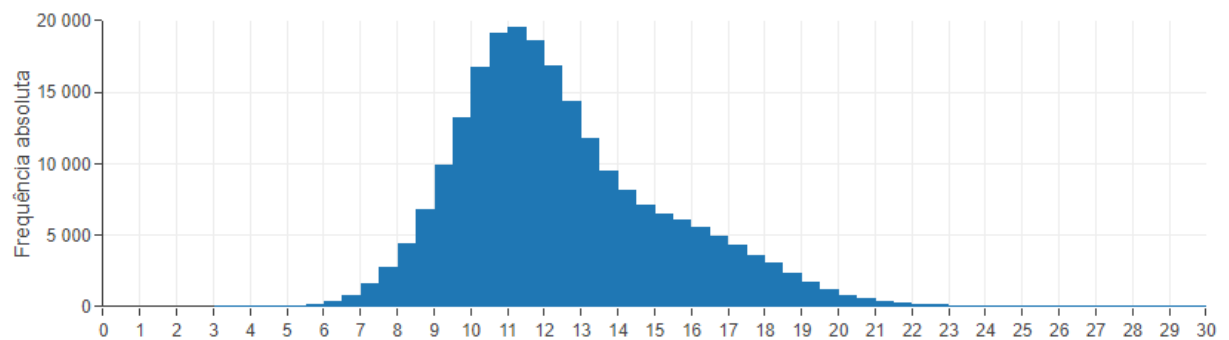
² O coeficiente de variação, equivalente à divisão do desvio-padrão pela média, foi utilizado na avaliação do grau de homogeneidade dos dados contidos nas imagens, tal como em Bezerra *et al.* (2014) e Oliveira *et al.* (2012). A referida medida de dispersão foi preferida em relação ao desvio-padrão, pois esse último não deve ser considerado quando as médias dos conjuntos de dados são muito desiguais (PIANA; MACHADO; SELAU, 2009). Tal não é o caso das imagens de albedo, mas ocorre nos casos dos outros parâmetros estudados.

Figura 15 – Histogramas das imagens de albedo da superfície (%)
na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018

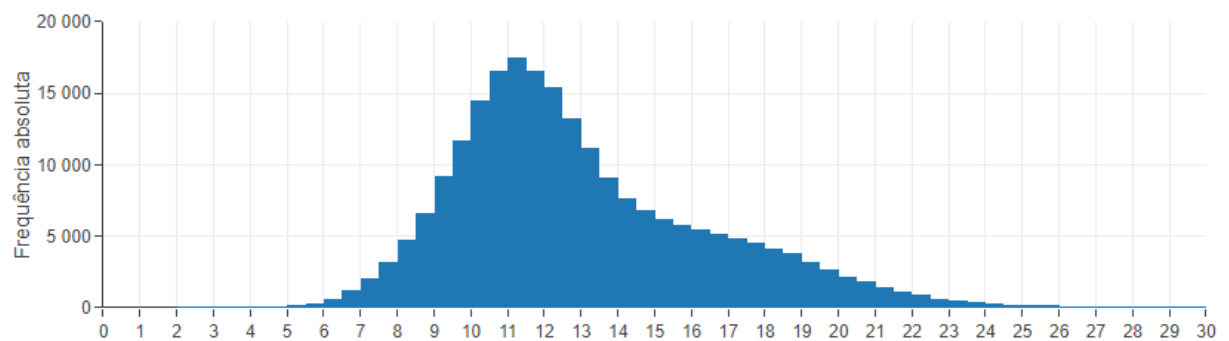
17/07/2008 (temperatura do ar: 15,5 °C)



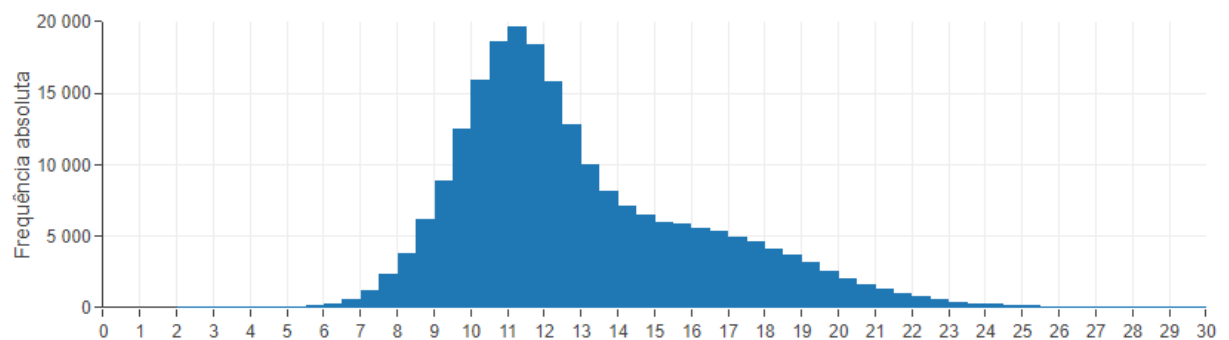
18/08/2008 (temperatura do ar: 21,2 °C)



14/08/2018 (temperatura do ar: 19,5 °C)



30/08/2018 (temperatura do ar: 24,4 °C)



Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b, 2018a, 2018b) e CIIAGRO (2019).

Nota: Classes de baixa frequência (que representam valores extremos) foram suprimidas.

A tendência a maiores valores de albedo no ano de 2018 também está demonstrada nos histogramas da Figura 15. Comparativamente a uma distribuição gaussiana, os dados das imagens de 2008 já apresentavam uma assimetria positiva (aumento na frequência dos pixels de maior valor, incluídos nas classes à direita do pico do histograma). Nos dados das imagens de 2018, ocorre um incremento dessa assimetria, com a elevação da frequência dos pixels inseridos nas classes situadas na extremidade direita do gráfico; além de um aumento na dispersão dos dados, expresso na distensão horizontal dos histogramas.

Não obstante, a classe de valores entre 11 e 11,5 % (vegetação arbórea fora das áreas sombreadas) permaneceu como aquela de maior frequência. A redução na magnitude dessa classe na imagem de 17/07/2008 decorre da ausência da extremidade sul da bacia, localizada numa área densamente recoberta por vegetação arbórea.

A Tabela 9 apresenta a média do albedo nas diferentes categorias de uso e cobertura. Os valores foram progressivamente maiores de acordo com a seguinte sequência de classes: corpos hídricos, vegetação arbórea, pastagens, culturas, solo exposto e áreas urbanas.

Tabela 9 – Valores médios de albedo da superfície (%) nas classes de uso e cobertura da BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018

Classes de uso e cobertura da terra	2008		Média das imagens de 2008	2018		Média das imagens de 2018
	17/07	18/08		14/08	30/08	
Corpos hídricos	8,36	7,82	8,09	7,44	6,93	7,18
Vegetação arbórea	10,64	10,61	10,62	10,67	10,70	10,69
Culturas	18,24	17,52	17,88	18,28	18,02	18,15
Pastagens	15,40	14,66	15,03	15,17	14,80	14,99
Solo exposto	18,26	17,63	17,94	19,12	19,31	19,22
Áreas urbanas	18,29	17,80	18,05	20,79	20,93	20,86

Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b, 2018a, 2018b).

Dentre os componentes naturais da superfície, a água possui a maior capacidade de absorção da radiação de onda curta incidente e, portanto, o menor albedo. Em relação aos tipos de cobertura vegetal, suas alturas apresentam uma relação inversa com os valores de albedo, de tal forma que esses são tanto menores quanto maior o porte da vegetação, em função das reflexões múltiplas no interior do dossel, responsáveis pelo aumento na absorção da radiação (MONTEIRO *et al.*, 2014). Isso explica as médias menores verificadas na classe de vegetação arbórea, bem como as maiores nas áreas de pastagens e de culturas. Por corresponderem

a superfícies de baixa rugosidade, bastantes homogêneas, as áreas de culturas assumiram valores de albedo ainda mais elevados. Quanto à categoria de solo exposto, apresentou valores ligeiramente superiores, na medida em que se constitui de superfícies secas, com cores mais claras. As maiores médias foram observadas nas áreas urbanas, devido à presença de materiais altamente refletivos.

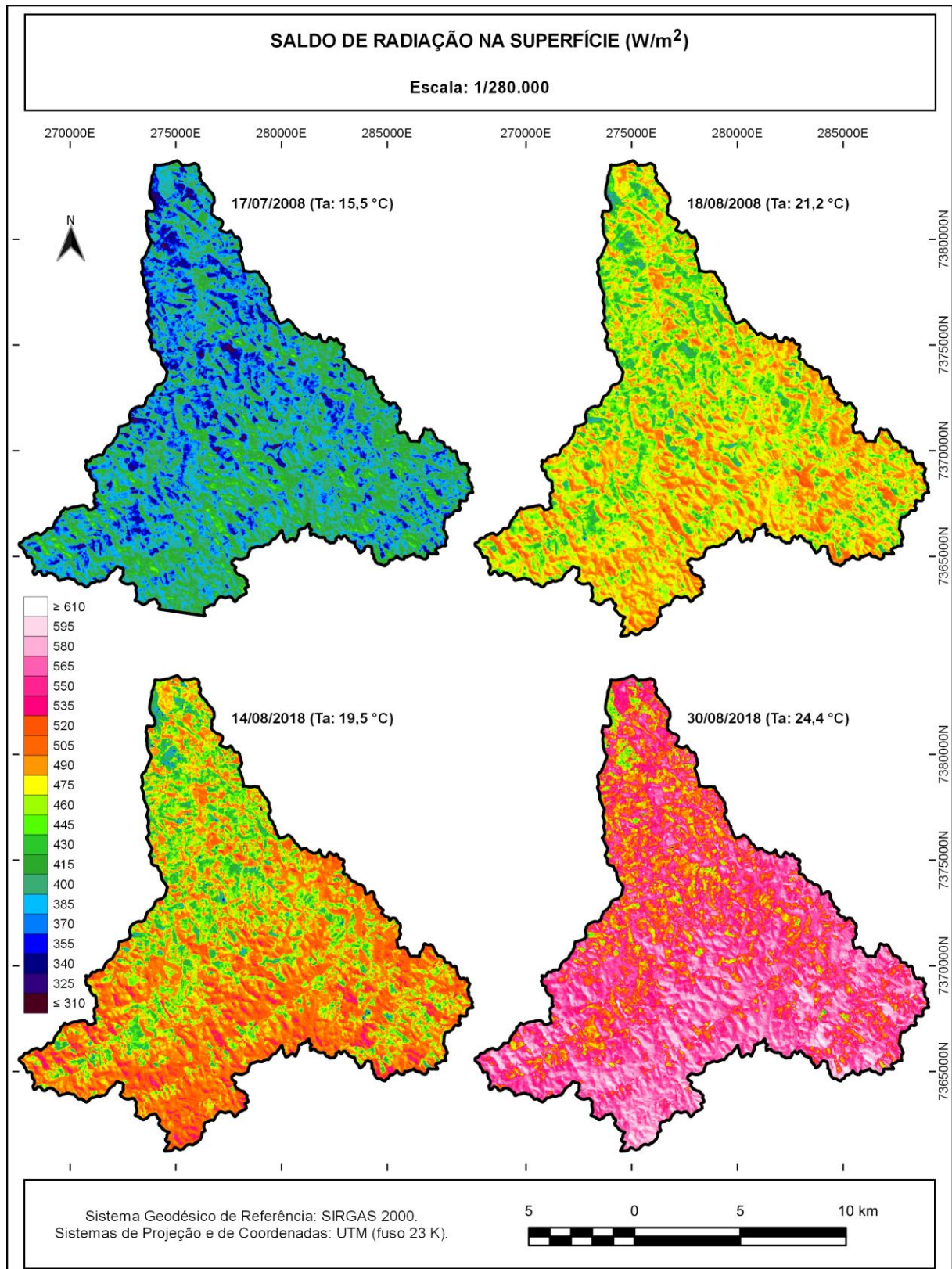
Entre as quatro diferentes datas do estudo, a classe de vegetação arbórea foi aquela que apresentou a maior constância nos valores médios de albedo. As categorias de pastagens e culturas mostraram variações não muito significativas. Considerando as médias entre os valores médios das duas imagens de cada ano, a maior variação negativa esteve associada aos corpos hídricos (-0,91 p. p.), possivelmente, em virtude de alterações na turbidez da água. As maiores variações positivas se deram nas classes de solo exposto (1,28 p. p.) e áreas urbanas (2,81 p. p.). A despeito da diminuição das áreas de solo exposto, o incremento nas médias de albedo dessa classe deriva da ampliação de uma área de lavra mineral, visível como uma mancha branca, na porção sudeste das imagens de 2018. No que se refere às áreas urbanas, com o crescimento e a consolidação desses espaços entre 2008 e 2018, torna-se perceptível o aumento na frequência dos pixels de albedo mais elevado, representados na cor branca e em tons de rosa, conforme demonstraram os mapas da Figura 14.

5.2.2 Comportamento do saldo de radiação na superfície

Os mapas da Figura 16 apresentam a variação espaço-temporal do saldo de radiação na superfície. Percebe-se que esse parâmetro, diferentemente do albedo, é influenciado pelas mudanças na temperatura do ar, assim como atestam Carneiro *et al.* (2014). Isso ocorre devido ao fato de que o aquecimento da atmosfera eleva os níveis de radiação de onda longa incidente. Desse modo, as principais categorias de uso e cobertura da terra ainda coincidiram com determinadas faixas de valores do saldo de radiação; porém, a magnitude dessas faixas variou, mantendo um certo nível de relação com a temperatura do ar.

Também é possível notar a relação inversa existente entre o albedo e o saldo de radiação. As áreas com os maiores valores de albedo correspondem àquelas com os menores níveis de saldo de radiação, e vice-versa. Quanto maior a proporção da radiação solar refletida, menor a disponibilidade de radiação na superfície – conforme pode-se concluir a partir do raciocínio presente em Uda, Corseuil e Kobiyama (2013) –, sendo o albedo, portanto, um importante modulador do saldo de radiação (ARRAES; ANDRADE; SILVA, 2012).

Figura 16 – Variação espaço-temporal dos valores de saldo de radiação na superfície na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018



Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b, 2018a, 2018b) e CIIAGRO (2019).

A Tabela 10 reúne as informações sobre a variabilidade estatística dos dados presentes nos mapas da Figura 16. Consta-se que a variação nos valores médios do saldo de radiação não acompanhou perfeitamente as mudanças na temperatura do ar. Em 18/08/2008, com uma temperatura do ar igual a 21,2 °C, a média do saldo de radiação correspondeu a 468,89 W/m². Já em 14/08/2018, com uma temperatura do ar inferior, de 19,51 °C, a média do saldo de radiação apresentou um valor superior, igual 482,38 W/m². Os níveis do saldo de radiação na superfície se elevam com o aumento da umidade do solo (SILVA, A. *et al.*, 2017). É possível que a precipitação de 9,1 mm, ocorrida na data anterior à imagem de 14/08/2018, tenha contribuído para o incremento na média do saldo de radiação.

Tabela 10 – Variabilidade estatística dos valores de saldo de radiação na superfície na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018

Variável estatística	Data de captura da imagem			
	17/07/2008	18/08/2008	14/08/2018	30/08/2018
Valor máximo (W/m ²)	457,67	543,69	573,43	646,63
Valor médio (W/m ²)	390,70	468,89	482,38	544,05
Valor mínimo (W/m ²)	216,68	259,75	108,16	135,36
Amplitude (W/m ²)	241,00	283,94	465,26	511,27
Coeficiente de variação (%)	6,03	5,26	6,53	5,81
Média dos coeficientes de variação (%)	5,65		6,17	

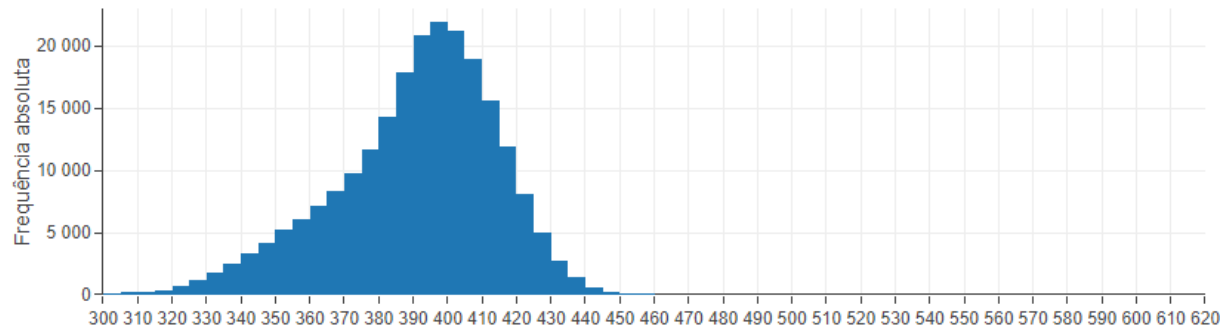
Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b, 2018a, 2018b) e CIIAGRO (2019).

Não obstante as médias ocasionalmente maiores nas imagens de 2018, é importante ressaltar a grande redução nos valores mínimos do saldo de radiação nesse ano, em decorrência da elevação nos valores máximos de albedo. Paralelamente, tem-se uma maior heterogeneidade nos dados do saldo de radiação, expressa no aumento do coeficiente de variação médio. Ambos os fatos estão relacionados às mudanças verificadas no uso e cobertura da terra.

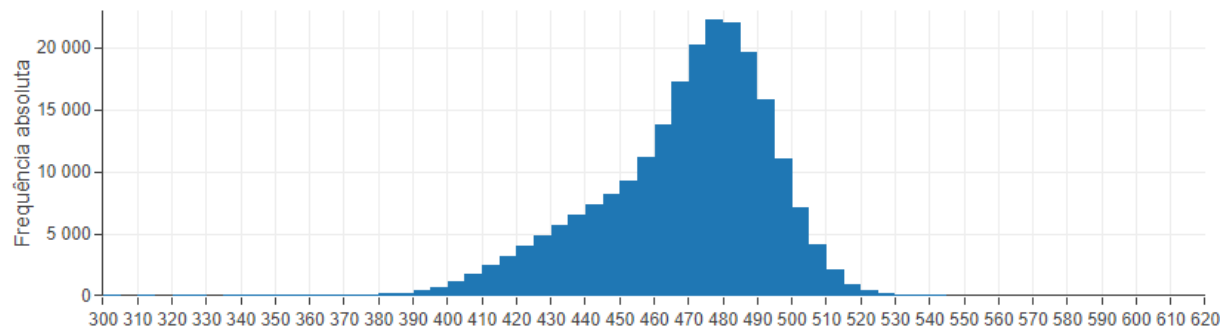
A Figura 17 expõe os histogramas das imagens do saldo de radiação, cujo deslocamento lateral resulta, em grande parte, da variação nos valores de temperatura do ar.

Figura 17 – Histogramas das imagens de saldo de radiação na superfície (W/m^2) na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018

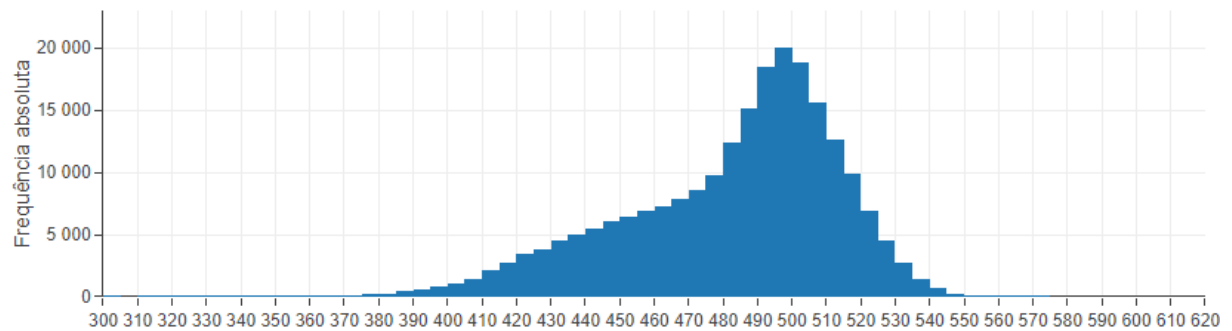
17/07/2008 (temperatura do ar: 15,5 °C)



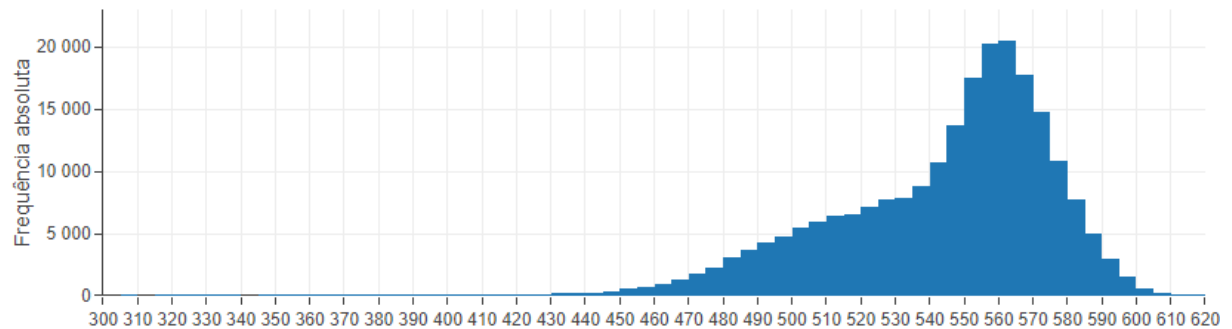
18/08/2008 (temperatura do ar: 21,2 °C)



14/08/2018 (temperatura do ar: 19,5 °C)



30/08/2018 (temperatura do ar: 24,4 °C)



Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b, 2018a, 2018b) e CIIAGRO (2019).

Nota: Classes de baixa frequência (que representam valores extremos) foram suprimidas.

Na medida em que, no ano de 2008, os histogramas de albedo já apresentavam assimetria positiva, e que há uma relação inversa com o saldo de radiação, os histogramas desse último parâmetro foram condicionados a manifestar uma assimetria negativa no referido ano. Ou seja, um aumento na frequência dos pixels com menores valores de saldo de radiação, comparativamente a uma distribuição normal. Entre 2008 e 2018, também houve uma intensificação na dispersão e assimetria dos histogramas, associada às mudanças ocorridas na superfície.

A Tabela 11 apresenta a média do saldo de radiação nas diferentes categorias de uso e cobertura da terra. Os valores foram progressivamente maiores de acordo com a seguinte sequência de classes (inversa à verificada no caso do albedo): áreas urbanas, solo exposto, culturas, pastagens, vegetação arbórea e corpos hídricos. Dado que o saldo de radiação possui uma relação direta com a disponibilidade hídrica do ambiente, seus valores são maiores sobre corpos d'água e áreas florestadas, ao passo que são menores em áreas urbanas e de solo exposto. Matos, Candeias e Azevedo (2016) esclarecem que essa grande capacidade de armazenamento de energia pela água deve-se ao seu alto calor específico.

Tabela 11 – Valores médios de saldo de radiação na superfície (W/m^2) nas classes de uso e cobertura da BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018

Classes de uso e cobertura da terra	Data de captura da imagem			
	17/07/2008	18/08/2008	14/08/2018	30/08/2018
Corpos hídricos	420,34	508,29	523,38	595,90
Vegetação arbórea	405,89	485,22	505,26	566,77
Culturas	356,96	433,12	440,80	505,45
Pastagens	368,25	448,09	458,98	524,52
Solo exposto	346,93	424,29	426,14	485,74
Áreas urbanas	346,56	420,74	410,71	467,36

Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b, 2018a, 2018b) e CIIAGRO (2019).

A variação temporal das médias do saldo de radiação, nas várias classes de uso e cobertura, é fortemente influenciada pelas mudanças na temperatura do ar. A comparação entre esses valores médios, ao longo das diferentes datas, demonstraria mais os efeitos da variação na temperatura do ar do que os impactos derivados das mudanças no uso e cobertura da terra. Contudo, é perceptível, por exemplo, o aumento na diferença entre os valores das categorias de solo exposto e áreas urbanas. Considerando as duas imagens de 2008, a média dessas diferenças é igual a $1,96 W/m^2$, enquanto nas imagens de 2018 corresponde a $16,91 W/m^2$.

5.2.3 Comportamento da temperatura da superfície

A variação espaço-temporal da temperatura da superfície está representada nos mapas da Figura 18. Assim como no caso do saldo de radiação, a distribuição espacial dos valores de temperatura se adequa, grosso modo, aos limites das principais classes de uso e cobertura, com a magnitude desses valores sendo modulada pela temperatura do ar. No entanto, observa-se uma relação inversa entre o saldo de radiação e a temperatura da superfície, indicando que a maior disponibilidade de radiação não necessariamente resulta em temperaturas mais elevadas. Na verdade, a variabilidade das temperaturas da superfície está mais diretamente associada à disponibilidade hídrica dos diferentes ambientes, tal como se constata a partir de Veloso (2014).

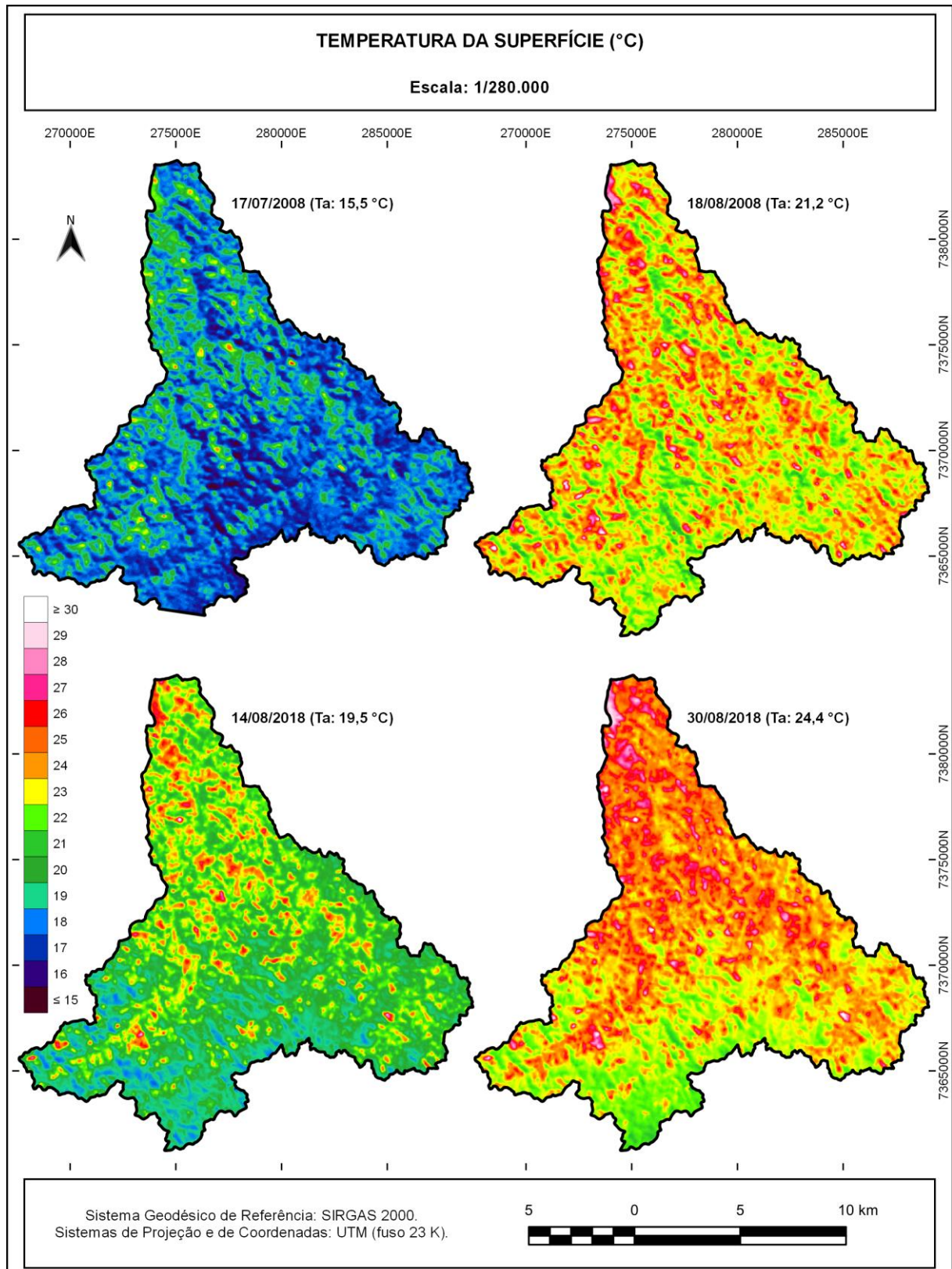
A Tabela 12 apresenta as informações sobre a variabilidade estatística das imagens utilizadas na elaboração dos mapas da Figura 18. Nesse caso, há uma maior concordância entre a variação do parâmetro em apreço e as temperaturas do ar, de modo que as médias de temperatura da superfície foram progressivamente superiores em conformidade com as datas nas quais as temperaturas do ar foram sucessivamente mais elevadas. Em 17/07/08, 18/08/08 e 14/08/18 as médias da temperatura da superfície excederam as temperaturas do ar, enquanto em 30/08/18 ocorre o contrário. Possivelmente, os eventos pluviométricos de 26 e 27/08/18, com os respectivos totais de 20,4 e 23,2 mm, contribuíram para a redução da temperatura da superfície no dia 30/08/18.

Tabela 12 – Variabilidade estatística dos valores de temperatura da superfície na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018

Variável estatística	Data de captura da imagem			
	17/07/2008	18/08/2008	14/08/2018	30/08/2018
Valor máximo (°C)	25,99	31,06	30,17	30,37
Valor médio (°C)	18,21	23,45	21,09	23,94
Valor mínimo (°C)	14,22	18,83	16,96	19,55
Amplitude (°C)	11,78	12,23	13,20	10,82
Coeficiente de variação (%)	7,22	5,40	7,98	5,70
Média dos coeficientes de variação (%)	6,31		6,84	

Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b, 2018a, 2018b).

Figura 18 – Variação espaço-temporal dos valores de temperatura da superfície na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018



Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b, 2018a, 2018b) e CIIAGRO (2019).

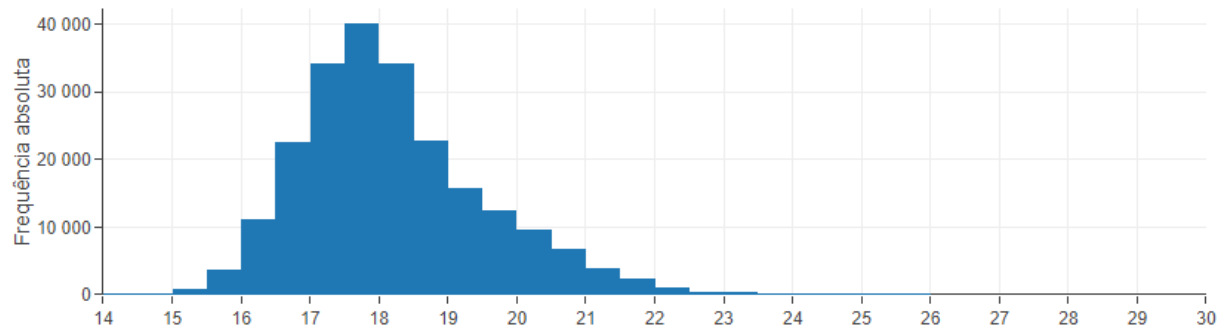
Não se percebe, ainda conforme a Tabela 12, grandes variações nos valores máximos, mínimos e, conseqüentemente, nas amplitudes entre os anos de 2008 e 2018. É provável que a menor resolução espacial original das imagens no infravermelho termal, de 120 m no satélite Landsat 5 e 100 m no Landsat 8, atenua o registro dos valores extremos, os quais se manifestam de maneira mais pontual. Entretanto, a menor resolução espacial dos dados não impediu a identificação do aumento na heterogeneidade dos valores, expresso no crescimento do coeficiente de variação médio, o que é indicativo das mudanças no uso e cobertura da terra.

A Figura 19 reúne os histogramas das imagens de temperatura da superfície. Em face da relação inversa com o saldo de radiação, e da relação direta com o albedo, os histogramas de temperatura da superfície apresentaram assimetria positiva. Diferentemente do ocorrido nos casos dos parâmetros anteriores, o aumento da dispersão e assimetria foi perceptível em apenas uma das imagens do ano de 2018 (14/08). É possível que as precipitações dos dias 26 e 27/08/18 tenham contribuído para a menor dispersão e assimetria no histograma da imagem do dia 30/08/18. Todavia, em 2018, ambos os histogramas têm uma redução na magnitude da classe modal, comparativamente aos de 2008, o que implica no aumento da frequência de pixels em outras faixas de valores – certamente, naquelas de maior temperatura, dada a assimetria positiva dos histogramas. Essa redução na magnitude da classe modal também tem relação com as mudanças no uso e cobertura da terra.

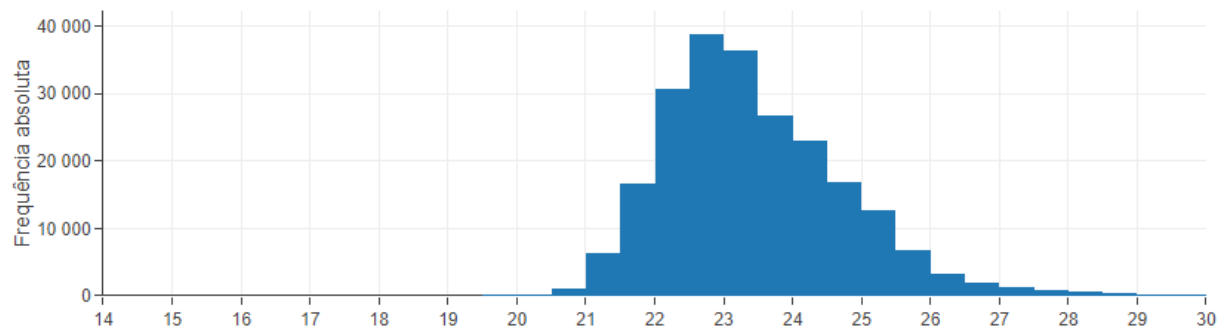
A Tabela 13 traz as informações acerca das médias de temperatura da superfície nas diferentes categorias de uso e cobertura.

Figura 19 – Histogramas das imagens de temperatura da superfície (°C)
na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018

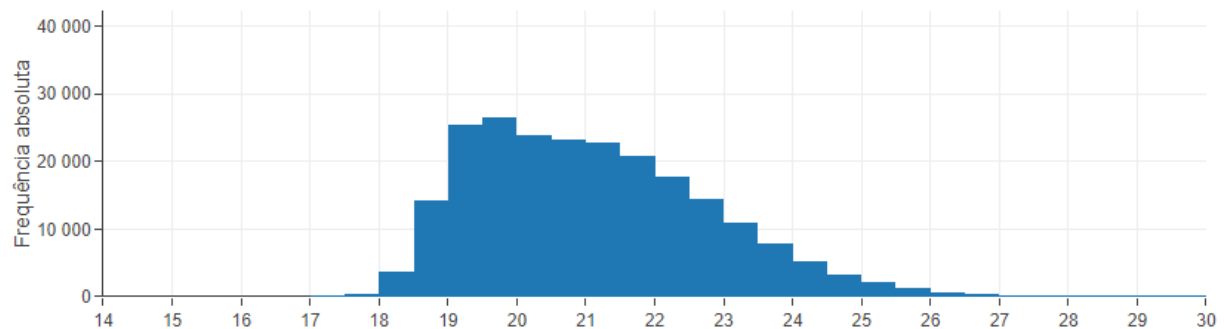
17/07/2008 (temperatura do ar: 15,5 °C)



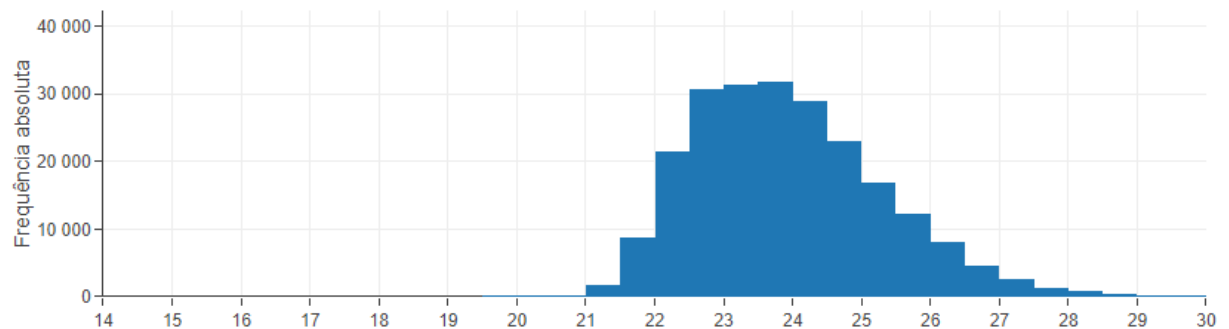
18/08/2008 (temperatura do ar: 21,2 °C)



14/08/2018 (temperatura do ar: 19,5 °C)



30/08/2018 (temperatura do ar: 24,4 °C)



Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b, 2018a, 2018b) e CIIAGRO (2019).

Nota: Classes de baixa frequência (que representam valores extremos) foram suprimidas.

Tabela 13 – Valores médios de temperatura da superfície (°C) nas classes de uso e cobertura da BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018

Classes de uso e cobertura da terra	Data de captura da imagem			
	17/07/2008	18/08/2008	14/08/2018	30/08/2018
Corpos hídricos	16,52	21,28	19,88	22,18
Vegetação arbórea	17,49	22,79	19,85	23,01
Culturas	18,27	23,66	21,87	23,90
Pastagens	19,41	24,54	22,67	25,00
Solo exposto	20,39	25,31	23,82	26,00
Áreas urbanas	20,39	25,67	24,50	27,03

Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b, 2018a, 2018b).

De maneira geral, os valores foram progressivamente maiores de acordo com a seguinte sequência de classes: corpos hídricos, vegetação arbórea, culturas, pastagens, solo exposto e áreas urbanas. A ordem é semelhante à verificada no caso do albedo; porém, inverteram-se as posições das categorias de culturas e pastagens. A maior disponibilidade hídrica das culturas contribuiu para as suas menores temperaturas, enquanto a situação oposta determinou temperaturas superiores sobre as pastagens.

Nas áreas florestadas úmidas, o menor albedo condiciona os elevados valores de saldo de radiação na superfície. Não obstante, essa maior quantidade de energia não se reverte em temperaturas mais elevadas, dado que a energia é consumida, predominantemente, na forma de calor latente de evapotranspiração, o qual não implica em variações de temperatura. Como consequência, apenas um pequeno remanescente do saldo de radiação é empregado no aumento das temperaturas, sob a forma de calor sensível. Contrariamente, sobre as áreas impermeabilizadas e de solo exposto observam-se os maiores valores de fluxo de calor sensível, conforme atestam J. Silva *et al.* (2017). Assim ocorre, pois, com a remoção da cobertura vegetal, a redução da evapotranspiração faz com que grande parte do saldo de radiação seja consumido na forma de calor sensível, resultando no maior aquecimento da superfície e do ar (ARRAES; ANDRADE; SILVA, 2012). Por esse motivo, a despeito dos seus menores níveis de saldo de radiação, as áreas urbanas e de solo exposto registram os maiores valores de temperatura da superfície.

Assim como também verificado no comportamento do saldo de radiação, ocorre um incremento nas diferenças entre as médias de temperatura da superfície nas classes de solo exposto e áreas urbanas. A diferença média foi de 0,18 °C, no ano de 2008, para 0,86 °C, em 2018, devido ao aumento e à consolidação da urbanização no período.

5.2.4 Comportamento do fluxo de calor no solo

A Figura 20 apresenta a variação espaço-temporal do fluxo de calor no solo. Esse parâmetro biofísico corresponde à quantidade de energia empregada no aquecimento do solo (MACHADO *et al.*, 2014); portanto, possui uma relação direta com a temperatura da superfície. Tal como nos demais casos, há uma relativa adequação entre certas faixas de valores do fluxo de calor no solo e as classes de uso e cobertura da terra, variando em função das oscilações na temperatura do ar.

A Tabela 14 contém as informações sobre a variabilidade estatística das imagens utilizadas nos mapas da Figura 20. De modo semelhante ao sucedido com a temperatura da superfície, a progressão dos valores médios do fluxo de calor no solo acompanhou a ordem de elevação das temperaturas do ar, nas diferentes datas. Adicionalmente, nota-se um significativo incremento no coeficiente de variação médio em 2018, relacionado à maior heterogeneidade das categorias de uso e cobertura da terra.

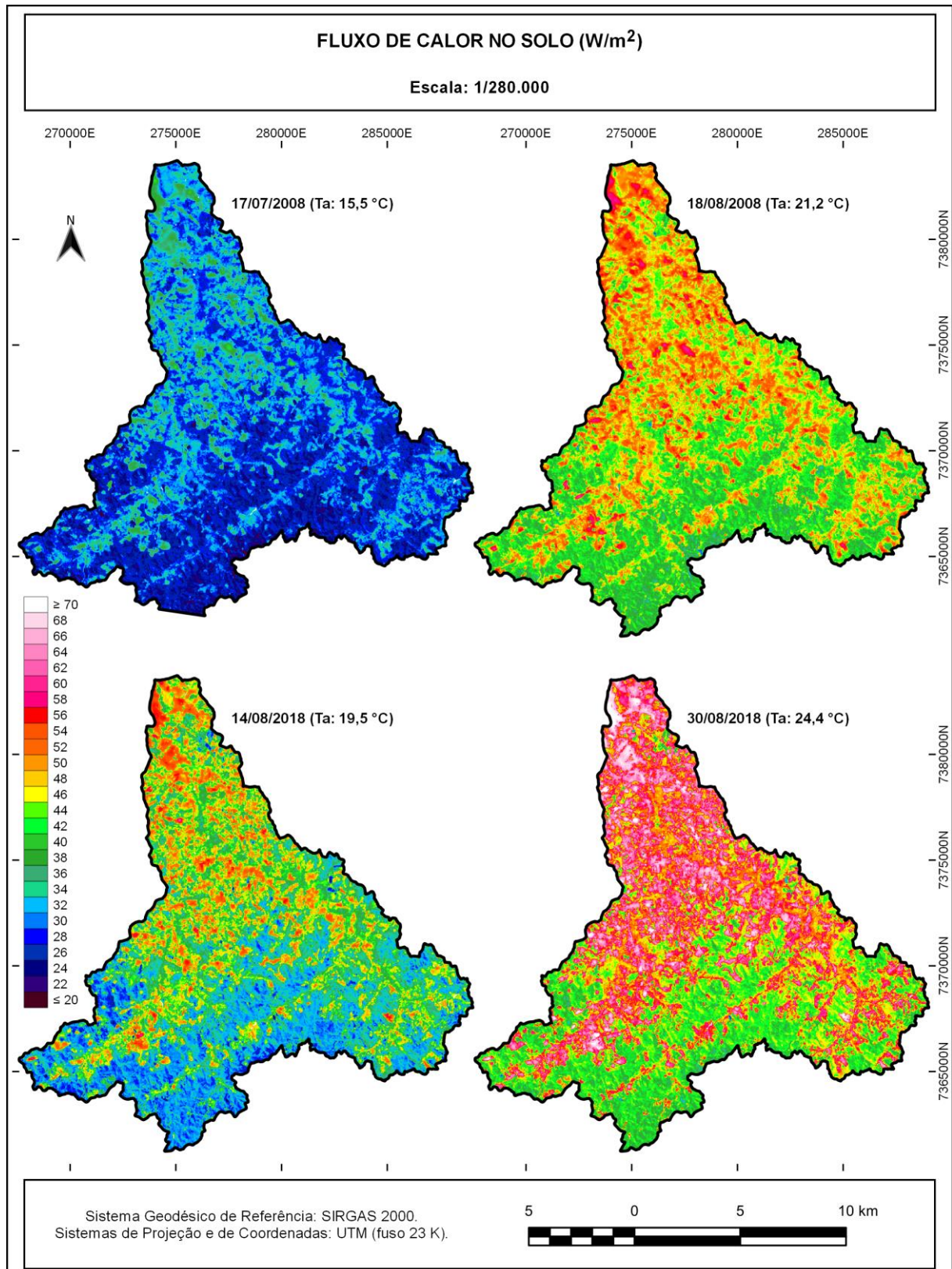
Tabela 14 – Variabilidade estatística dos valores de fluxo de calor no solo na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018

Variável estatística	Data de captura da imagem			
	17/07/2008	18/08/2008	14/08/2018	30/08/2018
Valor máximo (W/m ²)	228,32	271,77	286,71	323,32
Valor médio (W/m ²)	29,42	45,78	39,65	50,92
Valor mínimo (W/m ²)	16,21	27,23	19,15	25,53
Amplitude (W/m ²)	212,10	244,55	267,57	297,78
Coeficiente de variação (%)	19,55	15,96	25,14	21,60
Média dos coeficientes de variação (%)	17,75		23,37	

Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b, 2018a, 2018b) e CIIAGRO (2019).

A Figura 21 agrupa os histogramas referentes às imagens do parâmetro fluxo de calor no solo.

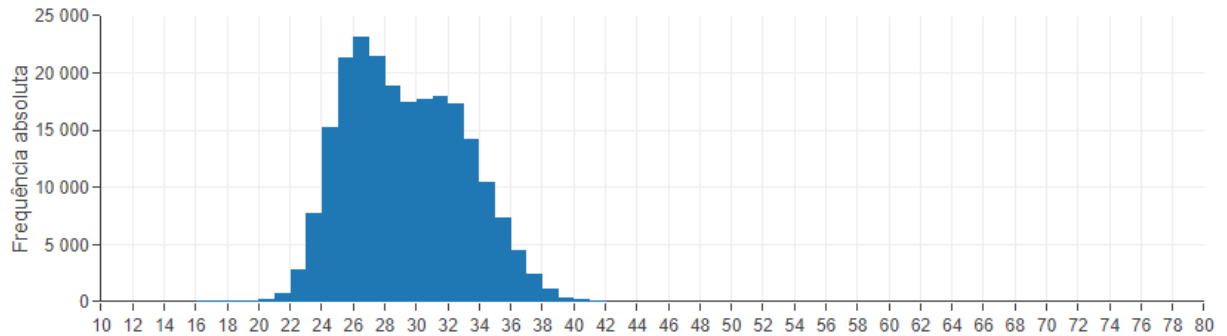
Figura 20 – Variação espaço-temporal dos valores de fluxo de calor no solo na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018



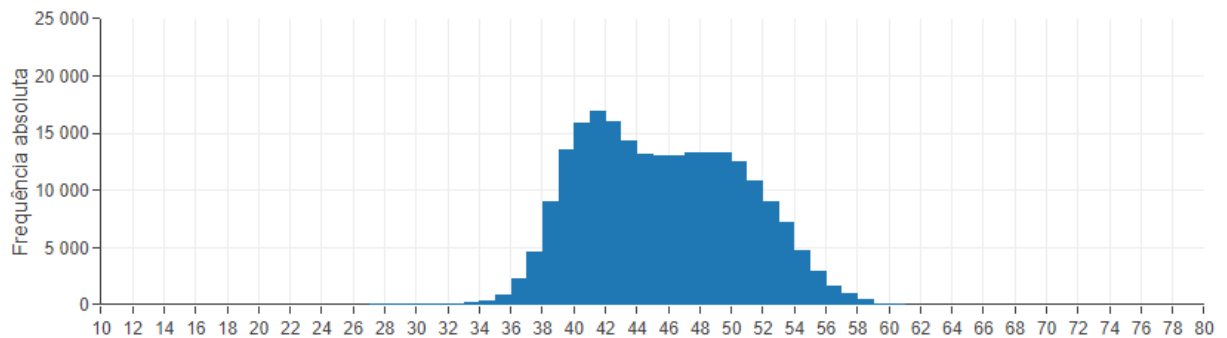
Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b, 2018a, 2018b) e CIIAGRO (2019).

Figura 21 – Histogramas das imagens de fluxo de calor no solo (W/m^2)
na BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018

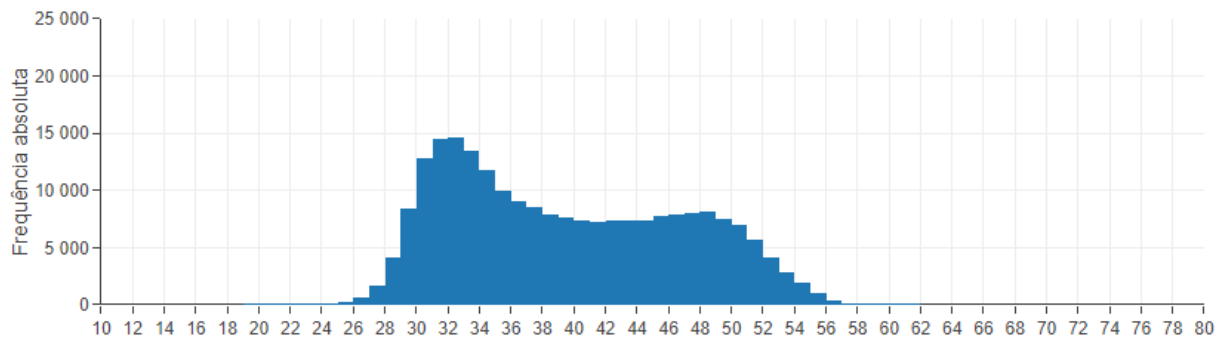
17/07/2008 (temperatura do ar: 15,5 °C)



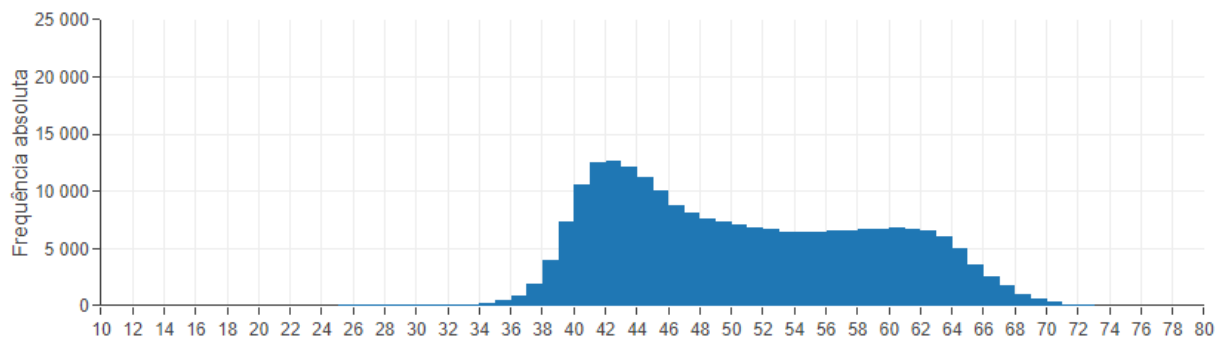
18/08/2008 (temperatura do ar: 21,2 °C)



14/08/2018 (temperatura do ar: 19,5 °C)



30/08/2018 (temperatura do ar: 24,4 °C)



Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b, 2018a, 2018b) e CIIAGRO (2019).

Nota: Classes de baixa frequência (que representam valores extremos) foram suprimidas.

Do mesmo modo como observado no comportamento da temperatura da superfície, os histogramas do fluxo de calor no solo exibiram assimetria positiva. Mas, nesse caso, em razão da maior quantidade de informação presente, derivada da influência direta que o NDVI exerce sobre a determinação do fluxo de calor no solo, a assimetria apresentou-se tendente à bimodalidade. Essa característica permitiu que os histogramas ressaltassem a predominância secundária dos espaços ocupados pelas pastagens. Enquanto a classe modal, à esquerda, engloba valores verificados no interior da categoria de vegetação arbórea, a classe com caráter ligeiramente modal, à direita, contém valores típicos das áreas de pastagem, nos histogramas de todas as imagens³.

Em relação à variação entre os anos de 2008 e 2018, ficou patente o aumento na dispersão e assimetria positiva dos histogramas, causado pelas mudanças no uso e cobertura da terra. Tendo em vista que o fluxo de calor no solo geralmente resulta em acréscimo de energia para o meio à noite (GALVANI; ESCOBEDO; PEREIRA, 2001), o alongamento dos histogramas nas imagens de 2018, no sentido dos valores mais elevados, pode implicar no aumento das temperaturas no período noturno.

A Tabela 15 informa a média do fluxo de calor no solo nas diferentes classes de uso e cobertura da terra.

Tabela 15 – Valores médios de fluxo de calor no solo (W/m^2) nas classes de uso e cobertura da BHRS em 17/07/2008, 18/08/2008, 14/08/2018 e 30/08/2018

Classes de uso e cobertura da terra	Data de captura da imagem			
	17/07/2008	18/08/2008	14/08/2018	30/08/2018
Corpos hídricos	210,17	254,15	261,69	297,95
Vegetação arbórea	26,48	41,91	33,44	44,05
Culturas	24,53	41,93	34,03	41,73
Pastagens	33,07	50,61	48,08	58,41
Solo exposto	36,15	54,50	52,53	65,62
Áreas urbanas	36,14	54,87	53,35	66,99

Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b, 2018a, 2018b) e CIIAGRO (2019).

³ O histograma da imagem datada de 18/08/2008 contém uma segunda classe modal (47-48 W/m^2), visualmente não discernível, em consequência da magnitude do eixo vertical.

Devido à baixa reflectância ao longo de todo o espectro solar (PEREIRA *et al.*, 2007), o que se traduz numa maior capacidade de absorção da radiação de onda curta incidente (MONTEIRO *et al.*, 2014), os corpos hídricos exibem os valores mais elevados do parâmetro fluxo de calor. Dentre as categorias situadas em terra, as maiores médias foram registradas nas áreas urbanas e de solo exposto, por efeito da menor disponibilidade hídrica e da predominância dos fluxos de calor sensível nesses ambientes. Pelos motivos contrários (maior disponibilidade hídrica e predominância dos fluxos de calor latente), vegetação arbórea e culturas alternaram-se na apresentação dos menores valores de fluxo de calor no solo. Dada a natureza intermediária do ambiente de pastagens, no que diz respeito ao conteúdo hídrico e densidade da vegetação, suas médias estiveram sempre situadas entre os valores dos dois grupos anteriores.

Tal como observado nas dinâmicas do saldo de radiação e da temperatura da superfície, houve um aumento nas diferenças entre as médias de fluxo de calor no solo das áreas urbanas e de solo exposto. Em 2008, a diferença média foi igual a $0,19 \text{ W/m}^2$, passando ao valor de $1,10 \text{ W/m}^2$ em 2018, como consequência da expansão e consolidação dos espaços urbanos no interior da bacia.

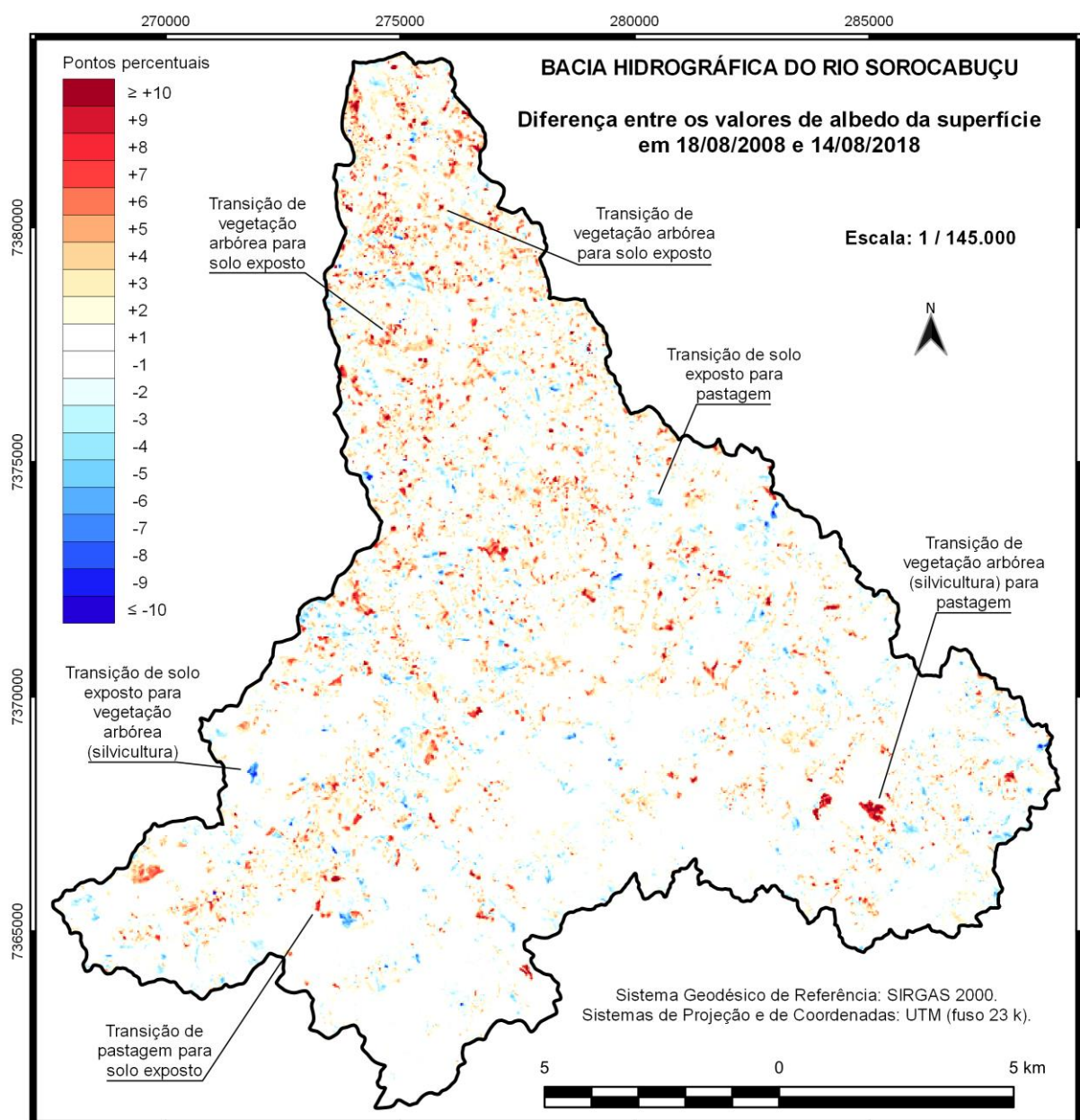
5.3 Detecção de mudanças no uso e cobertura da terra a partir da subtração entre imagens de albedo da superfície

Conforme destacado nas últimas subseções, a variação da temperatura do ar altera a magnitude tanto dos valores do saldo de radiação, quanto da temperatura da superfície e do fluxo de calor no solo. Assim sendo, análises “pixel a pixel”, ou mesmo a comparação direta entre os valores médios desses parâmetros, no transcurso das diferentes datas, não necessariamente evidenciarão os efeitos das mudanças ocorridas no uso e cobertura da terra, em função da “interferência” exercida pela variação da temperatura do ar. No presente trabalho, a estimativa do impacto das alterações na superfície sobre o comportamento desses parâmetros foi baseada no exame dos coeficientes de variação e histogramas de suas respectivas imagens. Também foram realizadas análises relativas, que apuraram o distanciamento entre as médias dos parâmetros em diferentes classes de uso e cobertura.

Dentre os parâmetros estudados, o albedo é o único cuja variação temporal não é influenciada pelas temperaturas do ar, o que permitiu não apenas executar os procedimentos anteriores, mas utilizar a comparação direta entre os seus valores médios na inferência dos impactos causados pelas mudanças na superfície.

Além disso, na medida em que o albedo se constitui numa característica inerente aos materiais que compõem a superfície, a determinação da variação espaço-temporal dos seus valores pode ser utilizada na detecção de alterações nos padrões de uso e cobertura da terra. Para tanto, a técnica aplicável corresponde à operação de subtração pixel a pixel entre imagens de diferentes datas. O resultado desse processamento é apresentado no mapa da Figura 22.

Figura 22 – Diferença entre os valores de albedo da superfície na BHRS em 18/08/2008 e 14/08/2018

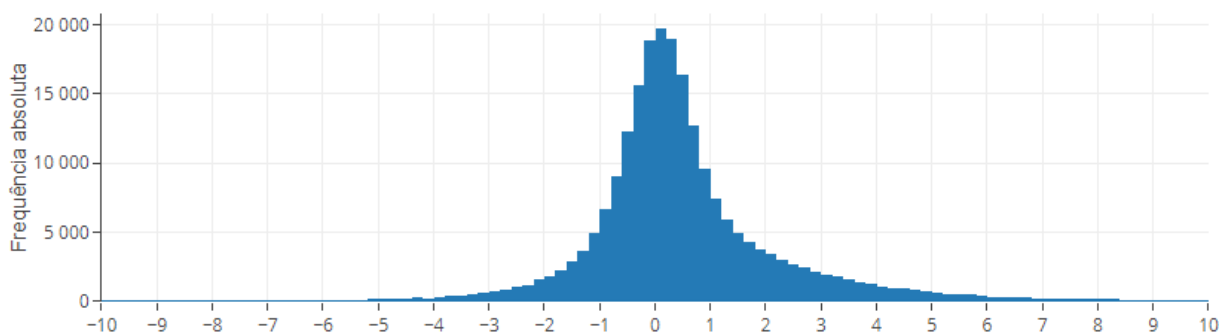


Fonte: autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016b, 2018b).

O referido mapa evidencia o sentido e a intensidade das alterações no comportamento energético da superfície, por efeito das mudanças no uso e cobertura da terra. O sentido de variação do albedo é indicativo da tipologia das modificações sobre a superfície. As áreas representadas na cor vermelha evidenciam o aumento nos valores de albedo, com a consequente elevação da perda energética, em função da redução na densidade da cobertura vegetal e/ou no conteúdo hídrico local; enquanto as áreas representadas na cor azul manifestam o comportamento oposto. A intensidade de variação do albedo expressa o grau de alteração impingido à cobertura vegetal e/ou ao teor de umidade local, representada nos diferentes tons assumidos pelas cores vermelha e azul. Variações de pequena magnitude (representadas, principalmente, pela cor branca e, eventualmente, pelos tons mais claros das outras cores) provavelmente estão associadas à variabilidade natural das diferentes categorias de uso e cobertura, não indicando, necessariamente, a ocorrência de intervenções antrópicas.

O histograma da imagem de diferença entre os valores de albedo da superfície é apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Histograma da imagem de diferença entre os valores de albedo da superfície na BHRS em 18/08/2008 e 14/08/2018 (pontos percentuais)



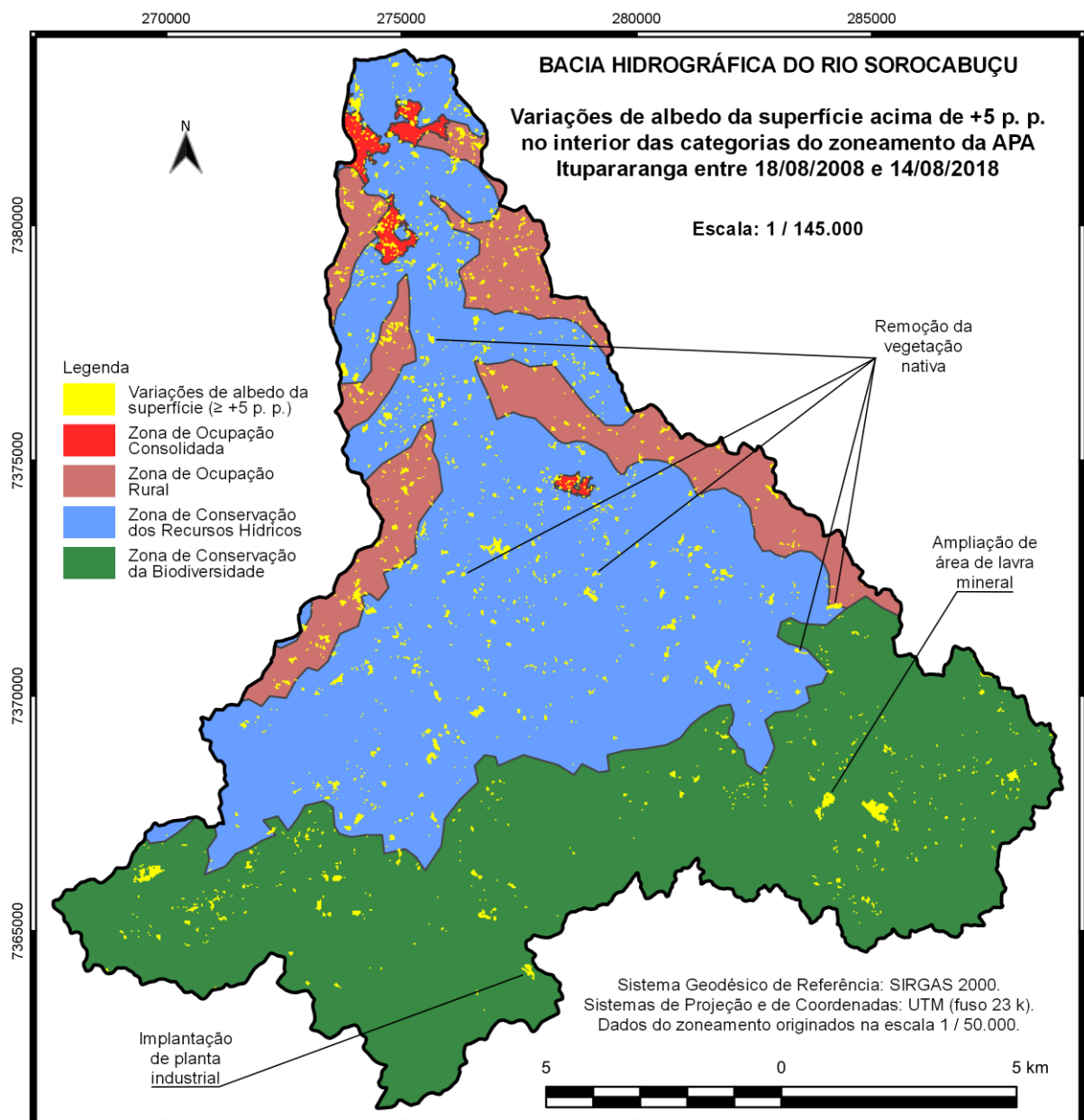
Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016b, 2018b).

Nota: Classes de baixa frequência (que representam valores extremos) foram suprimidas.

A maioria dos pixels não sofreu variações significativas de albedo, o que está expresso no posicionamento da classe modal em torno do valor zero, atestando que a maior parte da área da bacia não foi submetida a modificações no seu uso e cobertura, entre os anos de 2008 e 2018. No entanto, a sutil assimetria positiva demonstra que, dentre os pixels que tiveram seus valores alterados, a maioria o foi no sentido dos valores mais elevados de albedo, denotando a redução da cobertura vegetal, além da ampliação das pastagens e áreas urbanas.

Segundo Robinove (1983), pode-se estabelecer um limiar que selecione apenas os incrementos mais expressivos nos valores de albedo ($\geq +5$ p. p.), representativos das mudanças mais significativas ocorridas sobre a superfície. O mapa da Figura 24 apresenta as variações de albedo acima de +5 p. p., sobrepostas às categorias do zoneamento da APA Itupararanga, no âmbito da BHRS.

Figura 24 – Variações de albedo da superfície acima de +5 p. p. no interior das categorias do zoneamento da APA Itupararanga, no âmbito da BHRS, entre 18/08/2008 e 14/08/2018



Fonte: autoria própria. Variação do albedo da superfície: a partir de dados fornecidos por NASA (2016b, 2018b). Zoneamento: Gestão da APA Itupararanga [201-].

A área com variações positivas acima de 5 p. p. foi igual a 5,89 km², o equivalente a 2,91 % do total da bacia. A maior parte está associada a espaços dedicados à agricultura e pecuária, inseridos em glebas com ocupação antrópica consolidada. No entanto, várias áreas (representadas por pequenos pontos) estão relacionadas à remoção da vegetação nativa, principalmente na Zona de Conservação dos Recursos Hídricos. A principal característica do processo de desmatamento na BHRS diz respeito à pequena dimensão individual das áreas desmatadas, em decorrência da reduzida extensão das propriedades rurais na bacia. No interior da Zona de Conservação da Biodiversidade, verificou-se a implementação de atividades que não deveriam ser consideradas compatíveis com os propósitos da zona, a exemplo da atividade de extração mineral.

A partir da análise dos mapas das figuras 22 e 24, constata-se a utilidade da técnica de subtração entre imagens de albedo, cuja aplicação pode atender a demandas do monitoramento ambiental, na identificação de áreas que exijam ações prioritárias. Embora já existam, há muito tempo, referências ao procedimento (ROBINOVE, 1983), na atualidade são escassas a menção (LOPES *et al.*, 2010) e a utilização prática da ferramenta (PEREIRA; PASCHOAL; ARAÚJO, 2014). A eficiência na obtenção do produto final, mediante a automação dos processamentos em ambiente SIG, e a significância dos resultados, eventualmente até dispensando, em alguns casos, a execução de classificações de imagens, deveriam justificar a adoção mais extensiva da técnica.

6 CONCLUSÃO

No período compreendido entre julho de 2008 e agosto de 2018, o padrão espacial de uso e cobertura da terra na BHRS não foi submetido a alterações significativas. As principais mudanças correspondem à redução da área ocupada pela vegetação nativa, e ao avanço dos espaços dedicados à agropecuária. Apesar de pouco expressivas (quanto à sua extensão), tais modificações assumem certo grau de relevância, considerando o papel dos fragmentos florestais locais na conservação da biodiversidade, dos recursos hídricos e na manutenção do equilíbrio climático.

As alterações implementadas sobre a superfície, ainda que restritas, efetivamente promoveram impactos no comportamento dos parâmetros biofísicos estimados por meio do modelo SEBAL. A magnitude dessas implicações pôde ser mensurada através da análise da variabilidade de cada um dos parâmetros. Os valores mais elevados dos coeficientes de variação de todos os parâmetros foram registrados em uma mesma imagem do ano de 2018 (14/08), enquanto os mais reduzidos em uma mesma imagem do ano de 2008 (18/08). Dessa forma, as médias anuais dos coeficientes de variação em 2018 foram sempre superiores às verificadas em 2008. Adicionalmente, a quase totalidade dos histogramas das imagens de 2018 apresentou incrementos em suas dispersão e assimetria, quando comparados aos de 2008.

Conforme apontou a hipótese do trabalho, alguns dos parâmetros biofísicos se mostraram mais propícios à identificação das modificações no uso e cobertura da terra, havendo uma escala de contribuição para com os estudos de impactos climáticos.

O albedo revelou possuir a maior adequação a esse fim, dado ser uma característica inerente aos materiais que compõem a superfície, de modo que sua dinâmica não é afetada pelas variações na temperatura do ar. Isso permite que as alterações nos valores desse parâmetro sejam diretamente relacionáveis às mudanças no uso e cobertura, sendo o único que propicia a realização de análises espaço-temporais do tipo “pixel a pixel”, e a comparação direta entre valores mínimos, médios, máximos e amplitudes. Soma-se, ainda, o fato de que os valores de albedo são de fácil determinação, obtidos já nas primeiras etapas de processamento do SEBAL, não demandando a utilização de qualquer medição de campo.

Os dados de fluxo de calor no solo incorporam a maior quantidade de informação, sintetizando o conjunto das variáveis calculadas pelo SEBAL, até essa etapa do processamento. Devido à sua maior capacidade de discriminação das características da superfície, atestada pelo fato de ter sido o único a apresentar um histograma bimodal, o mencionado parâmetro expôs

a mais elevada diferença entre as médias anuais dos coeficientes de variação. Entretanto, as flutuações na temperatura do ar influem na magnitude dos valores de fluxo de calor no solo, impedindo uma associação tão direta entre as mudanças ocorridas na superfície e o comportamento do parâmetro; bem como não permitindo o emprego do mesmo tipo de tratamento aplicado ao albedo.

Nos casos do albedo e do fluxo de calor no solo, parâmetros que demonstraram maior sensibilidade às características da superfície, os valores mais elevados dos coeficientes de variação foram registrados nas duas imagens do ano de 2018; ao passo que os menores nas duas imagens de 2008. A ordem de magnitude dos coeficientes de variação desses parâmetros também foi significativamente superior à observada no saldo de radiação e temperatura da superfície.

Além de serem afetadas pelas variações na temperatura do ar, as imagens de saldo de radiação e temperatura da superfície carregam uma quantidade de informação inferior (comparativamente ao fluxo de calor no solo), o que ficou evidenciado a partir dos seus histogramas unimodais. Os dados de temperatura da superfície ainda possuem o problema da menor resolução espacial original, responsável pela restrição na sua capacidade de detecção dos valores extremos. Face à menor sensibilidade desses parâmetros às características da superfície, os dois maiores valores dos seus respectivos coeficientes de variação não foram registrados conjuntamente nas imagens do ano de 2018, nem os menores nas imagens de 2008.

Nos casos do fluxo de calor no solo, saldo de radiação e temperatura da superfície, a comparação entre valores mínimos, médios, máximos e amplitudes exige uma certa cautela, pois, conforme demonstrado, tais medidas variam em função da temperatura do ar. Porém, a análise dos coeficientes de variação e do formato dos histogramas mostrou-se bastante eficiente na identificação dos impactos que as mudanças no uso e cobertura da terra causaram à dinâmica desses parâmetros. Portanto, ainda que com diferentes graus de contribuição, todos os parâmetros biofísicos estudados podem ser empregados como critérios de avaliação ambiental e indicadores das mudanças no uso e cobertura da terra.

Dentre as limitações da pesquisa, a principal diz respeito ao uso de dados de temperatura do ar coletados fora da bacia, em virtude da ausência de estações termométricas no seu interior. Embora obtidos dentro do raio de distância recomendado, os dados têm a sua representatividade reduzida com o afastamento entre os pontos de coleta e a área de estudo, e com a diferença altimétrica entre esses locais. Por sua vez, a precisão dos dados é diminuída pelo procedimento de interpolação dos valores para o horário de passagem dos satélites.

De qualquer forma, o registro da temperatura do ar em diferentes pontos do interior da bacia, no exato momento da passagem do satélite, resultaria em valores distintos para a referida variável meteorológica, sendo o emprego dessa medição pontual uma limitação associada ao próprio algoritmo.

A despeito dessa deficiência, a constatação da substituição dos remanescentes florestais por áreas destinadas às atividades agropecuárias, no interior da BHRS, evidencia o descumprimento da Lei Estadual nº 10.100, que institui a APA Itupararanga e aponta para a obrigatoriedade do respeito às normas do seu Plano de Manejo. Dentre essas normas está o zoneamento da APA, que prevê o disciplinamento do uso e ocupação do solo, paralelamente à preservação e conservação dos fragmentos de vegetação nativa. A tendência à progressão do desmatamento implicará em danos à quantidade e qualidade das águas responsáveis pelo abastecimento de um montante superior a 1.000.000 de pessoas, além de outros prejuízos ambientais, como a perda de biodiversidade, degradação do solo, alterações microclimáticas e emissão de GEE.

Embora medidas tradicionais, como a imposição de restrições legais e a promoção de ações de conscientização ambiental, sejam indispensáveis, outros mecanismos mais criativos e eficientes, como o pagamento por serviços ambientais, poderiam contribuir para o alcance de um estágio em que ocorra o uso efetivamente sustentável dos recursos naturais na BHRS.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, Aziz Nacib. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. 5. ed. São Paulo: Ateliê, 2008.
- ALLEN, Richard *et al.* Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 25, iss. 26, p. 4011-4027, 2011.
- ALMEIDA, Vilma Palazetti de; CARVALHO, Renato Borges; CATHARINO, Eduardo Luís Martins. Flora. In: BEU, Sandra Eliza; SANTOS, André Cordeiro Alves dos; CASALI, Simone (org.). **Biodiversidade na APA Itupararanga: condições atuais e perspectivas futuras**. 1. ed. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2011. *E-book*. cap. 6, p. 72-90. Disponível em: <http://apaitupararanga2.blogspot.com/2011/10/biodiversidade-na-apa-itupararanga.html>. Acesso em: 5 mar. 2018.
- ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* **Köppen Brazilian municipalities**. Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 2013b. 1 base de dados. Disponível em: <https://www.ipef.br/geodatabase/>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013a. Disponível em: <https://www.ipef.br/geodatabase/>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. Climatologia e gestão do espaço urbano. **Mercator**, Fortaleza, v. 9, n. 1, p. 71-90, dez. 2010. Disponível em: <http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/534>. Acesso em: 14 out. 2019.
- ARRAES, Francisco Dirceu Duarte; ANDRADE, Eunice Maia de; SILVA, Bernardo Barbosa da. Dinâmica do balanço de energia sobre o Açude Orós e suas adjacências. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 1, p. 119-127, jan./mar. 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/view/2024/pdf>. Acesso em: 3 fev. 2019.
- AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os trópicos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.
- BASTIAANSSEN, W. G. M.; BANDARA, K. M. P. S. Evaporative depletion assessments for irrigated watersheds in Sri Lanka. **Irrigation Science**, [s. l.], v. 21, iss. 1, p. 1-15, 2001.
- BASTIAANSSEN, W. G. M. *et al.* A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 213-213, p. 198-212, 1998.
- BASTIAANSSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates**. 1995. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias e Ambientais) – Universidade Agrícola de Wageningen, Wageningen, 1995. Disponível em: <https://edepot.wur.nl/206553>. Acesso em: 3 abr. 2018.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 229, iss. 1-2, p. 87-100, 2000.

BATISTA, W. R. M. *et al.* Determinação do balanço de radiação com auxílio de imagens orbitais na Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré, Sergipe. **Scientia Plena**, São Cristóvão, v. 9, n. 4, p. 1-10, 2013. Disponível em: <https://www.scienciaplenu.org.br/sp/article/view/1102/724>. Acesso em: 5 maio 2018.

BERNARDI, Iara. **A implantação da APA de Itupararanga e seus reflexos nas políticas públicas e na conservação dos recursos naturais**. 2011. Dissertação (Mestrado em Diversidade Biológica e Conservação) – Centro de Ciência e Tecnologia para a Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/1513>. Acesso em: 3 abr. 2018.

BEU, Sandra Eliza; MISATO, Marcelo Takashi; HAHN, Claudette M. APA de Itupararanga. In: BEU, Sandra Eliza; SANTOS, André Cordeiro Alves dos; CASALI, Simone (org.). **Biodiversidade na APA Itupararanga: condições atuais e perspectivas futuras**. 1. ed. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2011. *E-book*. cap. 3, p. 33-56. Disponível em: <http://apaitupararanga2.blogspot.com/2011/10/biodiversidade-na-apa-itupararanga.html>. Acesso em: 5 mar. 2018.

BEZERRA, Bergson Guedes. **Balanço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no Cariri cearense através do algoritmo SEBAL**. 2006. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006. Disponível em: http://www.dca.ufcg.edu.br/posgrad_met/dissertacoes/BergsonGBezerra_2006.pdf. Acesso em: 5 out. 2019.

BEZERRA, Joel M. *et al.* 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. Disponível em: <http://www.agriambi.com.br/revista/v18n01/v18n01a10.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2018.

BEZERRA, Marcus V. C.; SILVA, Bernardo B. da; BEZERRA, Bergson G. Avaliação dos efeitos atmosféricos no albedo e NDVI obtidos com imagens de satélite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 7, p. 709-717, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v15n7/v15n07a09.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2018.

BRUNINI, Orivaldo. **Dúvida sobre acesso aos dados das estações do CIIAGRO**. Destinatário: Lauro Pessoa Maia Júnior. [S. l.], 21 fev. 2019. 1 mensagem eletrônica.

CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu. Introdução. In: CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira. (org.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. *E-book*. cap. 1, p. 1-5. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 7 set. 2020.

CÂMARA, Gilberto *et al.* Análise espacial e Geoprocessamento. In: DRUCK, Suzana *et al.* (ed.). **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2004. *E-book*. cap. 1, [26] p. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/>. Acesso em: 8 set. 2020.

CARNEIRO, Rayonil G. *et al.* Variabilidade da temperatura do solo em função da liteira em fragmento remanescente de mata atlântica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 1, p. 99-108, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v18n1/v18n1a13.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2019.

CASTANHO, Luciano Mendes; CARMIGNOTTO, Ana Paula; SILVA, Lucas Andrei Campos. Vertebrados terrestres. In: BEU, Sandra Eliza; SANTOS, André Cordeiro Alves dos; CASALI, Simone (org.). **Biodiversidade na APA Itupararanga**: condições atuais e perspectivas futuras. 1. ed. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2011. *E-book*. cap. 8, p. 95-107. Disponível em: <http://apaitupararanga2.blogspot.com/2011/10/biodiversidade-na-apa-itupararanga.html>. Acesso em: 5 mar. 2018.

CHANDER, Gyanesh; MARKHAM, Brian L.; BARSÍ, Julia A. Revised Landsat-5 thematic mapper radiometric calibration. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, New York, v. 4, n. 3, p. 490-494, jul. 2007. Disponível em: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/L5TM_postcal.pdf. Acesso em: 10 maio 2018.

CHANDER, Gyanesh; MARKHAM, Brian L. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 41, n. 11, p. 2674-2677, nov. 2003. Disponível em: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/L5_TM_Cal_2003.pdf. Acesso em: 2 maio 2018.

CHINAQUE, Fernanda Fernandez. **Avaliação da efetividade de gestão das áreas de proteção ambiental**: o caso da APA de Itupararanga. 2017. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade na Gestão Ambiental) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/9207>. Acesso em: 3 dez. 2019.

CIIAGRO. **[Temperatura do ar e precipitação nas estações meteorológicas São Lourenço da Serra e Juquitiba]**. [S. l.]: CIIAGRO, 2019. Disponível em: <http://ciiagro.org.br/restrito/lpessoa/choice.php>. Acesso em: 21 fev. 2019.

COMPAORÉ, Halidou *et al.* Evaporation mapping at two scales using optical imagery in the White Volta Basin, Upper East Ghana. **Physics and Chemistry of the Earth**, [s. l.], v. 33, iss. 1-2, p. 127-140, 2008.

COOK, John *et al.* Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 1-7, 2016. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/4/048002/pdf>. Acesso em: 5 dez. 2019.

CPRM. **Breve descrição das unidades litoestratigráficas aflorantes no estado de São Paulo**. [S. l.]: CPRM, [2006]. Disponível em: http://lrjweb07.cprm.gov.br/Downloads/Integracao_Geologica_Regional/Mapas_Geologicos_Estaduais/Sao_Paulo/Mapa_Geologico_do_Estado_de_Sao_Paulo_1-750.000_RELATORIO.zip. Acesso em: 25 nov. 2019.

CPRM. **Litologia_WGS84**. [S. l.]: CPRM, 2009. 1 arquivo *shapefile*. Disponível: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/14713>. Acesso em: 20 nov. 2019.

CPRM. **Mapa_Geologico_do_Estado_Sao_Paulo_1.750.000_VETORES**. [S. l.]: CPRM, [2013]. Vários arquivos *shapefile*. Disponível em: http://lrjweb07.cprm.gov.br/Downloads/Integracao_Geologica_Regional/Mapas_Geologicos_Estaduais/Sao_Paulo/Mapa_Geologico_do_Estado_Sao_Paulo_1.750.000_VETORES.zip. Acesso em: 21 nov. 2019.

DAEE. **[Acumulados diário e mensal de precipitação nas estações pluviométricas Ibiúna (E4-047) e Mato do Gado (E4-131)]**. [S. l.]: DAEE, 2019. 1 base de dados. Disponível em: <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>. Acesso em: 23 jan. 2019.

DUBREUIL, Vincent *et al.* Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Confins**, [s. l.], n. 37, não paginado, 2018. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/15738?lang=pt>. Acesso em: 16 nov. 2019.

ESRI. **Accuracy assessment for image classification**. [S. l.]: Esri, 2018b. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.6/manage-data/raster-and-images/accuracy-assessment-for-image-classification.htm>. Acesso em 25 ago. 2019.

ESRI. **ArcGIS Desktop**. Version 10.6. [S. l.]: Esri, 2018a. 1 CD-ROM.

ESRI. **Processing classified output**. [S. l.]: Esri, 2019. Disponível em: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.6/extensions/spatial-analyst/image-classification/processing-classified-output.htm>. Acesso em: 25 ago. 2019.

ESTANCIONE, Luiz Maria Brandão. **Governança ambiental e aprendizagem social: estudo de caso da APA Itupararanga**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

FF (São Paulo). **Plano de manejo da área de proteção ambiental (APA) Itupararanga**. São Paulo: Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, [2010]. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/fundacaoflorestal/planos-de-manejo/planos-de-manejo-planos-concluidos/plano-de-manejo-apa-itupararanga/>. Acesso em: 2 dez. 2019.

FLORENZANO, Tereza Gallotti. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

FRANCO, Renato Alberto Momesso; HERNANDEZ, Fernando Braz Tangerino; TEIXEIRA, Antônio Eriberto de Castro. Mapeamento da variação espacial e temporal do balanço de radiação e energia em diferentes tipos de uso e ocupação do solo. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 68, n. 10, p. 1975-1992, nov./dez. 2016. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44295/23379>. Acesso em: 14 nov. 2018.

FUNARI, Frederico Luiz; PEREIRA FILHO, Augusto José. Estimativa do fluxo de calor no solo a partir da temperatura do solo em São Paulo, SP. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 38, n. 1, p. 49-57, 2017. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rig/article/view/11712/11251>. Acesso em: 25 set. 2019.

GALVANI, Emerson; ESCOBEDO, João Francisco; PEREIRA, André Belmont. Balanço de radiação e fluxo de calor no solo em ambiente natural e protegido cultivado com pepineiro. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 2, p. 139-147, 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/brag/v60n2/a10v60n2.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2019.

GESTÃO DA APA ITUPARARANGA. **Zoneamento APA.kml**. [S. l.]: APA Itupararanga, [201-]. 1 arquivo “.kml”. Disponível em: <http://apaitupararangaplanodemanejo.blogspot.com/>. Acesso em: 23 nov. 2019.

GOMES, Heliofábio Barros *et al.* Balanço de radiação em diferentes biomas no estado de São Paulo mediante imagens Landsat 5. **Geociências**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 153-164, 2009. Disponível em: https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/28_2/Art%2004_Gomes.pdf. Acesso em: 4 set. 2018.

GOMES, Lidiane Cristina Félix; SANTOS, Carlos Antonio Costa dos; ALMEIDA, Hermes Alves de. Balanço de energia à superfície para a cidade de Patos-PB usando técnicas de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 6, n. 1, p. 15-28, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/232804/26803>. Acesso em: 9 abr. 2018.

GOMES, Waldnir. APA Itupararanga completa 20 anos com programação comemorativa. [Entrevista cedida a] Larissa Pessoa. **Jornal Cruzeiro do Sul**, [Sorocaba], 1 dez. 2018. Disponível em: <https://www.jornalcruzeiro.com.br/sorocaba/apa-itupararanga-completa-20-anos-com-programacao-comemorativa/>. Acesso em: 20 jan. 2020.

GOOGLE. **Google Earth Pro**. Versão 7.3.2.5776. [S. l.]: Google, 2019. Disponível em: <https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>. Acesso em: 15 mar. 2019.

IBGE. **Biomass_250mil**. [S. l.]: IBGE, 2019a. 1 arquivo *shapefile*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/estudos-ambientais/15842biomas.html?=&t=downloads>. Acesso em: 30 nov. 2019.

IBGE. **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil**: compatível com a escala 1:250.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2019b. *E-book*. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101676.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2019.

IBGE. **Br_unidades_da_federação**. [S. l.]: IBGE, 2018a. 1 arquivo *shapefile*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 23 nov. 2019.

IBGE. **Sp_municípios**. [S. l.]: IBGE, 2018b. 1 arquivo *shapefile*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 23 nov. 2019.

IF (São Paulo). **Inventário florestal da vegetação nativa do estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, 2009. 1 mapa. Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/sifesp/2013/12/mapainventario.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2019.

IGC (São Paulo). **Cartas topográficas 1:10.000**. [S. l.]: IGC-SP, 2014. 1 mosaico de cartas topográficas, p&b. Escala 1:10.000. Disponível em: <http://datageo.ambiente.sp.gov.br/>. Acesso em: 5 mar. 2018.

IPCC. **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. [S. l.]: IPCC, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl/>. Acesso em: 3 dez. 2019.

KICH, Elisa de Mello. **Calibração automática do modelo de estimativa de evapotranspiração por sensoriamento remoto (SEBAL)**. 2018. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/189163>. Acesso em: 20 nov. 2019.

KOBRICK, Michael; CRIPPEN, Robert. **SRTMGL1 v003: NASA Shuttle Radar Topography Mission global 1 arc second**. [S. l.]: USGS, [201-]. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl1v003/>. Acesso em: 11 jul. 2019.

LIRA, Cristina *et al.* **Sistemas de Informação Geográfica: análise de dados de satélites**. Lisboa: Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos, 2016. Disponível em: https://www.sophia-mar.pt/uploads/GUIA_5_SIG_Analise_de_dados_satelite.pdf. Acesso em: 17 dez. 2017.

LONGLEY, Paul A. *et al.* **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

LOPES, Helio L. *et al.* Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças na cobertura e uso do solo em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 11, p. 1210-1219, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v14n11/v14n11a11.pdf>. Acesso em: 2 set. 2019.

LUCENA, Andrews José de; PERES, Leonardo de Faria; MARINO, Tiago Badre. **Glossário de termos**. Seropédica: Climatologia RJ, 2019. Disponível em: <http://climatologia.com.br/glossario>. Acesso em: 2 ago. 2019.

MACHADO, Célia Cristina *et al.* Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM – Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de Pernambuco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [São José dos Campos], v. 29, n. 1, p. 55-67, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v29n1/a06v29n1.pdf>. Acesso em: 9 nov. 2018.

MARIN, Fábio Ricardo; ASSAD, Eduardo Delgado; PILAU, Felipe Gustavo. **Clima e ambiente**: introdução à Climatologia para Ciências Ambientais. Campinas: Embrapa, 2008. *E-book*. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/31891>. Acesso em: 28 jul. 2019.

MARTINS, Alécio Perini; ROSA, Roberto. Procedimentos metodológicos para estimativa de variáveis relacionadas ao balanço de energia no sistema terra-atmosfera: uma revisão de literatura. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, v. 1, n. 41, p. 100-119, jan./jun. 2019. Disponível em: <http://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/6156/4938>. Acesso em: 10 out. 2019.

MATOS, Rafaella Chrystiane de Moura; CANDEIAS, Ana Lúcia Bezerra; AZEVEDO, José Roberto Gonçalves de. Estimativas do saldo de radiação instantâneo no entorno do reservatório de Itaparica – PE com uso de imagens orbitais. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 68, n. 3, p. 641-654, mar./abr. 2016. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44420/23495>. Acesso em: 3 maio 2019.

MENDONÇA, Francisco; DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, Tati de. Aritmética de bandas. In: MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, Tati de (org.). **Introdução ao processamento de imagens e Sensoriamento Remoto**. Brasília, DF: UnB, 2012. *E-book*. cap. 9, p. 138-153. Disponível em: <http://memoria.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>. Acesso em: 4 mar. 2017.

MENESES, Paulo Roberto. Princípios de Sensoriamento Remoto. In: MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, Tati de (org.). **Introdução ao processamento de imagens e Sensoriamento Remoto**. Brasília, DF: UnB, 2012. *E-book*. cap. 1, p. 1-33. Disponível em: <http://memoria.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>. Acesso em: 4 mar. 2017.

MESQUITA, Francisco Luiz Leitão de. **Monitoramento do balanço de radiação na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. 2012. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://meteorologia.igeo.ufrj.br/pos/pesquisa/dissertacao>. Acesso em: 23 ago. 2019.

MONTEIRO, Pricylla Ferraz Câmara *et al.* Estimativa dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração para áreas de cultivo de soja no sul do Brasil utilizando imagens do sensor TM Landsat 5. **Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 1, p. 72-80, 2014. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/brag/v73n1/aop_bragantia_aag2144.pdf. Acesso em: 12 abr. 2018.

MORAIS, Josyceyla Duarte. **Avaliação de modelos digitais de elevação provenientes de dados de sensoriamento remoto de distribuição gratuita**. 2017. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/IGCM-AQPM/1/disserta__o_josy_09_08_17.pdf. Acesso em: 10 jul. 2020.

NASA. **LC08_L1TP_219076_20180814_20180828_01_T1**. [S. l.]: USGS, 2018b. 7 bandas espectrais de 1 imagem de satélite, p&b. Satélite Landsat 8. Órbita/ponto: 219/76. Data de captura: 14 ago. 2018. Produto *Level 1*. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 10 dez. 2018.

NASA. **LC08_L1TP_219076_20180814_20180828_01_T1**. [S. l.]: USGS, 2019c. 3 bandas espectrais de 1 imagem de satélite, p&b. Satélite Landsat 8. Órbita/ponto: 219/76. Data de captura: 14 ago. 2018. Produto *Level 2*. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 23 ago. 2019.

NASA. **LC08_L1TP_219076_20180830_20180911_01_T1**. [S. l.]: USGS, 2018a. 7 bandas espectrais de 1 imagem de satélite, p&b. Satélite Landsat 8. Órbita/ponto: 219/76. Data de captura: 30 ago. 2018. Produto *Level 1*. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 10 dez. 2018.

NASA. **LC08_L1TP_219076_20180830_20180911_01_T1**. [S. l.]: USGS, 2019d. 3 bandas espectrais de 1 imagem de satélite, p&b. Satélite Landsat 8. Órbita/ponto: 219/76. Data de captura: 30 ago. 2018. Produto *Level 2*. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 15 ago. 2019.

NASA. **LC08_L1TP_219077_20180830_20180911_01_T1**. [S. l.]: USGS, 2018c. 3 bandas espectrais de 1 imagem de satélite, p&b. Satélite Landsat 8. Órbita/ponto: 219/77. Data de captura: 30 ago. 2018. Produto *Level 1*. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 10 dez. 2018.

NASA. **LT05_L1TP_219076_20080717_20161030_01_T1**. [S. l.]: USGS, 2016a. 7 bandas espectrais de 1 imagem de satélite, p&b. Satélite Landsat 5. Órbita/ponto: 219/76. Data de captura: 17 jul. 2008. Produto *Level 1*. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 10 dez. 2018.

NASA. **LT05_L1TP_219076_20080717_20161030_01_T1**. [S. l.]: USGS, 2019a. 3 bandas espectrais de 1 imagem de satélite, p&b. Satélite Landsat 5. Órbita/ponto: 219/76. Data de captura: 17 jul. 2008. Produto *Level 2*. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 23 ago. 2019.

NASA. **LT05_L1TP_219076_20080818_20161030_01_T1**. [S. l.]: USGS, 2016b. 7 bandas espectrais de 1 imagem de satélite, p&b. Satélite Landsat 5. Órbita/ponto: 219/76. Data de captura: 18 ago. 2008. Produto *Level 1*. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 10 dez. 2018.

NASA. **LT05_L1TP_219076_20080818_20161030_01_T1**. [S. l.]: USGS, 2019b. 3 bandas espectrais de 1 imagem de satélite, p&b. Satélite Landsat 5. Órbita/ponto: 219/76. Data de captura: 18 ago. 2008. Produto *Level 2*. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 15 ago. 2019.

NASA. **S24W048.SRTMGL1**. [S. l.]: USGS, 2013. 1 imagem de radar, p&b. Ônibus espacial *Endeavour (Shuttle Radar Topography Mission)*. Latitude / longitude do ponto central: 23°30'00.00"S / 47°30'00.00"W. Data de captura: 11 fev. 2000. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 10 dez. 2018.

NASA. **The NASA Earth's Energy Budget Poster**. [S. l.]: NASA, [2014]. Disponível em: https://science-edu.larc.nasa.gov/energy_budget/pdf/ERB-poster-combined-update-8.2019v4.pdf. Acesso em: 22 out. 2019.

NOVO, Evelyn M. L. de Moraes. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

OLIVEIRA, Gabriel de; MORAES, Elizabete Cária; RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor. Balanço de radiação em áreas de expansão da cana-de-açúcar no estado de São Paulo com uso de dados orbitais MODIS/Aqua. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 66, n. 3, p. 419-431, maio/jun. 2014. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44752/23764>. Acesso em: 4 jun. 2019.

OLIVEIRA, Lédjane Maria Maciel de *et al.* Análise quantitativa de parâmetros biofísicos de bacia hidrográfica obtidos por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 9, p. 1209-1217, set. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/pab/v47n9/05.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2018.

OLIVEIRA, Lucimar Luciano de; VIANELLO, Rubens Leite; FERREIRA, Nelson Jesus. **Meteorologia fundamental**. Erechim: EdFAPES, 2001.

OLIVEIRA, Maria Betânia Leal de *et al.* Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 21, n. 3b, p. 378-386, 2006. Disponível em: http://www.rbmet.org.br/port/revista/revista_artigo.php?id_artigo=220. Acesso em: 4 mar. 2018.

PARECE, Tammy; CAMPBELL, James; MCGEE, John. **Remote sensing in an ArcMap environment**. [S. l.]: Virginia View, [2014]. *E-book*. Disponível em: https://www.virginia-view.cnre.vt.edu/tutorial/RS_in_ArcGIS_AllChapters.pdf. Acesso em: 2 ago. 2019.

PAVÃO, Vagner Marques *et al.* Impacto da conversão da cobertura natural em pastagem e área urbana sobre variáveis biofísicas no sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [São José dos Campos], v. 32, n. 3, p. 343-351, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v32n3/0102-7786-rbmet-32-03-0343.pdf>. Acesso em: 10 out. 2019.

PBMC. **Base científica das mudanças climáticas: volume 1 - primeiro relatório de avaliação nacional**. Ed. rev. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016. *E-book*. Disponível em: <http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/index.php/pt/publicacoes/relatorios-pbmc>. Acesso em: 12 dez. 2019.

PEREIRA, Antônio Carlos Lima; PASCHOAL, Sávio Samri Luna; ARAÚJO, Paulo César de. Análise espaço-temporal da desertificação no semiárido do Nordeste do Brasil através de imagens de satélite LANDSAT 5. **Sociedade e Território**, Natal, v. 26, n. 2, p. 181-196, jul./dez. 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/sociedadeeterritorio/article/view/5294/4328>. Acesso em: 2 set. 2019.

PEREIRA, Antônio Roberto; ANGELOCCI, Luiz Roberto; SENTELHAS, Paulo Cesar. **Meteorologia Agrícola**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2007. Disponível em: http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce306/MeteorAgricola_Apostila2007.pdf. Acesso em: 18 set. 2019.

PEREIRA, Gabriel *et al.* Estudo preliminar da estimativa da reflectância e albedo de microssistemas pantaneiros a partir de imagens de satélite. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l.], v. 59, n. 1, p. 55-61, abr. 2007. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43961/23214>. Acesso em: 1 ago. 2020.

PEREIRA, João Antônio dos Santos; TAVARES JÚNIOR, João Rodrigues. Classificação supervisionada e saldo de radiação para discriminação de alvos de superfície no entorno do reservatório de Itaparica - PE. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 69, n. 6, p. 1211-1222, jun. 2017. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44321/23403>. Acesso em: 20 abr. 2018.

PIANA, Clause Fátima de Brum; MACHADO, Amauri de Almeida; SELAU, Lisiane Priscila Roldão. **Estatística básica**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2009. Disponível em: http://www.energiapura.net.br/alunos/planejamento_experimentos/Aulas_PAE/aula1_PAE/Apostila_EB.pdf. Acesso em: 19 set. 2019.

POWELL, James. Scientists reach 100% consensus on anthropogenic global warming. **Bulletin of Science, Technology & Society**, [s. l.], v. 37, iss. 4, p. 183-184, 2019. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0270467619886266>. Acesso em: 20 dez. 2019.

ROBINOVE, Charles J. Space platform albedo measurements as indicators of change in arid lands. **Advances in Space Research**, Great Britain, v. 2, n. 8, p. 31-35, 1983.

ROSA, Roberto. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. 7. ed. Uberlândia: EDUFU, 2009.

ROSSI, Marcio. **Mapa pedológico do estado de São Paulo**: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017b. *E-book*. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/2017/09/mapa-pedologico-do-estado-de-sao-paulo-revisado-e-ampliado/>. Acesso em: 26 nov. 2019.

ROSSI, Marcio. **PEDOLOGICO_SP_ROSSI_2017**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017a. 1 arquivo *shapefile*. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/2017/09/mapa-pedologico-do-estado-de-sao-paulo-revisado-e-ampliado/>. Acesso em: 26 nov. 2019.

SABESP. **Relatório anual de qualidade da água 2018**: município de Ibiúna. [São Paulo]: Sabesp, 2018. Disponível em: <http://www.sabesp.com.br/calandraweb/toq/2018/IBIUNA.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2020.

SALLES, M. H. D. *et al.* Avaliação simplificada de impactos ambientais na bacia do Alto Sorocaba (SP). **Revista de Estudos Ambientais**, [Blumenau], v. 10, n. 1, p. 6-20, jan./jun. 2008. Disponível em: <https://proxy.furb.br/ojs/index.php/rea/article/view/897/677>. Acesso em: 12 nov. 2019.

SANTOS, Francineide Amorim Costa. **Alterações no balanço radiativo e impactos climáticos decorrentes do uso da terra no estado de São Paulo**. 2011. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/4728>. Acesso em: 14 ago. 2018.

SANTOS, Francineide Amorim Costa *et al.* Desempenho de metodologias para estimativa do saldo de radiação a partir de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [São José dos Campos], v. 30, n. 3, p. 295-306, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v30n3/0102-7786-rbmet-30-03-00295.pdf>. Acesso em: 6 out. 2019.

SANTOS, Juliana da Costa *et al.* Análise multitemporal da temperatura da superfície através de imagens do TM Landsat 5, na cidade de Palmas-TO. **Revista de Geografia**, Recife, v. 33, n. 3, p. 273-291, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/229078/23483>. Acesso em: 9 dez. 2019.

SÃO PAULO (Estado). Coordenadoria de Planejamento Ambiental; Secretaria de Meio Ambiente. **Rede de Drenagem do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, 2013. 1 arquivo *shapefile*. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/cpla/mapa-da-rede-de-drenagem-do-estado-de-sao-paulo/>. Acesso em: 23 nov. 2019.

SÃO PAULO (Estado). Instituto Geológico; Coordenadoria de Planejamento Ambiental. **UBC_v2**. São Paulo: Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, 2014a. 1 arquivo *shapefile*. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/cpla/unidades-basicas-de-compartimentacao-do-meio-fisico-do-estado-de-sao-paulo/>. Acesso em: 20 nov. 2019.

SÃO PAULO (Estado). Instituto Geológico; Coordenadoria de Planejamento Ambiental. **Unidades Básicas de Compartimentação do Meio Físico (UBC)**. São Paulo: Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, 2014b. Disponível em: http://s.ambiente.sp.gov.br/cpla/Ficha_Tecnica_UBC_v2.pdf. Acesso em: 20 nov. 2019.

SÃO PAULO (Estado). **Lei nº 10.100, de 1 de dezembro de 1998**. Declara Área de Proteção Ambiental o entorno da represa de Itupararanga. São Paulo: Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo, 1998. Alterada pela Lei nº 11.579, de 2 de dezembro de 2003. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1998/alteracao-lei-10100-01.12.1998.html>. Acesso em: 5 dez. 2019.

SEADE (São Paulo). **População**. São Paulo: SEADE, 2019b. 1 base de dados. Disponível em: <https://portalgeo.seade.gov.br/download-de-dados/#>. Acesso em: 15 fev. 2020.

SEADE (São Paulo). **Taxa de urbanização (em %)**. São Paulo: SEADE, 2019c. 1 base de dados. Disponível em: <https://portalgeo.seade.gov.br/download-de-dados/#>. Acesso em: 15 fev. 2020.

SEADE (São Paulo). **Valor adicionado da agropecuária, da indústria, dos serviços, PIB e PIB per capita a preços correntes, por município**. São Paulo: SEADE, [2019a]. 1 base de dados. Disponível em: <https://www.seade.gov.br/produtos/pib-municipal/>. Acesso em: 10 jan. 2020.

SILVA, Alexandro Medeiros; SILVA, Richarde Marques da; SILVA, Bernardo Barbosa da. Determinação de temperatura da superfície e estimativa do saldo de radiação e evapotranspiração usando imagens Landsat e dados observados. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 67, n. 6, p. 1203-1216, set./out. 2015. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44637/23653>. Acesso em: 6 set. 2020.

SILVA, Ana Paula N. da *et al.* Surface radiation balance and the land use in the amazon region. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, Pernambuco, v. 7, n. 4, p. 212-222, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/jhrs/article/view/25077/25420>. Acesso em: 14 jun. 2018.

SILVA, Bernardo Barbosa da; LOPES, Gláucia Miranda; AZEVEDO, Pedro Vieira de. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 - TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005b. Disponível em: http://www.rbmet.org.br/port/revista/revista_artigo.php?id_artigo=131. Acesso em: 7 abr. 2019.

SILVA, Bernardo Barbosa da; LOPES, Gláucia Miranda; AZEVEDO, Pedro Vieira de. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 11-21, 2005a. Disponível em: http://www.dca.ufcg.edu.br/DCA_download/ISR/UFPE/Artigo%20002-004%20-%20Determina%E7%E3o%20Albedo.pdf. Acesso em: 12 jul. 2019.

SILVA, Bernardo B. da *et al.* Balanço de radiação em áreas do cerrado brasileiro por sensoriamento remoto. **Revista Educação Agrícola Superior**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 119-126, 2014.

SILVA, Bernardo B. da *et al.* Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: application to the brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 1, p. 3-8, 2016. Disponível em: <http://www.agriambi.com.br/revista/v20n01/v20n01a01.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2018.

SILVA, Bruno Bonemberger da. **Estimativa da evapotranspiração real por meio de imagens do satélite Landsat 8**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2015. Disponível em: <http://tede.unioeste.br/handle/tede/2680#preview-link0>. Acesso em: 9 ago. 2018.

SILVA, Jhon Lennon Bezerra da *et al.* Variabilidade espaço-temporal de parâmetros biofísicos e da evapotranspiração por sensoriamento remoto em região semiárida. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, [Garanhuns], v. 7, n. 3, p. 137-147, 2017. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/REBAGRO/article/view/5564/137-147>. Acesso em: 10 jan. 2019.

SILVA, Jorge Xavier da. O que é Geoprocessamento? **Revista do Crea-RJ**, [s. l.], p. 42-44, out./nov. 2009. Disponível em: <http://www.ufrj.br/lga/tiagomarinio/artigos/oqueegeoprocessamento.pdf>. Acesso em: 6 set. 2020.

SOUZA, Juarez Dantas de; SILVA, Bernardo Barbosa da; CEBALLOS, Juan Carlos. Estimativa da radiação solar global à superfície usando um modelo estocástico: caso sem nuvens. **Revista Brasileira de Geofísica**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 31-44, 2008. Disponível em: <https://www.sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/1727/893>. Acesso em: 19 abr. 2019.

THOMPSON, Dayse; BARBOSA, Ivanildo; OLIVEIRA, Raquel Aparecida Abrahão Costa e. Avaliação da variação do albedo de superfície por tipologias de uso e cobertura terrestre. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 69, n. 2, p. 375-387, 2017. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44024/23275>. Acesso em: 28 jun. 2019.

TUBELIS, Antônio; NASCIMENTO, Fernando José Lino do. **Meteorologia Descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. 1. ed. São Paulo: Nobel, 1980.

UDA, Patrícia Kazue; CORSEUIL, Cláudia Weber; KOBIYAMA, Masato. Mapeamento do saldo de radiação da Bacia do Alto Rio Negro, Região Sul brasileira. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [Porto Alegre], v. 18, n. 2, p. 249-258, abr./jun. 2013. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/98/451e718a129dcc8caa52ddfa732646ae_67b2862281c449f6cb26396b6139ff12.pdf. Acesso em: 16 abr. 2019.

USGS. **Bandpass wavelengths for all Landsat sensors**. United States: USGS, 2017. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/images/bandpass-wavelengths-all-landsat-sensors>. Acesso em: 25 out. 2020.

USGS. **EarthExplorer metadata SRTM_V3_SRTMGL1 2136261316**. [S. l.]: USGS, [201-a]. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/8660/2136261316/>. Acesso em: 15 jul. 2019.

USGS. **Landsat 4-5 TM level-2 data products: surface reflectance**. [S. l.]: USGS, [201-e]. Disponível em: https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-4-5-tm-level-2-data-products-surface?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects. Aceso em: 3 set. 2019.

USGS. **Landsat 8 (L8) data users handbook**. Version 4.0. Sioux Falls: EROS, 2019b. Disponível em: https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook_v4.pdf. Acesso em: 14 ago. 2019.

USGS. **Landsat 8 OLI/TIRS level-2 data products**: surface reflectance. [S. l.]: USGS, [201-d]. Disponível em: https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-8-olirts-level-2-data-products?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects. Acesso em: 3 set. 2019.

USGS. **Landsat collection 1 level 1 product definition**. Version 2.0. Sioux Falls: EROS, 2019a. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-collection-1-level-1-product-definition>. Acesso em: 9 jul. 2019.

USGS. **Landsat missions**. [S. l.]: USGS, [201-b]. Disponível em: https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-satellite-missions?qt-science_support_page_related_con=2#qt-science_support_page_related_con. Acesso em: 10 jul. 2019.

USGS. **USGS EROS archive**: digital elevation, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 arc-second global. [S. l.]: USGS, [201-c]. Disponível em: https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects. Acesso em: 12 jul. 2018.

VAREJÃO-SILVA, Mário Adelmo. **Meteorologia e Climatologia**. Versão digital 2. Recife: [s. n.], 2006. *E-book*. Disponível em: http://www.icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf. Acesso em: 16 jan. 2019.

VELOSO, Gabriel Alves. **Análise espaço temporal dos componentes do balanço de radiação, energia e evapotranspiração, usando técnicas de sensoriamento remoto em áreas irrigadas do Projeto Jaíba/MG**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/16207/1/AnaliseEspacoTemporal.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2018.

VELOSO, Gabriel Alves; FERREIRA, Manuel Eduardo; SILVA, Bernardo Barbosa da. Determinação da evapotranspiração real diária em áreas irrigadas do Projeto Jaíba (Minas Gerais, Brasil), mediante imagens Landsat 5 - TM. **Revista Cerrados**, Montes Claros, v. 15, n. 1, p. 53-76, jan./jun. 2017. Disponível em: <http://www.periodicos.unimontes.br/cerrados/article/view/292/297>. Acesso em: 4 jul. 2019.

VIANELLO, Rubens Leite; ALVES, Adil Rainier. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária da Universidade Federal de Viçosa, 1991.

WARREN, Morris Scherer *et al.* Utilização do Sensoriamento Remoto Termal na Gestão de Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [Recife], v. 7, n. 1, p. 65-82, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233078/26995>. Acesso em: 2 ago. 2019.

WATERS, Ralf *et al.* **SEBAL Surface Energy Balance Algorithms for Land**: advanced training and users manual. Version 1.0. Nelson: The Idaho Department of Water Resources, 2002. Disponível em: <http://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>. Acesso em: 12 maio 2018.

WERNECK, Daniela Rocha. **Estratégias de mitigação das ilhas de calor urbanas**: estudo de caso em áreas comerciais em Brasília - DF. 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018. Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=5583375. Acesso em: 12 out. 2019.

APÊNDICE A – A não realização de mosaicos entre imagens de diferentes datas para suprir a falta da extremidade sul da bacia na imagem do dia 17/07/2008 e o impacto sobre a variabilidade estatística dos parâmetros biofísicos

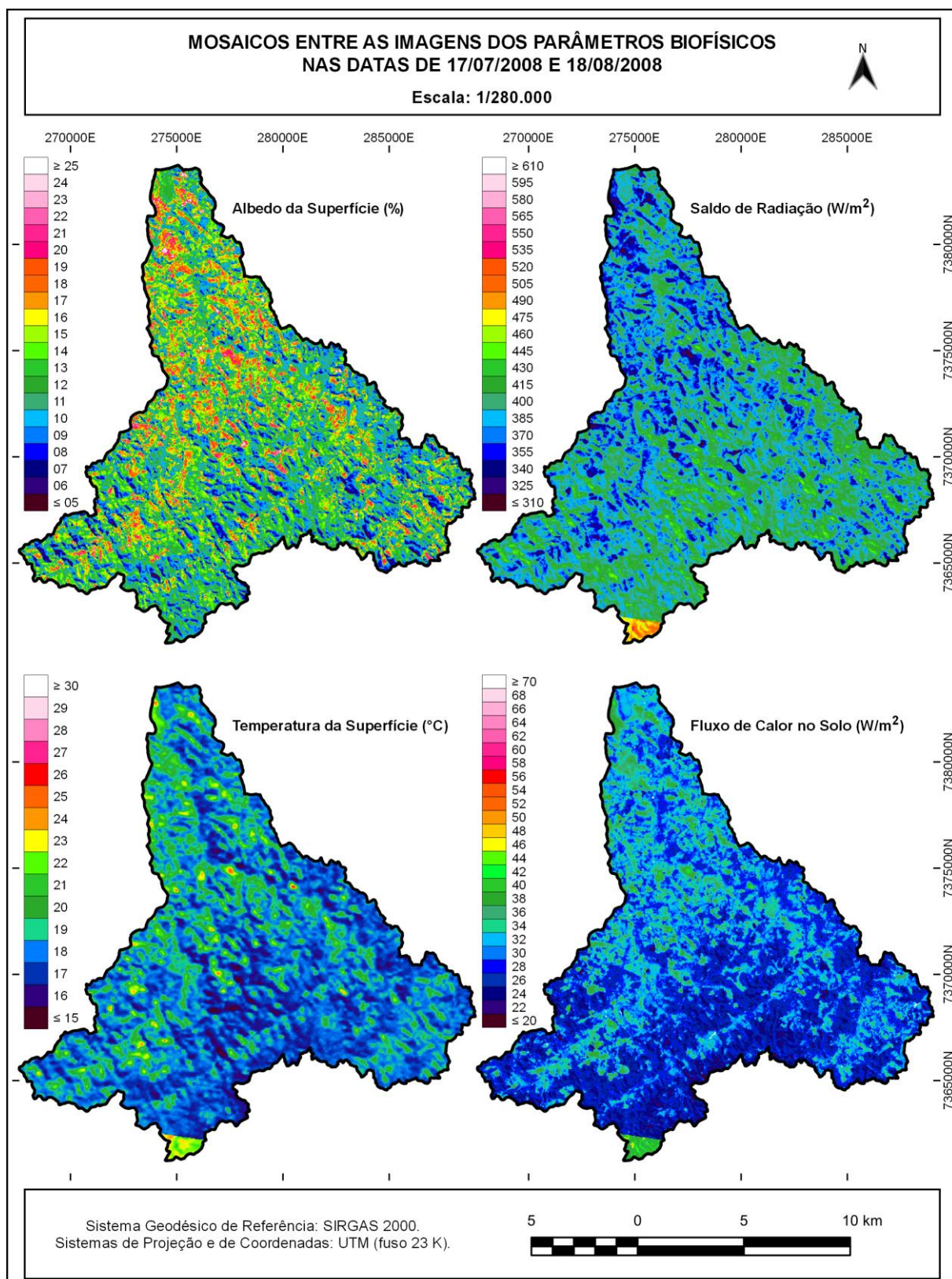
Os valores dos parâmetros biofísicos correspondem a dados instantâneos, relativos ao momento do registro da imagem. A análise da dinâmica desses parâmetros é baseada no reconhecimento das condições ambientais (temperatura do ar e umidade da superfície) que imperam naquele referido instante. A realização de mosaicos entre imagens de diferentes datas, na tentativa de suprir a falta da extremidade sul da bacia na imagem do dia 17/07/2008, implicaria em combinar comportamentos distintos, determinados pela vigência de condições ambientais diversas.

Considerem-se os mosaicos entre as imagens de cada parâmetro biofísico em 17/07/2008 e 18/08/2008 (Figura 25). O saldo de radiação, a temperatura da superfície e o fluxo de calor no solo teriam uma drástica disparidade na magnitude dos seus valores, entre as duas porções do mosaico, devido às diferentes temperaturas do ar no momento de cada imagem. Isso impediria o entendimento da área de estudo como um todo unificado, sujeita à vigência das mesmas condições ambientais, tal como ocorre usualmente nas análises de comportamento instantâneo dos parâmetros biofísicos.

O albedo seria o único parâmetro passível à realização de um mosaico entre imagens de diferentes datas, uma vez que não é sujeito às variações na temperatura do ar. Porém, ao longo da estação de inverno do ano de 2008, não há outras imagens sem cobertura de nuvens sobre a extremidade sul da bacia. Desse modo, a execução de um mosaico com a única outra imagem disponível (18/08/08) geraria uma redundância dos dados na área mencionada, e teria resultados práticos de ordem puramente estética.

A falta da extremidade sul da bacia nas imagens dos parâmetros biofísicos em 17/07/08 certamente não promoveu impactos significativos sobre as variáveis estatísticas descritivas, dado que a área ausente corresponde, tão somente, a 0,75 % do espaço total. Desse modo, 99,25 % da área da bacia está representada nas imagens da referida data. Uma forma de estimar os possíveis impactos da falta da extremidade sul sobre o comportamento das variáveis estatísticas em 17/07/08 seria por meio da avaliação da supressão desse mesmo espaço nas imagens do dia 18/08/08. A Tabela 16 compara os valores das variáveis estatísticas dos parâmetros biofísicos em 18/08/08, considerando duas diferentes configurações: a que abrange a área integral da bacia, e a que resulta da supressão de sua extremidade sul.

Figura 25 – Mosaicos entre as imagens dos parâmetros biofísicos na BHRS em 17/07/2008 (porção maior) e 18/08/2008 (porção menor)



Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016a, 2016b) e CIIAGRO (2019).

Tabela 16 – Comparação entre os valores das variáveis estatísticas dos parâmetros biofísicos em 18/08/08, considerando as imagens integrais e as desprovidas da extremidade sul da BHRS

Variável estatística	Imagem de albedo da superfície (%)		Variação (ponto percentual)
	Integral	Sem a porção sul	
Valor máximo	44,088	44,088	0,000
Valor médio	12,477	12,490	0,013
Valor mínimo	3,145	3,145	0,000
Amplitude	40,943 (p. p.)	40,943 (p. p.)	0,000
Coeficiente de variação	23,118	23,125	0,007

Variável estatística	Imagem de saldo de radiação na superfície (W/m ²)		
	Integral	Sem a porção sul	Variação
Valor máximo	543,686	543,548	-0,138
Valor médio	468,890	468,748	-0,142
Valor mínimo	259,745	259,745	0,000
Amplitude	283,940	283,802	-0,138
Coeficiente de variação	5,262 (%)	5,267 (%)	0,005 (p. p.)

Variável estatística	Imagem de temperatura da superfície (W/m ²)		
	Integral	Sem a porção sul	Variação
Valor máximo	31,062	31,062	0,000
Valor médio	23,454	23,461	0,007
Valor mínimo	18,831	18,831	0,000
Amplitude	12,231	12,231	0,000
Coeficiente de variação	5,401 (%)	5,404 (%)	0,003 (p. p.)

Variável estatística	Imagem de fluxo de calor no solo (W/m ²)		
	Integral	Sem a porção sul	Variação
Valor máximo	271,774	271,774	0,000
Valor médio	45,784	45,832	0,048
Valor mínimo	27,227	27,227	0,000
Amplitude	244,546	244,546	0,000
Coeficiente de variação	15,963 (%)	15,953 (%)	-0,010 (p. p.)

Fonte: Autoria própria, a partir de dados fornecidos por NASA (2016b) e CIIAGRO (2019).

O impacto da supressão da extremidade sul da bacia sobre a média do albedo foi inferior a dois centésimos de ponto percentual. Sobre as médias do saldo de radiação e fluxo de calor no solo, menor que dois décimos e do que cinco centésimos de W/m², respectivamente. Sobre a média da temperatura da superfície, abaixo de um centésimo de °C. A insignificância dos valores resulta da pequena proporção da área suprimida, em relação ao espaço total da bacia.

Sobre os valores dos coeficientes de variação de todos os parâmetros biofísicos, o impacto foi menor ou igual a um centésimo de ponto percentual. Esses valores ínfimos decorrem não só da pequena proporção da área suprimida, como, também, da grande homogeneidade (falta de variabilidade) dos dados no interior desse espaço, quase inteiramente recoberto por vegetação nativa densa.

Apenas no caso do saldo de radiação na superfície houve um impacto sobre a variável valor máximo, mas de magnitude também desprezível (menor do que dois décimos de W/m^2).

Desse modo, é possível inferir que a falta da extremidade sul da bacia na imagem do dia 17/07/2008 não implicou em impactos significativos sobre as variáveis estatísticas dos parâmetros biofísicos. Portanto, é preferível a utilização da referida imagem, ao invés do emprego de uma única cena relativa ao ano de 2008.

