

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Giseli Kramer

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA E
SUAS RELAÇÕES COM A OCORRÊNCIA DE FLORAÇÕES ALGAIS
DO RESERVATÓRIO DE ITAIPU, PR, BRASIL**

Santa Maria, RS

2021

Gisieli Kramer

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA E SUAS
RELAÇÕES COM A OCORRÊNCIA DE FLORAÇÕES ALGAIS DO
RESERVATÓRIO DE ITAIPU, PR, BRASIL**

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Maria (RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutora em Geografia**.

Orientador: Waterloo Pereira Filho

Santa Maria, RS
2021

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Kramer, Gisieli
VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA E
SUAS RELAÇÕES COM A OCORRÊNCIA DE FLORAÇÕES ALGAIS DO
RESERVATÓRIO DE ITAIPU, PR, BRASIL / Gisieli Kramer.-
2021.
153 f.; 30 cm

Orientador: Waterloo Pereira Filho
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Geografia, RS, 2021

1. Temperatura 2. Florações algais 3. Reservatório I.
Pereira Filho, Waterloo II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, GISIELI KRAMER, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Giseli Kramer

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA E SUAS
RELAÇÕES COM A OCORRÊNCIA DE FLORAÇÕES ALGAIS DO
RESERVATÓRIO DE ITAIPU, PR, BRASIL**

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação
em Geografia da Universidade Federal de
Santa Maria (RS), como requisito parcial para
a obtenção do título de **Doutora em
Geografia**.


Aprovada em 21 de julho de 2021:



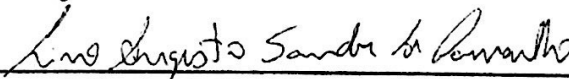
Waterloo Pereira Filho, Dr. (UFSM) - Videoconferência
(Presidente/Orientador)



Roberto Cassol, Dr. (UFSM) - Videoconferência



João Batista Pereira Cabral, Dr. (UFG) - Videoconferência



Lino Augusto Sander de Carvalho, Dr. (UFRJ) - Videoconferência



Patricia Michele Pereira Trindade, Dra. (INPE) - Parecer

Santa Maria, RS
2021

DEDICATÓRIA

Aos meus filhos Guilherme e Giovanna, meus sobrinhos Gisiel e Allana, meus irmãos Gisiano e Geisson. Que eu seja uma das melhores inspirações da vida deles.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria por oportunizar a realização de uma pós-graduação gratuita e com qualidade de ensino e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia pelo esforço, melhorias e constante captação de recursos para viabilizar pesquisas de excelência;

Ao Programa Nacional de Cooperação Acadêmica (PROCAD) da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES/Brasil, Edital CAPES 071/2013, por proporcionar recursos para viagens e apresentação de trabalhos em congressos científicos, principalmente no âmbito internacional;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da CAPES/FAPERGS - Nº Processo: 8888.162068/2017-00 pelo apoio financeiro via bolsa de Doutorado na maior parte do desenvolvimento desta pesquisa;

À Fundação Parque Tecnológico Itaipu-FPTI/BR do Centro Competência em Inteligência e Gestão Territorial pela oportunidade e apoio financeiro nas viagens e trabalhos de campo no reservatório de Itaipu, bem como ao pagamento de uma bolsa-auxílio para o desenvolvimento das atividades de pesquisa;

Ao professor Dr. Waterloo Pereira Filho pela parceria e paciência na orientação deste trabalho, qual fez com grande empenho e dedicação. Além de ser um profissional altamente gabaritado e de excelência em pesquisa científica foi um orientador solidário diante das diversas intercorrências durante o desenvolvimento da pesquisa. Ainda, agradecer a sua esposa, Emília, pelo zelo e carinho direcionados a mim neste período;

À pesquisadora Dra. Patrícia Michele Pereira Trindade meu eterno reconhecimento e gratidão pela gentileza em ajudar com a metodologia da pesquisa e obtenção das estimativas da temperatura de superfície da água;

Ao professor Dr. Roberto Cassol, profissional raro, de extrema competência e que é minha inspiração em todos os projetos de minha vida;

Aos demais professores de reconhecida excelência, que fizeram parte da minha banca de avaliação, meu imenso respeito e gratidão pelas contribuições valiosas deixadas nesta Tese de Doutorado;

Aos funcionários do Departamento de Geociências pela colaboração e informações fornecidas ao longo do curso, especialmente da secretária Liliane Bonilla;

Aos colegas do Laboratório de Geotecnologias (LABGEOTEC) Ademir Peranzoni, Adenilson Zanini, Carol Mallmann, Cristiano Niederauer, Eliane Munhóz, Gean Machado Martini, Janderlei Dal Osto, Marcos Gomes dos Santos, Mariana Santiago e Rafael Dezordi;

Ao meu esposo, Mateus Pagliarini, meu cerne, obrigada pela compreensão e incentivo à minha trajetória;

Enfim, Deus, Família e todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para o aprendizado e aperfeiçoamento profissional... OBRIGADA!

*Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive.*

Fernando Pessoa

RESUMO

VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA E SUAS RELAÇÕES COM A OCORRÊNCIA DE FLORAÇÕES ALGAIS DO RESERVATÓRIO DE ITAIPU, PR, BRASIL

AUTORA: Gisieli Kramer
ORIENTADOR: Waterloo Pereira Filho

O estudo sobre a dinâmica da temperatura da água por sensoriamento remoto pode proporcionar a compreensão de alterações metabólicas em grandes massas d' água. Diante disso, o objetivo desta pesquisa foi o de identificar a variação espaço-temporal da temperatura da água e o seu efeito nas áreas de recorrência de florações algais. A área de estudo compreendeu os compartimentos aquáticos São Francisco Verdadeiro (SFV), Ocoí e a área central do reservatório de Itaipu, no Rio Paraná, situados na região Oeste do estado do Paraná, Brasil. A metodologia da pesquisa reuniu quatro frentes de produção de dados: 1) sobre temperatura da superfície da água no compartimento aquático SFV registradas *in situ* (TSAi) e imagens de satélite (TSAs) entre 2015 e 2017 para o desenvolvimento e validação de um modelo matemático de estimativa (TSAe); 2) aplicação deste modelo e a identificação da TSAe, nas áreas de estudo entre 2013 e 2020; e 3) ocorrência de plumas termais e suas relações com as florações algais. As estimativas da TSA foram geradas a partir de dados de imagens de satélite Landsat 8, *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*, processadas nos softwares *Envi 5.5*, com a utilização da ferramenta *Band Math* e do *QGIS 2.14* e o emprego do método *Planck Equation* presente no *plugin Land Surface Temperature (LST)*. Dada a implementação do modelo na área de estudo, com desempenho estatisticamente significativo (REMQ 0,8°C), a variação da TSAe indicou estimativas médias entre 18 e 27°C no período de 2013-2020. Porém, notou-se alterações estatisticamente significativas da TSAe entre períodos de presença e ausência de florações com média das diferenças > 0 , as quais ocorreram para todas as estações do ano, com maior frequência para os períodos de outono e inverno. Estas alterações elevaram as médias máximas das temperaturas nos locais com florações com 28°C no outono, 26°C no inverno, 27,91°C, na primavera e 31,79°C no verão. O compartimento aquático Ocoí apresentou maior frequência das florações em junho e agosto enquanto o SFV foi em maio. Em sua maioria, foi perceptível a maior recorrência das florações em 2019 e 2020. Ademais, estes foram os anos de maiores temperaturas médias máximas do ar. Este fato possivelmente favoreceu o aquecimento das águas e resultou na intensificação dos episódios de florações de algas. Na coluna da água foi possível observar, sob mesmo período de análise, em 2019, que a presença de florações e o aquecimento da TSAe no SFV proporcionou diferenças no gradiente térmico em relação ao Ocoí, o que pode determinar o início e duração da estratificação térmica. A variação da temperatura observada nos compartimentos aquáticos foi maior que na área do reservatório, onde nenhum episódio de florações de algas foi identificado. Reservatórios com este cenário e um histórico de florações tendem no futuro serem mais suscetíveis ao aumento da frequência e severidade de florações algais, a menos que outras variáveis, a exemplo da disponibilidade de nutrientes, não sejam suficientes para suportar seu crescimento.

Palavras-chave: Temperatura. Florações algais. Reservatório.

ABSTRACT

SPATIO-TEMPORAL VARIATION OF WATER TEMPERATURE REGARDING THE OCCURRENCE OF ALGAL BLOOM IN THE ITAIPU RESERVOIR, PR, BRAZIL

AUTHOR: Gisieli Kramer
ADVISOR: Waterloo Pereira Filho

The study on the dynamics of water temperature by remote sensing can provide an understanding of metabolic changes in large water bodies. Hence, the objective of the present research was to identify the spatiotemporal variation in water temperature and its effect on areas of algal bloom recurrence. The study area comprised the water compartments São Francisco Verdadeiro (SFV), Ocoí, and the central area of the Itaipu Reservoir, on the Paraná River, located in the western region of the State of Paraná, Brasil. The research methodology gathered four data production fronts: 1) on water surface temperature in the SFV water compartment registered *in situ* (TSAi) and satellite images (TSAs) from 2015 to 2017 for the development and validation of a mathematical model for estimating (TSAe); 2) application of this model and identification of TSAe, in the study areas between 2013 and 2020; and 3) occurrence of thermal plumes and their relationship with algal blooms. TSA estimates were generated from Landsat 8 satellite image data, Thermal Infrared Sensor (TIRS), and processed in Envi 5.5 softwares, using the Band Math tool and the QGIS 2.14, and employing the Planck Equation method, which is in the Land Surface Temperature (LST) plugin. Given the implementation of the model in the study area, with statistically significant performance (RMSE of 0.8°C), the variation in TSAe indicated average estimates between 18 and 27°C from 2013 to 2020. However, statistically significant changes in TSAe were noted between periods of presence and absence of blooms with mean differences > 0, which occurred for all seasons of the year, with greater frequency for the autumn and winter periods. These changes raised the maximum average temperatures in the blooming sites with 28°C in autumn, 26°C in winter, 27.91°C in spring, and 31.79°C in summer. The Ocoí aquatic compartment showed the highest frequency of blooming in June and August, while the highest for SFV was in May. Mostly, the highest recurrence of the previously mentioned blooms in 2019 and 2020 was noticeable. Furthermore, these were the years with the highest average maximum air temperatures. This fact possibly favored the warming of the waters and resulted in the intensification of algae bloom episodes. It was observed that, under the same period of analysis, in 2019, in the water column, the presence of blooms and the heating of the TSAe in the SFV provided differences in the thermal gradient concerning the Ocoí, which can determine the beginning and duration of the thermal stratification. The temperature variation observed in the water compartments was greater than in the reservoir area, where no episode of algal bloom was identified. Reservoirs with this scenario and history of blooms tend to be more susceptible, in the future, to increased frequency and severity of algal blooms, unless other variables, such as nutrient availability, are not sufficient to support their growth.

Keywords: Temperature. Algal Blooms. Reservoir.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização da área do reservatório de Itaipu e seus compartimentos aquáticos SFV e Ocoí, estado do Paraná, Brasil	21
Figura 2 – Contextualização da temperatura média do ar e precipitação pluviométrica média nas áreas de estudo, a nível de estado e município	23
Figura 3 – Principais compartimentos do ecossistema aquático	26
Figura 4 – Variações temporais da temperatura para vários alvos da superfície	29
Figura 5 – Domínio dos comprimentos de onda e bandas de absorção induzidas por gases, água, e transmitância atmosférica.....	36
Figura 6 – Correlação entre temperatura cinética (T_{kin}) e temperatura radiante da água (T_{rad})	39
Figura 7 – Fluxograma das etapas da pesquisa	49
Figura 8- Reflectância espectral de plumas de organismos fitoplanctônicos.....	54
Figura 9 – Cenário das coletas da TSAi no compartimento SFV.....	56
Figura 10 – Modelo de regressão da TSA.....	58
Figura 11 – Dispersão entre os resíduos e a TSA no compartimento SFV	59
Figura 12 – Validação do modelo da TSAe	59
Figura 13 – Variação temporal das médias TSAe no compartimento aquático SFV, período de Outono, 2013-2020	63
Figura 14 – Variação espacial da TSAe no compartimento aquático SFV, período de Outono, 2013-2020	65
Figura 15 – Variação temporal das médias da TSAe no compartimento aquático Ocoí, período de Outono, 2013-2020	66
Figura 16 – Variação espacial da TSAe no compartimento aquático Ocoí, período de Outono, 2013-2020.....	68
Figura 17 – Variação temporal das médias da TSAe na área central do reservatório de Itaipu, período de Outono, 2013-2020	70
Figura 18 – Variação espacial da TSAe no reservatório de Itaipu, período de Outono, 2013-2020.....	72
Figura 19 – Variação temporal das médias TSAe no compartimento aquático SFV, período de Inverno, 2013-2020	76
Figura 20 – Variação espacial da TSAe no compartimento aquático SFV, período de Inverno, 2013-2020.....	78
Figura 21 – Variação temporal das médias da TSAe no compartimento aquático Ocoí, período de Inverno, 2013-2020.....	79
Figura 22 – Variação espacial da TSAe no compartimento aquático Ocoí, período de Inverno, 2013-2020.....	81
Figura 23 – Variação temporal das médias da TSAe na área central do reservatório de Itaipu, período de Inverno, 2013-2020.....	82
Figura 24 – Variação espacial da TSAe na área do leito principal do reservatório de Itaipu, período de Inverno, 2013-2020.....	84
Figura 25 – Variação temporal das médias TSAe no compartimento aquático SFV, período de Primavera, 2013-2020	87
Figura 26 – Variação espacial da TSAe no compartimento aquático SFV, período de Primavera, 2013-2020.....	89
Figura 27 –Variação temporal das médias da TSAe no compartimento aquático Ocoí, período de Primavera, 2013-2020	90
Figura 28 – Variação espacial da TSAe no compartimento aquático Ocoí, período de Primavera, 2013-2020.....	92
Figura 29 – Variação temporal das médias da TSAe na área central do reservatório de Itaipu, período de Primavera, 2013-2020	93
Figura 30 – Variação espacial da TSAe na área do leito principal do reservatório de Itaipu, período de Primavera, 2013-2020	94

Figura 31 – Variação temporal das médias TSAe no compartimento aquático SFV, período de Verão, 2013-2020	97
Figura 32 – Variação espacial da TSAe no compartimento aquático SFV, período de Verão, 2013-2020	99
Figura 33 – Variação temporal das médias da TSAe no compartimento aquático Ocoí, período de Verão, 2013-2020	100
Figura 34 – Variação espacial da TSAe no compartimento aquático Ocoí, período de Verão, 2013-2020	102
Figura 35 – Variação temporal das médias da TSAe na área central do reservatório de Itaipu, período de Verão, 2013-2020.....	103
Figura 36 – Variação espacial da TSAe na área no leito principal do reservatório de Itaipu, período de Verão, 2013-2020.....	104
Figura 37 – Variação temporal das médias da TSAe nos compartimentos aquáticos SFV, Ocoí e leito principal do reservatório de Itaipu, período de Outono, 2013-2020	106
Figura 38 – Espacialização temporal de plumas termais nos compartimentos aquáticos SFV e Ocoí, 2013-2020	108
Figura 39 – Variação temporal das médias da TSAe nos compartimentos aquáticos SFV, Ocoí e área do leito principal do reservatório de Itaipu, período de Inverno, 2013-2020.....	110
Figura 40 – Espacialização temporal de plumas termais nos compartimentos aquáticos SFV e Ocoí, 2013-2020	112
Figura 41 – Variação temporal das médias da TSAe nos compartimentos aquáticos SFV, Ocoí e área do leito principal do reservatório de Itaipu, período de Primavera, 2013-2020.....	114
Figura 42 – Espacialização temporal de plumas termais no compartimento aquático Ocoí, 2013-2020	116
Figura 43 – Variação temporal das médias da TSAe nos compartimentos aquáticos SFV, Ocoí e área do leito principal do reservatório de Itaipu, período de Verão, 2013-2020	118
Figura 44 – Espacialização temporal de plumas termais nos compartimentos aquáticos SFV e Ocoí, 2013-2020	120
Figura 45 – Impacto na temperatura de superfície da água.....	121
Figura 46 – Análise temporal das temperaturas médias máximas e mínimas do ar e das temperaturas médias e médias máximas de superfície da água	127
Figura 47 – Recorrência sazonal dos eventos de florações de algas nos compartimentos aquáticos SFV e Ocoí (a) e a variação termal desses eventos nos períodos avaliados (b e c).....	129
Figura 48 – Análise temporal da temperatura média máxima do ar, entre 2013 a 2020.....	130
Figura 49 – Distribuição da biodiversidade de fitoplâncton no compartimento aquático Ocoí.....	132
Figura 50 – Distribuição da biodiversidade de fitoplâncton no compartimento aquático SFV	133
Figura 51 – Variação da temperatura na coluna da água nos compartimentos aquáticos SFV (com florações) e Ocoí (sem florações) em 04/08/19, nas estações Diatomacea e Espirogira, respectivamente	135

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Emissividade de materiais comuns.....	37
Quadro 3 – Principais características do Landsat 8.....	40
Quadro 4 – Impacto termal na superfície da água durante eventos de florações de algas	41
Quadro 5 – Impacto termal na superfície da água durante eventos de florações de algas	42
Quadro 6 – Características do verificador da temperatura da água.....	50
Quadro 7 – Missões, datas e horários das coletas da TSAi.....	56
Quadro 8– Grupo amostral dos dados da temperatura de superfície da água no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro (SFV), reservatório de Itaipu	57
Quadro 9 – Número de imagens de satélite utilizadas na identificação da TSAe.....	60
Quadro 10 – Estimativas da temperatura da água no período de Outono a partir de imagens Landsat, sensor TIR, banda 10, 2013-2020	62
Quadro 11 – Estimativas da temperatura da água no período de Inverno a partir de imagens Landsat, sensor TIR, banda 10, 2013-2020	75
Quadro 12 – Estimativas da temperatura da água no período de Primavera a partir de imagens Landsat, sensor TIR, banda 10, 2013-2020	86
Quadro 13 – Estimativas da temperatura da água no período de Verão a partir de imagens Landsat, sensor TIR, banda 10, 2013-2020	96
Quadro 14 – Médias da TSAe, período de Outono, 2013-2020.....	105
Quadro 15 – Amplitude térmica entre a TSAe máxima e média nos compartimentos aquáticos SFV, Ocoí e área central do reservatório de Itaipu, período de Outono, 2013-2020.....	106
Quadro 16– Médias da TSAe, período de Inverno, 2013-2020	109
Quadro 17 – Amplitude térmica entre a TSAe máxima e média nos compartimentos aquáticos SFV, Ocoí e área do leito principal do reservatório de Itaipu, período de Inverno, 2013-2020.....	110
Quadro 18 – Médias da TSAe, período de Primavera, 2013-2020	113
Quadro 19 – Amplitude térmica (°C) entre a TSAe máxima e média nos compartimentos aquáticos SFV, Ocoí e área do leito principal do reservatório de Itaipu, período de Primavera, 2013-2020.....	114
Quadro 20 – Médias da TSAe, período de Verão, 2013-2020.....	117
Quadro 21 – Amplitude térmica entre a TSAe máxima e média nos compartimentos aquáticos SFV, Ocoí e área do leito principal do reservatório de Itaipu, período de Verão, 2013-2020	118

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	17
1.3 QUESTÕES CIENTÍFICAS	19
1.4 OBJETIVOS	19
1.4.1 Objetivo geral	19
1.5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1 LIMNOLOGIA DE RESERVATÓRIOS	25
2.1.1 Temperatura da água.....	27
2.1.2 Florações de algas e seus impactos.....	29
2.1.3 Temperatura da água versus florações de algas.....	31
2.2 SENSORIAMENTO REMOTO DO INFRAVERMELHO TERMAL	35
2.2.1 Temperatura radiante da superfície da água a partir do TIR.....	36
2.3 PROCEDIMENTOS TÉCNICO-OPERACIONAIS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS	43
2.3.1 Geração de estimativas da temperatura de superfície da água.....	44
2.3.2 Geração de modelo de regressão linear	45
3 METODOLOGIA	48
3.1 TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DA ÁGUA NA ÁREA TESTE DO COMPARTIMENTO AQUÁTICO SÃO FRANCISCO VERDADEIRO (SFV).....	50
3.1.1 Temperatura de superfície da água <i>in situ</i>.....	50
3.1.2 Temperatura de superfície da água estimada nas imagens do satélite Landsat 8.....	51
3.1.3 Geração do modelo matemático e validação das informações da TSA	52
3.2 ESPACIALIZAÇÃO SAZONAL DA TSAe NO RESERVATÓRIO DE ITAIPU E SEUS COMPARTIMENTOS AQUÁTICOS SFV E OCOÍ.....	52
3.3 EFEITO DA TSAe NO RESERVATÓRIO DE ITAIPU	53
4 RESULTADOS.....	55
4.1 TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DA ÁGUA NA ÁREA TESTE DO COMPARTIMENTO AQUÁTICO SÃO FRANCISCO VERDADEIRO (SFV).....	56
4.1.1 Geração e validação do modelo de regressão da TSAe.....	58
4.2 ESPACIALIZAÇÃO SAZONAL DA TSAe NO RESERVATÓRIO DE ITAIPU.....	60
4.2.1 Período de Outono.....	60
4.2.2 Período de Inverno.....	74
4.2.3 Período de Primavera	85
4.2.4 Período de verão	95
4.3 EFEITO DA TSA NO RESERVATÓRIO DE ITAIPU	105
4.3.1 Período de Outono.....	105
4.3.2 Período de Inverno.....	109
4.3.3 Período de Primavera	113
4.3.4 Período de verão	117
4.3.5 Considerações sobre o efeito da TSA no reservatório de Itaipu	121
5. INTEGRAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	122
5.1 SENSORIAMENTO REMOTO DA TSA A PARTIR DA GERAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE REGRESSÃO	122
5.2 ESPACIALIZAÇÃO SAZONAL DA TSAe NO RESERVATÓRIO DE ITAIPU.....	126
5.3 EFEITO DA TSAe NOS COMPARTIMENTOS AQUÁTICOS	131
5.4 CONSEQUÊNCIAS ECOLÓGICAS	136
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
7. REFERÊNCIAS	142

1 INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira contempla um conjunto de fontes para geração de energia elétrica proveniente principalmente de recursos renováveis, as quais representam 82,77% do total de capacidade de geração de energia elétrica do país, de acordo com o Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA, 2020). O setor hidrelétrico destaca-se com 63,18% do total dessa geração de energia elétrica considerada renovável (SIGA, 2020). Tal contexto evidencia a abundância de água doce no país (12% do total mundial) concentrada em três grandes bacias hidrográficas: Amazonas, São Francisco e Paraná (ESTEVEVES, 1998; TUNDISI et al., 2006; REBOUÇAS, 2006).

A bacia do rio Paraná, presente nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Goiás, Paraná, Santa Catarina e no Distrito Federal, abastece um total de 57 reservatórios, com maior capacidade instalada na usina hidrelétrica (UHE) de Itaipu, estado do Paraná. Este reservatório compreende o sétimo maior represamento de águas do Brasil (área inundada de 1.350 km²) e os melhores índices de aproveitamento da energia dos rios entre os reservatórios brasileiros (10,4 MW por km²). Em 2019 produziu 79,4 milhões de MWh, uma marca expressiva em um dos períodos mais secos da história da usina (ITAIPU BINACIONAL, 2020).

O reservatório da UHE de Itaipu apresenta grande importância, pois produz 11,3% da energia consumida no país, além de proporcionar atividades de turismo e recreação em suas águas (ITAIPU BINACIONAL, 2020). Paralelamente, este reservatório tem apresentado problemas que normalmente decorrem do modelo de uso da terra desenvolvido na bacia hidrográfica ou por ela são potencializados, com destaque para a ocorrência de florações de algas (MANIGLIA, et al., 2010). Algumas espécies dessas algas podem ser potencialmente tóxicas ou promover mudanças na abundância e distribuição de espécies (GRIFFITH e GOBLER, 2020) e, por isso, a presença de seus episódios de florações necessita ser investigada.

O Brasil reconhecidamente apresenta problemas com florações de cianobactérias (AZEVEDO et al., 2002) e surtos documentados em 11 dos 26 estados brasileiros (DÖRR et al., 2010), com crescente aumento nas florações (DOMINGUES et al., 2011; DOMINGUES, 2014; CORAZZA, 2015; GENUÁRIO et al., 2016; BARROS et al., 2019), primeiro registro da espécie *C. furcoides* no Rio grande do Sul (CASSOL et al., 2014), até o surgimento de nova espécie de *Trichodesmium* no Brasil (SANT'ANNA et al., 2018). Ainda assim, relatos sobre a presença dos episódios de florações de algas, especialmente nocivas, são subestimados na

América do Sul e amplamente desconhecidos pela comunidade científica (DÖRR et al., 2010). Além disso, a maior parte das publicações são concentradas em 2009 e declinam, a partir de 2012, com registros de florações mais intensas, principalmente em reservatórios, para os períodos de 2005, 2011 e 2014 (GUIMARRÃES, et al. 2020). Sobretudo, dada a importância, o Brasil prevê desde 1996 condições e padrões específicos de monitoramento obrigatório dessas florações, a fim de assegurar a saúde, o bem-estar humano e o equilíbrio ecológico aquático (CONAMA, Nº 357/2005).

Com frequência estudos têm reportado a ocorrência desses episódios de florações de algas (CLARK et al., 2017; HARKE et al., 2016; COSTA et al., 2018; CHENG et al., 2019) como consequência, principalmente, do aquecimento crescente das águas (KARKI et al., 2018; SCHAEFFER et al., 2018; GRIFFITH e GOBLER, 2020). Indicam com preocupação uma relação entre temperatura, taxa de crescimento e o desenvolvimento de toxinas que variam entre as espécies de algas (GRIFFITH e GOBLER, 2020) e podem acumular nos peixes de água doce concentrações suficientemente nocivas para os seres humanos e animais (DÖRR et al., 2010). Assim, pesquisadores afirmam que as mudanças climáticas têm desenvolvido papel fundamental na acumulação e interação de múltiplos fatores que estão convergindo para a alteração da temperatura do meio aquático e, conseqüentemente, para a intensificação global das explosões de algas nocivas, conhecidas mundialmente como *harmful algal blooms (HABs)* (GRIFFITH e GOBLER, 2020).

Qualquer mudança na bacia hidrográfica relacionada à alterações climáticas reflete nos processos metabólicos dos lagos e a temperatura da superfície, por ser uma variável sensível, responde diretamente na alteração da estrutura térmica. Assim, a temperatura de superfície da água é uma variável chave para entender as alterações nas características do meio aquático (KUENZER e DECH, 2013). Um estudo em 305 lagos mundiais revelou que 37,37% (BAH et al., 2019) apresentaram um aquecimento mais rápido que a temperatura da terra de entorno. Tal cenário revelou ainda que os lagos situados no hemisfério norte estão esfriando enquanto os seus homólogos no hemisfério sul estão aquecendo, fenômeno conhecido mundialmente como *hemispheric seesaw* (BAH et al., 2019). Adicionalmente, características geomórficas locais (O'REILLY, et al., 2015), profundidade do lago, período do ano, latitude, velocidade do vento (BAYER, BURNS e SCHALLENBERG, 2013; KRAEMER et al., 2015), desmatamento e desenvolvimento da agricultura na planície de inundação (DALY et al., 2020), são fatores que influenciam substancialmente no aquecimento da superfície da água e impulsionam o aparecimento de florações de algas.

Seguindo nesta perspectiva, uma pesquisa desenvolvida em 20 lagos de diferentes latitudes, condições nutricionais e de clima demonstrou que a elevação de 4°C na temperatura da água de ambientes eutróficos, mesotróficos e oligotróficos condicionou um aumento de 13,9%, 27,1% e 5% na probabilidade de desenvolvimento de florações com alto risco de cianobactérias. Ainda, para temperaturas entre 20 e 24°C um aumento de 0,8°C aumentou em 5% a probabilidade de ocorrer florações dessas algas nocivas (RIGOSI et al., 2015). Outras pesquisas realizadas recentemente na Antártica, de ecossistemas altamente sensíveis e responsivos às mudanças da temperatura, mostraram impactos na biomassa de algas da neve à medida que a península se aquece (HUOVINEN, RAMIREZ e GOMEZ, 2018; GRAY et al., 2020).

Diante deste contexto, a compreensão do padrão de mudanças de temperatura de superfície de águas interiores é fundamental para a sociedade e avanço da ciência. A maioria do aquecimento ou resfriamento das águas de reservatórios apresenta magnitudes diferenciadas e tendência de heterogeneidade espacial. Consequentemente, variações térmicas podem ser significativas dependendo do tamanho e forma do lago (O'REILLY, et al., 2015) e apresentar respostas importantes sobre a estabilidade da coluna da água (KRAEMER et al., 2015), dinâmica de nutrientes (BAYER, BURNS e SCHALLENBERG, 2013), efeito de herbicidas sobre microalgas (LARRAS et al., 2013) pH e oxigênio, bem como a produção, distribuição e diversidade da biota aquática (HANSEN, et al., 2017; GRIFFITH e GOBLER, 2020). Além disso, estudos sobre o padrão espacial e temporal da temperatura da superfície são limitados em águas interiores (KRAEMER et al., 2015), dada a diversidade de represamentos em todo o mundo (MULLIGAN, SOESBERGEN e SÁENZ, 2020).

Uma das formas de monitorar esta variação da temperatura da água é a coleta de dados por meio de procedimentos tradicionais (*temperature loggers*). Todavia, este procedimento torna-se complexo na área do reservatório de Itaipu e nos seus diversos compartimentos aquáticos, pois somam uma grande superfície hídrica, o que exige um número elevado de estações amostrais para contemplar o contexto satisfatoriamente. Além disso, tais amostragens podem a) apresentar limitações na frequência temporal e de acesso aos locais das coletas (CHERKAUER et al., 2005 e HANDCOCK et al., 2012) ou b) ocorrer em períodos que não são representativos da ocorrência dos episódios de florações de algas.

Uma das principais alternativas que surge para amenizar as dificuldades de amostragens em campo e complementar as observações *in situ* da temperatura de superfície da água são os dados derivados do sensoriamento remoto do infravermelho termal (TIR). Tais dados podem proporcionar informações valiosas com melhores resoluções espacial e temporal, como mostra

as inúmeras pesquisas verificadas na literatura (LEDREW e FRANKLIN, 1985; BOLGRIEN e BROOKS, 1992; TORGERSEN et al, 1999, 2001; MERTES et al., 2004; KAY et al, 2005; HANDCOCK et al, 2006; CRISTEA e BURGES, 2009; TONOLLA et al, 2010; WAWRZYNIAK, PIEGAY e POIREL, 2011; HANDCOCK et al., 2012; LAMARO et al, 2013; LING et al, 2017; SCHAEFFER et al., 2018; O'SULLIVANA, DEVITO e CURRY, 2019 e TAVARES, 2019). Estas pesquisas demonstram claramente que a utilização de imagens de satélite que exploram o infravermelho termal é uma alternativa capaz de estimar a temperatura de superfície da água (TSA) de rios, lagos e reservatórios. Ainda, que a diferença nas estimativas entre corpos d'água medida para uma mesma cena da imagem pode ser mais informativa do que a temperatura absoluta da água (LING et al., 2017).

Adicionalmente aos estudos da caracterização térmica de ambientes aquáticos por meio do sensor do infravermelho termal (*Thermal Infrared Sensor - TIRS*), pesquisas têm relatado sua utilização paralela na compreensão do impacto termal no local de proliferação anômala de algas (TANG et al 2003; WANG e TANG, 2010; WANG e TANG, 2014). Consequentemente, tem revelado variação na temperatura local da água de 2°C a 4°C dependendo da espécie, distribuição e biomassa que compõem a floração (WANG e TANG, 2010; WANG e TANG, 2014). À vista disso, a temperatura de superfície da água detectada remotamente oferece uma grande promessa para monitorar o desenvolvimento de floração de algas e estabelecer um alerta precoce das condições favoráveis à sua recorrência (WANG e TANG, 2010).

1.2 JUSTIFICATIVA

Pesquisas que visam mapear a variação da temperatura de superfície de águas interiores com a utilização de dados de sensoriamento remoto, principalmente a partir de imagens de domínio público como do satélite Landsat, sensor *TIR*, ainda são incipientes no Brasil, e para o reservatório de Itaipu, inexistem. Apesar de alguns estudos já terem realizados análises e projeções sobre o impacto termal na água, função principalmente do aquecimento global, se faz necessária uma abordagem local do padrão de variação térmica, a fim de compreender melhor as influências recebidas, as consequências resultadas e a presunção de cenários futuros. Além disso, na literatura existem pesquisas que utilizaram dados do infravermelho termal para compreender, conjuntamente, o impacto térmico na água e no local de proliferação anômala de algas, apenas em ambientes oceânicos e com a utilização de dados de satélite do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imagem Spectroradiometer*) ou do sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), a exemplos. Obviamente, devido a necessidade de uma resolução

espacial relativamente melhor para o estudo dos compartimentos aquáticos do reservatório de Itaipu (CLARK et al., 2017), dados do MODIS (resolução espacial = 1km, produto MOD11) e AVHRR (resolução espacial >1km, bandas 4 e 5) não são adequados, embora suas resoluções temporais (1-2 dias e diária, respectivamente) sejam proeminentes em relação ao sensor TIR do Landsat (a cada 16 dias).

Estudos e projeções mundiais abordadas na literatura atual presumem que a combinação de perturbações antropogênicas cada vez mais presentes no regime térmico do meio aquático resultam em concentrações anômalas de episódios de floração de algas, inclusive, potencialmente tóxicas. Esta possibilidade de toxicidade é uma preocupação, dada a fatalidade na maioria dos casos, a citar: a) em abril de 2021 florações de algas nocivas causaram a mortalidade de 4.244 toneladas de peixes no sul do Chile. O último grande evento de florações e morte de peixes, principalmente de salmões, havia atingido a região em 2016, de acordo com o Serviço Nacional de pesca e Aquicultura (SERNAPESCA, 2021); b) em Botsuana, na África, especificadamente na região do delta do rio Okavango, centenas de elefantes morreram vítimas de uma cianobactéria na água de lagos, de acordo com o depoimento de um veterinário do Ministério da Vida Selvagem e Parques Nacionais (BBC NEWS, 2020); c) estudo realizado por autoridades de saúde de Nova York relatou 51 casos de doenças em humanos e cães relacionadas a algas (FIGGATT et al., 2017), que obrigou alguns estados, a exemplo da Carolina do Norte, desenvolverem programas de vigilância para monitorar a recorrência dos episódios de florações de algas (NORT CAROLINA ENVIRONMENTAL QUALITY, 2021); e d) no Brasil, em 1996, pacientes renais crônicos de uma clínica de hemodiálise de Caruaru, Pernambuco, morreram em decorrência de uma intoxicação causada por cianobactérias presentes na água de reservatórios de abastecimento público, fornecidas à clínica sem tratamento (CÂMARA NETO, 2011).

À vista disso, informações da abundância e recorrência desses episódios de florações ainda são desconhecidas nas áreas de estudo e, conseqüentemente, nos relatos presentes na literatura. Logo, esse cenário é um dos exemplos das inúmeras lacunas nas informações e na distribuição geográfica pouco conhecida no Brasil, claramente enfatizadas na revisão sistemática de Guimarães et al. (2020).

Inserido neste contexto, a presente pesquisa buscou explorar a temperatura de superfície da água medida *in situ* e nas imagens de satélite Landsat a fim de modelar sazonalmente o regime térmico superficial do reservatório de Itaipu e compreender o impacto de sua variação no local de ocorrência dos episódios de florações de algas, para o período compreendido entre 2013 e 2020. Embora as respostas fisiológicas das florações de algas não possam ser

compreendidas plenamente utilizando apenas dados de satélite (KARKI, et al., 2018), principalmente na detecção de toxinas (CLARK et al., 2017), entende-se que a utilização convergente de informações de diferentes naturezas possa apoiar de maneira confiável e econômica estudos existentes e sugerir novas metodologias para monitoramento conjunto da dinâmica térmica do metabolismo aquático e episódios de florações de algas na área de estudo.

1.3 QUESTÕES CIENTÍFICAS

Diante do contexto abordado levantou-se as seguintes questões científicas:

1) O reservatório de Itaipu e seus compartimentos aquáticos apresentam variações anômalas no seu regime térmico superficial que resultam plumas termais com impactos no metabolismo aquático?

2) Qual o impacto que a variação da temperatura de superfície da água pode ocasionar no padrão térmico sazonal do reservatório e seus compartimentos aquáticos?

3) Como mudanças mais expressivas na temperatura de superfície água podem afetar o metabolismo do meio aquático na área de estudo e resultar em concentrações anômalas de florações de algas maiores e mais recorrentes, potencialmente tóxicas?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Identificar a variação espaço-temporal da temperatura da água e o seu efeito nas áreas de recorrência de florações algais nos compartimentos aquáticos São Francisco Verdadeiro (SFV), Ocoí e a área central do reservatório de Itaipu, no Rio Paraná, situados na região Oeste do estado do Paraná, Brasil.

1.4.1.1 Objetivos específicos

► Identificar a variação térmica superficial da água nas áreas de estudo, sazonalmente, entre 2013 e 2020;

► Relacionar o efeito da variação térmica na água com a ocorrência de florações algais em distintos compartimentos aquáticos;

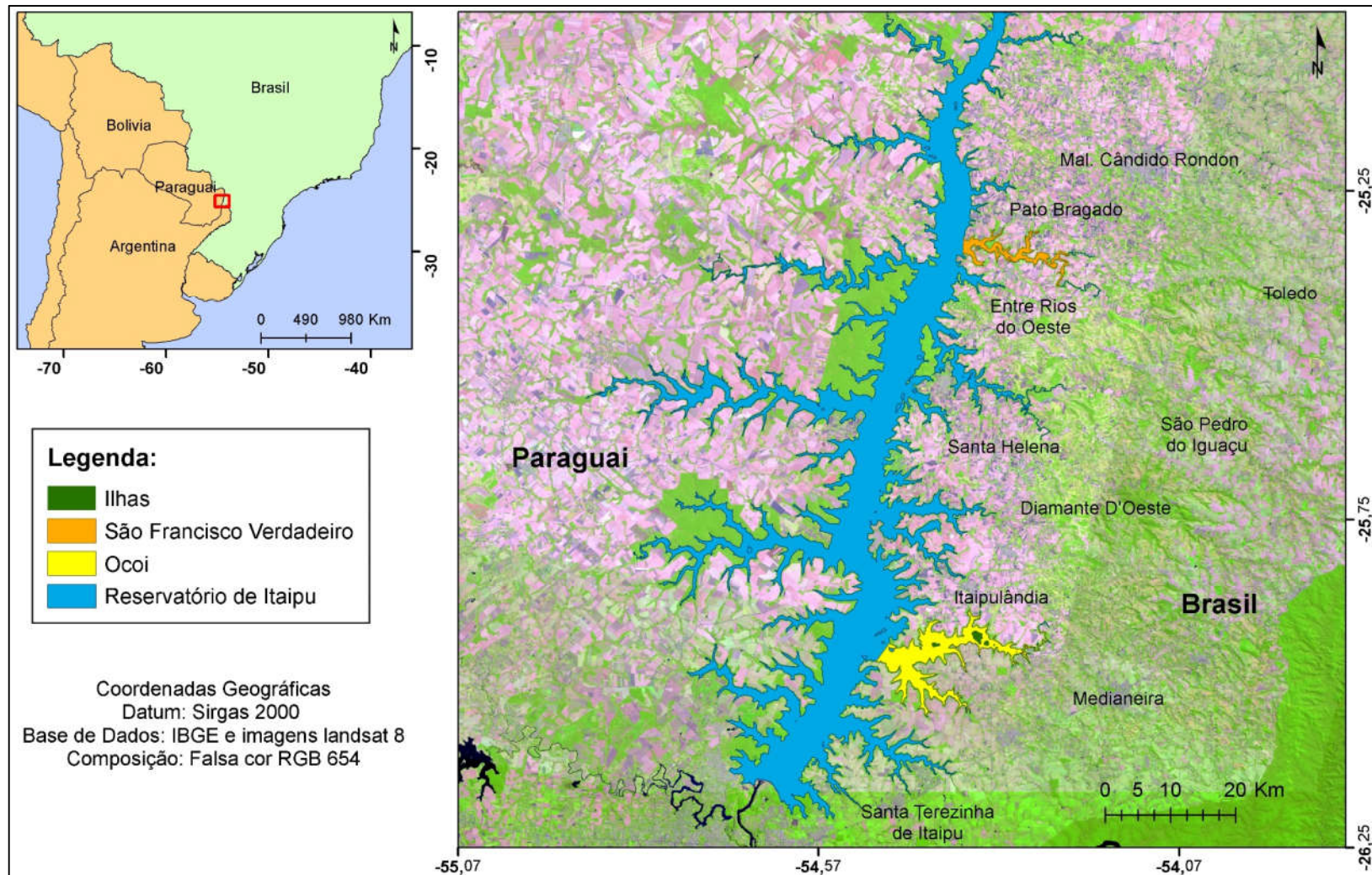
► Revelar tendências espaço-temporais no aquecimento da temperatura de superfície da água e, paralelamente, na recorrência das florações de algas no reservatório de Itaipu.

1.5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O reservatório de Itaipu está inserido na bacia hidrográfica do rio Paraná, mais precisamente na Bacia do Paraná III. Com altitudes que variam entre 300 e 800 m, a Bacia do Paraná III divide-se em 13 compartimentos aquáticos, a saber: Rio Taturi, Rio Chororó, Rio Guaçu, Rio São Francisco Verdadeiro, Rio São Francisco Falso Braço Norte, Rio São Francisco Falso Braço Sul, Rio São Vicente, Rio Ocoí, Rio Pinto, Rio Passo-Cuê, Rio Gabiroba, Córrego Matias Almada e Córrego Dois Irmãos (ITAIPU BINACIONAL, 2019).

As áreas de análise deste estudo compreendem o eixo central do reservatório de Itaipu e os compartimentos aquáticos do rio São Francisco Verdadeiro (SVF) e Ocoí, situados na margem esquerda do reservatório, a oeste do estado do Paraná, região sul do Brasil (Figura 1).

Figura 1- Localização da área do reservatório de Itaipu e seus compartimentos aquáticos SFV e Ocoí, estado do Paraná, Brasil



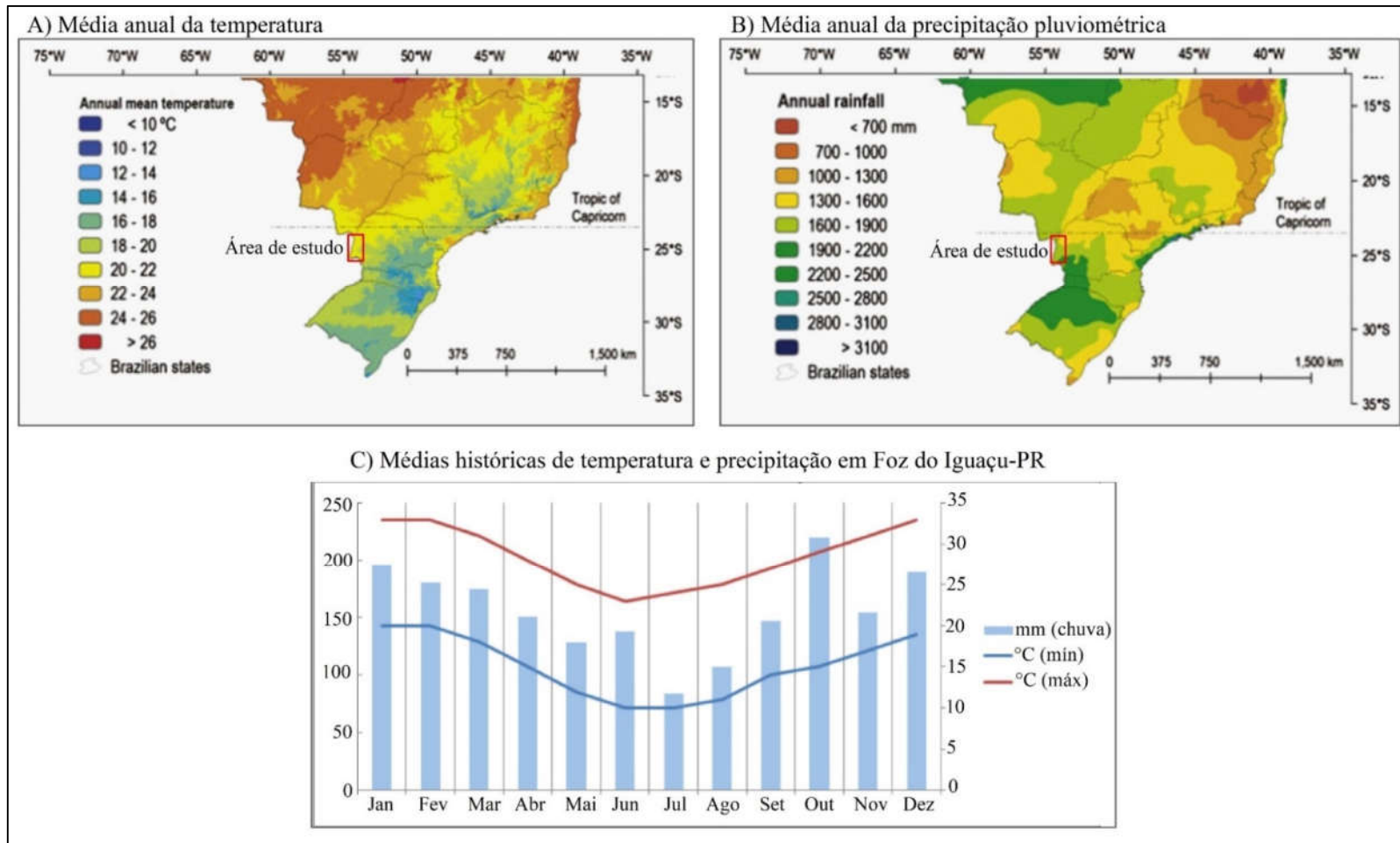
Fonte: Elaboração da autora com a colaboração de Rafael Dezordi (2021).

Os municípios que fazem parte da Bacia do Paraná III são: Altônia, Cascavel, Céu Azul, Diamante do Oeste, Entre Rios do Oeste, Foz do Iguaçu, Guaíra, Itaipulândia, Marechal Cândido Rondon, Maripá, Matelândia, Medianeira, Mercedes, Missal, Nova Santa Rosa, Ouro Verde do Oeste, Pato Bragado, Quatro Pontes, Ramilândia, Santa Helena, Santa Teresa do Oeste, Santa Teresinha de Itaipu, São José das Palmeiras, São Miguel do Iguaçu, São Pedro do Iguaçu, Terra Roxa, Toledo e Vera Cruz do Oeste.

O uso das terras presentes nestes municípios é predominantemente agrícola, com 72,23% de agricultura intensiva. Em menor escala destacam-se o uso misto (20,60%), áreas urbanas (2,65%), pastagens e campos (2,10%), cobertura florestal (1,64%), e represas (0,78%). Este uso predominantemente rural justifica-se pela região oeste do paraná apresentar solos de alta qualidade e produtividade, com sistemas altamente tecnificados e de mecaniza (PLANO DE BACIA DO PARANÁ III, 2014).

O contexto de uso das terras nas áreas de estudo tem como grande aliado o clima de zona subtropical, com verões quentes, situados entre 200 e 300m de altitude no Oeste do Paraná de acordo com a classifica *Kppen-Gaiger* (ALVARES et al., 2013). Na Figura 2  possível observar características das médias anuais da temperatura do ar (entre 20 e 22C) e precipita pluviométrica (total de 1600 a 1900 mm) nas áreas de estudos bem como a varia destas variáveis em Foz do Iguaçu, um dos principais municípios integrantes da Bacia do Paraná III e que faz parte das áreas de estudo em análise.

Figura 2 – Contextualização da temperatura média do ar e precipitação pluviométrica média nas áreas de estudo, a nível de estado e município



Fonte: A) Mapa anual da temperatura média do ar média modificado de Alvares et al. (p. 715, 2013); B) Mapa da precipitação total anual modificado de Alvares et al. (p. 716, 2013); e C) médias históricas da temperatura e precipitação pluviométrica em Foz do Iguaçu-PR, de acordo com dados do Climatempo, elaborado por “Esse mundo é nosso” e modificado pela autora.

A escolha das áreas de estudo da presente pesquisa levou em consideração três aspectos: 1) o curso dos compartimentos aquáticos e área central do reservatório apresenta área que permite estimar a TSA com imagens do satélite Landsat 8, ou seja, largura mínima de 0,2 km e 3 pixels puros no leito do recurso hídrico (WAWRZYNIAK, PIEGAY e POIREL, 2011); 2) a disponibilização de dados de campo da TSA registrados em missões de campo conduzidas pela equipe do Parque Tecnológico da Itaipu (PTI); e 3) sua importância, pois a Itaipu exerce liderança mundial na produção de energia com mais de 2,7 milhões de gigawatts-hora (GWh) desde 1984, abastecendo 10,8% da energia produzida no Brasil e 88,5% no Paraguai (ITAIPU BINACIONAL, 2020).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 LIMNOLOGIA DE RESERVATÓRIOS

Lagos ou reservatórios artificiais formados pelo represamento de rios são elementos das paisagens da Terra e configuram objeto de estudo em vários campos do conhecimento, especialmente em Geografia. O estudo do equilíbrio ecológico desses corpos d'água é denominado limnologia (*limné*, forma grega da palavra lago) e desempenha um papel fundamental como ciência interdisciplinar no estabelecimento de critérios biológicos, físicos e químicos para o controle da qualidade da água (ESTEVES, 1998).

Segundo Esteves (1998) grandes reservatórios no Brasil remontam o período de 1901, com a construção da represa Edgar de Souza, no rio Tietê, atrelado ao desenvolvimento industrial e socioeconômico que se configurava no país. Conseqüentemente, nos últimos 50 anos esse desenvolvimento se intensificou demandando a construção de inúmeros reservatórios no Brasil. Tal fato, despertou a atenção de pesquisadores sobre os impactos simbólicos desses empreendimentos, dada as interferências diretas na dinâmica dos rios (TUNDISI e MATSUMURA-TUNDISI, 2003). É importante entender, desse modo, as principais características hídricas de um reservatório.

Comumente existem diferentes zonas ou regiões transversais (compartimentos) em reservatórios que apresentam características intrínsecas, a saber: *região litorânea* (próxima da margem em contato terrestre adjacente – um ecótono) constituída de macroalgas, briófitos, pteridófitos e plantas superiores; *região limnética* ou *pelágica* (com comunidades de plâncton e nécton; e, encontrada em quase todos os ecossistemas); *região profunda* (comunidade bentônica, dependentes da quantidade de nutrientes e concentração de oxigênio; e, ausência de organismos fotoautótrofos); e, *interface água-ar* (comunidades nêuston e plêuston). Estas regiões são encontradas em constante interação e superposição, muitas vezes, no ecossistema aquático (WETZEL, 2001; ESTEVES, 1998).

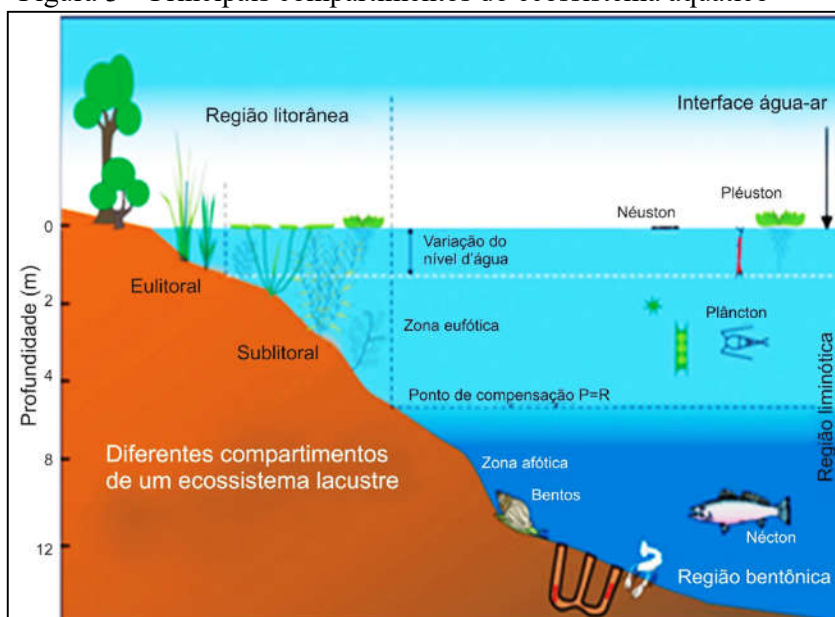
Ressalta-se que a presença e extensão de regiões litorâneas depende das características morfométricas (tamanho, profundidade e razão perímetro/volume) do ambiente lacustre, razão pela qual a radiação solar que atinge o fundo do lago pode variar e influenciar a germinação e o crescimento da vegetação (ESTEVES e CALIMAN, 2011).

A região limnética, por sua vez, pode apresentar variação na concentração das taxas de oxigênio, pH, salinidade e temperatura. Variações da temperatura e salinidade, por exemplo, podem alterar a densidade das camadas das massas d'água e restringir sua mistura, resultando

em padrões de estratificação. Logo, a região limnética pode apresentar dois estratos verticais, a saber: a) o epilímnio e zona eufótica e b) hipolímnio e zona afótica, basicamente com limites definidos a partir desta diferença na densidade das massas d'água, já mencionadas (ESTEVES e CALIMAN, 2011).

No que se refere ao gradiente longitudinal do reservatório, tem-se a *zona fluvial*, com o contato direto de rios que afluem ao reservatório, importando maior velocidade e mistura da água; a *zona de transição*, onde ocorre a dissipação da energia e, conseqüentemente, redução da velocidade hídrica; e, finalmente, a *zona lacustre*, com fluxo lento da água e eventos típicos de estratificação térmica. Sob o ponto de vista do gradiente vertical, o reservatório pode ser dividido em *zona eufótica*, caracterizado pela penetração da luz e produção de matéria orgânica; e a *zona afótica*, onde há a ausência da luz e transformação da matéria orgânica (WETZEL, 2001). Ainda, o espelho d'água também é relevante, pois é na interface ar-água onde ocorrem os processos de trocas de calor, momentum e gases entre a atmosfera e o reservatório (IMBERGER e PATTERSON, 1990; IMBERGER, 1994). A Figura 3 apresenta uma síntese dos principais compartimentos presentes em um reservatório.

Figura 3 – Principais compartimentos do ecossistema aquático



Fonte: Esteves e Caliman (2011).

Estudos limnológicos desenvolvidos nos últimos 100 anos mostraram que as interferências são diversas e constantes nesses gradientes, introduzidas principalmente pelo

deságue das bacias hidrográficas adjacentes. A resposta dessas interferências varia conforme a geografia do reservatório (morfometria da bacia e do lago, clima, usos, etc.) e a intensidade dos impactos gerados na alteração de parâmetros limnológicos (TUNDISI et al, 2006).

Inserido neste contexto, os processos metabólicos de muitos reservatórios hidrelétricos são favorecidos pelo tempo de residência da água prolongado aliado a maior permanência de contaminantes no meio aquático (característica de sistemas lênticos). A exemplo, a UHE Balbina, localizada no estado do Amazonas, apresenta até 14 meses de residência da água (BARBOSA, NOVO e MARTINS, 2019); represamentos em cascata presentes na bacia hidrográfica do Alto Jacuí, estado do Rio Grande do Sul, apresentaram residência média da água distinta em período normal de 33 dias em Itaúba, 319 dias em Passo Real e 21 dias para Dona Francisca (WACHHOLZ, 2011); a UHE de Itaipu, Paraná, apresenta 40 dias, com oscilações anuais do nível da água inferiores a um metro (MANIGLIA, et al. 2010). Desse modo, dado a maior permanência de nutrientes no meio aquático com maior tempo de residência (TUNDISI, 1988) e maiores temperaturas da água, tais reservatórios são mais susceptíveis à eutrofização e, conseqüentemente, ao aparecimento de episódios de florações de algas (WACHHOLZ, 2011).

2.1.1 Temperatura da água

A temperatura da água é um dos parâmetros limnológicos mais importantes monitorados atualmente, pois pequenas variações podem ser significativas para o ecossistema aquático. Quando a temperatura natural das águas é alterada (elevada) o oxigênio dissolvido reduz sua solubilidade, o período de estratificação térmica é estendido (fator determinante do déficit de oxigênio, principalmente do hipolímnio) a respiração dos organismos é acometida, a decomposição da matéria orgânica por microorganismos é acelerada (elevação de 10°C pode duplicar ou triplicar a velocidade dessas reações) e pode ocorrer a proliferação acelerada de algas e macrófitas aquáticas (em combinação com outros fatores) (ESTEVES, 1998).

As variações da temperatura d'água podem contemplar verticalmente três estratos, em detalhes; *epilímnio* (camada superficial), *metalímnio* (camada intermediária) e *hipolímnio* (camada profunda), de modo que, a profundidade que ocorrer a maior variação de temperatura é chamada de termoclina (WETZEL, 2001). Entender o regime térmico da temperatura na coluna d'água é importante para compreender a dinâmica de funcionamento do reservatório, dado as alterações na termoclina que variam com o tempo e no espaço (IMBERGER e PATTERSON, 1990; IMBERGER, 1994).

Quando ocorre diferenças de temperatura na d'água, conseqüentemente, as camadas da coluna d'água apresentam diferentes densidades. Assim, proporciona-se uma barreira física, dificultando a distribuição uniforme do calor entre as camadas, estabelecendo assim, uma estabilidade térmica ou uma estratificação térmica no reservatório. Sabe-se que para desestratificar massas d'água com temperaturas entre 29 e 30 °C é necessário 37 vezes mais energia que temperaturas entre 4 e 5 °C. Nesse caso, a ação gradual do vento pode quebrar esta estabilidade pois é o agente fornecedor de energia responsável pela mistura das massas d'água (ESTEVES, 1998). Além disso, a estratificação térmica da coluna d'água pode ser influenciada por eventos climatológicos (ação de frentes frias, por exemplo) pela sua localização geográfica e pelo padrão morfométrico na bacia em que o reservatório está inserido (IMBERGER, 1994; ESTEVES, 1998; ASSIREU et al., 2011).

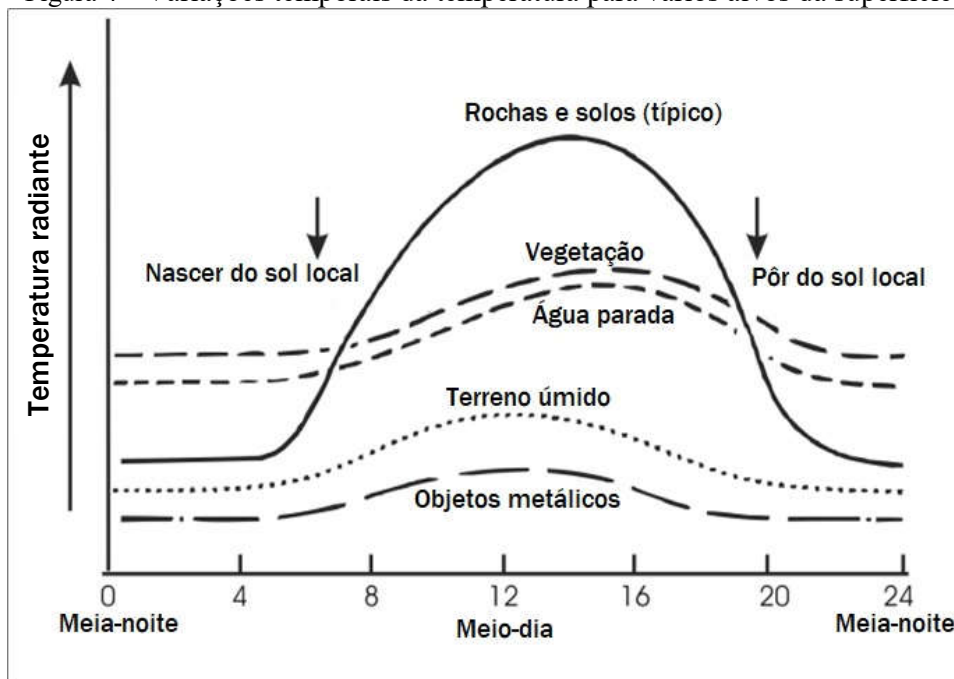
A ação de frentes frias influencia diretamente nos processos de mistura e estabilidade da coluna d'água, pois altera as trocas de calor entre a superfície da água e a atmosfera (LIU et al., 2009). Nesse caso, o padrão de circulação dos ventos comumente é alterado com a ação das frentes, proporcionando assim, influência sobre o padrão de circulação do ecossistema aquático (LAVAL et al., 2003). Na região do hipolimnio, por exemplo, a estratificação térmica pode ser considerada a principal responsável pelo déficit de oxigênio, especialmente nos ecossistemas aquáticos mais profundos. Além disso, variações da temperatura da água ocorridas por confluências entre rios, fontes de poluição térmica ou de atividades decorrentes da urbanização tendem a alterar o padrão de temperatura da água (WAWRZYNIAK, PIEGAY e POIREL, 2011; HÉBERT, 2015; LING et al, 2017). Nota-se, desse modo, a importância de compreender as influências e conseqüências que podem ser recebidas por um ecossistema aquático (ESTEVES, 1998).

Em relação a sua propriedade térmica, a água apresenta capacidade de conduzir e armazenar calor diferentemente de outros alvos como rochas, solos e vegetação. Precisamente, apresenta maior *capacidade térmica* (1,0), ou seja, maior quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de um grama de material em 1°C (LORENZZETTI, 2015). Nesse sentido, normalmente apresenta pouca variação térmica entre o dia e a noite se comparadas a superfícies não aquáticas (JENSEN, 2009).

Em termos de *condutividade térmica*, que é expressa pela taxa com que um material transfere calor por ela, a água não é boa condutora de calor. Já a inércia térmica, caracterizada pela resistência de um material ao aquecimento, é dada pela *capacidade calorífica* por unidade de massa da substância, pela *densidade do material* e *condutividade térmica* do alvo (KUENZER

e DECH, 2013; LORENZZETTI, 2015). Nesse sentido, note na Figura 4 que a água apresenta uma alta inércia térmica se comparada a inércia das rochas e solos.

Figura 4 – Variações temporais da temperatura para vários alvos da superfície



Fonte: Adaptado de OLSEN, (2007, p. 163).

Neste contexto, a compreensão sobre as propriedades térmicas da água é relevante para interpretar corretamente as informações termais, pois as observações registradas pelo infravermelho termal são muito dependentes da região e natureza dos alvos imageados.

2.1.2 Florações de algas e seus impactos

Florações naturais de algas em ecossistemas de água doce têm apresentado preocupação no reservatório de Itaipu, pois existem espécies de algas com potencial genético para a produção de toxinas (MANIGLIA et al., 2010) e a influência de fatores ambientais sobre a síntese de congêneres específicos dessas algas, que alteram sua composição e conteúdo, ainda é pouco compreendida (MANIGLIA et al., 2010; GRIFFITH e GOBLER, 2020).

As florações naturais de cianobactérias no reservatório de Itaipu podem produzir vários tipos diferentes de toxinas, a exemplo das microcistinas (MANIGLIA et al., 2010) influenciadas substancialmente pela intensidade de radiação solar, concentração de nutrientes e temperatura (MANIGLIA et al., 2010; DZIALLAS e GROSSART, 2011 e KIM et al., 2018). Diante da combinação desses fatores, impulsionados principalmente pelo aquecimento ou resfriamento das

águas (GRIFFITH e GOBLER, 2020) e tempo residência prolongada (GENUÁRIO et al., 2016; CHENG et al., 2019 e GRIFFITH e GOBLER, 2020), os processos metabólicos, a distribuição de espécies e a fenologia dos eventos biológicos fundamentais do meio aquático são alterados (GRIFFITH e GOBLER, 2020). Consequentemente podem resultar muitos tipos de *harmful algal blooms* (*HABs*) (CHENG et al., 2019 e GRIFFITH e GOBLER, 2020).

Estudos que incorporam fatores de estímulos às florações sazonais têm revelado preocupação mundial com a ocorrência de *HABs* na Coreia do Sul (KIM, 1998), no Chile (PROENÇA e HALLEGRAEFF, 2017), na China (TANG et al., 2003 e CHENG et al., 2019) e nos EUA (RYAN et al., 2017; HO, MICHALAK, e PAHLEVAN, 2019 e TRAINER et al., 2019), pois impactam seriamente a biota aquática e o setor de aquicultura (TANG et al., 2003; RYAN et al., 2017; PROENÇA e HALLEGRAEFF, 2017 e GRIFFITH e GOBLER, 2020), recreação e turismo (HO, MICHALAK, e PAHLEVAN, 2019).

Inseridos neste contexto, o aquecimento das águas pode favorecer o crescimento de cianobactérias, porém sua relação com a toxicidade é específica da espécie, da cepa e pode não ser linear (GRIFFITH e GOBLER, 2020). Um estudo sobre a variabilidade térmica no crescimento e toxicidade do dinoflagelado ictiotóxico (*C. polykrikoides*) indicou que as culturas de 16 e 20°C foram mais tóxicas por célula que as culturas de crescimento mais rápido mantidas em temperaturas maiores que 24°C (GRIFFITH e GOBLER, 2016). Em outro estudo, porém, constatou-se que o aumento na produção de toxinas diarréticas de moluscos durante o crescimento de *Dinophysis* spp. normalmente ocorre conforme o aumento da temperatura na água (até 25°C) (KAMIYAMA et al., 2010). Ainda, a exposição do peixe-zebra (*Danio rerio*) à microcistina entre as faixas de temperatura 12, 22 e 32°C revelou maior mortalidade dessa espécie na temperatura mais alta (ZHANG et al., 2011).

Muitas espécies de *HABs* também produzem sabor e odor, aumento da turbidez, redução da vegetação aquática submersa, promovendo a morte de peixes e invertebrados bentônicos (GUIMARRÃES, et al. 2020), pois podem tornar-se aerossolizadas, causando danos respiratórios desses indivíduos próximos ou abaixo das florações (GRIFFITH e GOBLER, 2020). Através da cadeia alimentar, algumas toxinas podem se acumular nos frutos do mar ou peixes de água doce (DÖRR et al., 2010). Quando ingeridas por aves ou mamíferos podem causar doenças hepáticas, digestivas e neurológicas (MANTZOUKI et al., 2018). Em humanos seus potenciais efeitos, a curto e longo prazo, incluem dermatite; problemas gastrointestinais, respiratórios e neurológicos, comprometimentos adversos às funções hepática e renal (CLARK et al., 2017). Em atividades recreativas, mediante o contato direto em águas com a presença de cianobactérias, comumente ocorrem irritações na pele e alergias (DÖRR et al., 2010).

No Brasil, as primeiras mortes documentadas por cianobactérias ocorreram em uma clínica de diálise na cidade de Caruaru, Pernambuco, em 1996, durante procedimentos intravenosos em pacientes com tratamento hemodialítico de rotina (AZEVEDO et al., 2002). Logo, o monitoramento de episódios de florações de cianobactérias e suas toxinas tornou-se obrigatório (BARROS, 2019), dado o crescimento da urbanização e de atividades agrícolas (AZEVEDO et al., 2002) cada vez mais presentes em regiões brasileiras e que geralmente têm resultado na eutrofização dos corpos d'água (DÖRR et al., 2010).

Além disso, já foram documentados episódios de floração de cianobactérias em 11 dos 26 estados brasileiros (DÖRR et al., 2010), com crescente aumento em várias regiões (DOMINGUES et al., 2011; DOMINGUES, 2014; CORAZZA, 2015; GENUÁRIO et al., 2016; BARROS et al., 2019). A exemplo, no Rio Grande de sul foi realizado o primeiro registro da espécie *C. Furcoides* no reservatório de Itaúba, o qual faz parte de uma série de represamentos em cachoeiras presentes na bacia hidrográfica do Alto Jacuí (CASSOL et al., 2014). Durante um estudo em uma lagoa de lazer de São Paulo foi encontrada uma espécie semelhante ao *Trichodesmium* (que são tóxicas) comumente presente em ambientes marinhos (SANT'ANNA et al., 2018), reafirmando esse problema como uma preocupação emergente (DÖRR et al., 2010).

Diante deste cenário, o potencial genético para toxicidade de episódios de florações de cianobactérias no reservatório de Itaipu requer atenção e sua presença e impacto necessita ser investigada, dado o uso da água em atividades de pesca, turismo e recreação (MANIGLIA et al., 2010 e ITAIPU BINACIONAL, 2020). Em muitos casos, inclusive, tais florações desaparecem das águas antes mesmo de sua detecção pelas autoridades, que normalmente desconhecem os potenciais impactos e, assim, podem negligenciar a presença das florações e ocasionar graves problemas de saúde pública (FUNASA, 2003).

2.1.3 Temperatura da água versus florações de algas

Entre os muitos impactos que as mudanças climáticas proporcionam, o aumento da temperatura de ecossistemas marinhos e de água doce afeta diretamente os organismos aquáticos, além de modificar a distribuição e a intensidade de múltiplos co-estressores que fazem parte do metabolismo e eventos biológicos fundamentais destes ecossistemas (GRIFFITH e GOBLER, 2020).

Em águas mais profundas, como é o caso dos lagos Constança (Europa Central) e Washington (EUA), o aquecimento das águas no período de inverno (dezembro a março) devido às mudanças climáticas proporciona a ocorrência precoce de episódios de florações e, na

primavera (março a junho), o início mais cedo da estratificação térmica na coluna da água, alterando significativamente os processos biológicos do ecossistema. Em lagos da Nova Zelândia, o aquecimento da atmosfera acima de 1°C (estudo de simulação) parece determinar o início precoce da estratificação térmica das águas (BAYER, BURNS e SCHALLENBERG, 2013). Em modelos empíricos com dados observados entre 2003 e 2018, Mullin, Kirchhoff e Wang (2020) demonstrou como a manipulação de forçantes climáticas pode influenciar mudanças futuras na temperatura da água (2041-2070). O resultado mostrou que a temperatura do ar influenciou o aquecimento das águas ocasionando a estratificação térmica e a prevalência de florações de cianobactérias em reservatórios.

Em latitudes temperadas, as águas superficiais se aquecem e estratificam na primavera, promovendo o florescimento de diatomácea e dificultando as águas de profundidade dos influxos superficiais de oxigênio dissolvido. Consequentemente, conduzem à hipóxia e acidificação simultânea. Assim, a variação atípica da temperatura das águas pode alterar a acidificação e a desoxigenação, comprometendo a demanda de oxigênio, e assim, restringir o escopo aeróbico de organismos em zonas hipóxicas (GRIFFITH e GOBLER, 2020).

Em um estudo de Vaquer-Sunyer e Duarte (2011) demonstrou-se que o estresse térmico combinado com hipóxia impulsionou a morte de 74% da macrofauna bentônica, com a elevação expressiva dos limiares letais de oxigênio decorrente da variação expressiva da temperatura. Além disso, muitos *dinoflagelados* nocivos migram verticalmente em profundidade durante a noite resultando em chances maiores dos animais bênticos serem expostos a HABs, hipóxia e acidificação (GRIFFITH e GOBLER, 2020).

Normalmente a alteração no fluxo de água de um rio apresenta tendências no regime hidrológico semelhantes aos lagos e reservatórios, e assim, os episódios de floração de algas ocorrem facilmente conforme a interação de seus múltiplos fatores de influência (DALY et al., 2020; BAH et al., 2019). Requisitos como a presença de nutrientes, condições hidrológicas, temperatura (CHENG et al., 2019; CLARK et al. 2017; RIGOSI et al., 2015) e fatores meteorológicos são essenciais (BAYER, BURNS e SCHALLENBERG, 2013).

Em muitos rios da Europa e da América do Norte destaca-se o aumento da biomassa de algas resultante da carga expressiva de nutrientes e mudanças hidrológicas no curso do rio. No rio Nakdong, na Coreia, a baixa temperatura associada ao tempo de retenção da água promove a proliferação de algas. Já no rio Hunter, na Austrália, a combinação de temperaturas elevadas na água e longos períodos de retenção estabelece condições ideais para o desenvolvimento de algas. Nota-se, ainda, que o crescimento de algas no rio Xiangxie, na China, apresentou forte influência do padrão de circulação da água no controle de proliferação dos episódios de florações, pois o

aumento da temperatura é vantajoso na combinação de condições hidrológicas e nutricionais adequadas (CHENG et al., 2019).

Semelhantemente, o desenvolvimento de algas no rio Han Jiang, também na China, normalmente ocorre no inverno (dezembro a meados de março) e na primavera (março a junho). Entre 2004 e 2014, o florescimento de *S.hantzschii* ocorreu à jusante do rio em meados de fevereiro e início de março decorrente da mudança do nível da água e do seu tempo de retenção prolongado (CHENG et al., 2019). Esta espécie comumente floresce em baixas temperaturas (de 5°C a 15°C), aumentando significativamente em temperaturas menores que 7°C e seu declínio em temperaturas maiores que 15°C (YIN et al., 2012)

Na espécie *S. Obliquus*, a densidade de *chl* mostrou-se maior em temperaturas mais baixas. Outras espécies, como *Nitzschia spp.* e *Cocconeis spp.*, tendem a ser mais abundantes em temperaturas da água superiores a 25 °C (LARRAS et al., 2013). Já as espécies de diatomáceas comumente tendem a ser dominantes em temperaturas inferiores a 20°C e as cianobactérias em temperaturas mais quentes. Um estudo sobre o efeito de diferentes temperaturas na estrutura e a função de uma comunidade de microalgas perifíticas naturais, expostas, também, a uma mistura de herbicidas, revelou que temperaturas mais altas (24 e 28 °C) influenciaram a composição da comunidade, mudança de espécies e à dominância da diatomácea *A. Minutissimum*. Sua densidade celular foi afetada expressivamente a 8°C acima da temperatura ambiente inicial (16°C). Além disso, a sensibilidade da comunidade à mistura de herbicidas mostrou-se dependente da temperatura de crescimento. Concluiu-se, portanto, que temperaturas mais altas parecem favorecer espécies pequenas, pioneiras e altamente competitivas. Sobretudo, a temperatura da água influencia diretamente na densidade de clorofila e pode variar de acordo com a espécie das algas presentes no ecossistema aquático (LARRAS et al., 2013).

Em muitos ecossistemas aquáticos os problemas com episódios de floração de algas tendem a aumentar com a abundância, a frequência e a extensão da floração. Ademais, eventos de floração de cianobactérias comumente são presentes em ambientes lênticos e de maior represamento de rios (GUIMARRÃES, et al. 2020). Em ambientes aquáticos brasileiros os eventos de floração de algas são, muitas vezes, dos gêneros *Microcystis*, *Raphidiopsis* e *Dolichospermum*, potencialmente tóxicos. Esses gêneros estão amplamente distribuídos do Brasil e sua ocorrência é influenciada substancialmente pelas mudanças ambientais. Consequentemente, apresentam vantagens biológicas sob baixas concentrações de oxigênio, altos valores de pH e disponibilidade de nutrientes, condicionando o desenvolvimento de florações e a produção de toxinas (COSTA et al., 2018).

Um estudo desenvolvido por Domingues (2014) no reservatório Passo Real, Rio Grande do Sul, entre outubro de 2009 e janeiro de 2013, mostrou que a investigação de variáveis meteorológicas, hidrológicas e limnológicas analisadas no período de ocorrência de florações de cianobactérias potencialmente tóxicas revelou influência favorável de precipitações pluviométricas elevadas (>20mm), até 10 dias que antecederam as coletas (coincidentes com os períodos de entressafra dos cultivos agrícolas) e o registro de temperatura média do ar diária superior a 15°C, 30 dia antes das coletas. Registrou-se, também, temperaturas elevadas e estratificação térmica da água no período compreendido entre outubro a março. Nestas condições, destacaram-se florações das espécies do gênero *Dolichospermum*, em florações dispersivas, principalmente as espécies *D. crassum* e *D. circinalis*. Espécies do gênero *Microcystis*, em florações acumulativas em superfície, com destaque para *M. aeruginosa* e *M. panniformis*.

Assim, é de grande importância a compressão do efeito da variação da temperatura da água sob a condição de eventos de florações de algas, visto que Jensen (2009) observou um aumento no crescimento e fotossíntese de algas fitoplanctônicas decorrente de um aumento na temperatura da água entre 2°C e 6°C acima da temperatura inicial de crescimento. Um estudo conduzido por Wang e Tang (2014) durante um episódio de floração da *Ulva prolifera* em 2009 no mar Amarelo, localizado na marginal do oceano pacífico (conectado com o Mar de Bohai, ao norte, e com o Mar da China Oriental, ao sul) revelou um aumento da temperatura superficial da água de 2 a 4°C no local da floração. No início desta floração, em 3 de junho (primavera), a temperatura superficial da água no local da floração atingiu 27-28°C, valores superiores a temperatura no entorno da área afetada pela floração, 24-25°C. Nesse caso, sabe-se que a região central do mar Amarelo apresenta uma massa d'água com temperaturas mais baixas, conhecidas como Massa de Água Fria do Mar Amarelo, enquanto que na região leste as águas são quentes, fluindo de sudeste para noroeste, chamadas de Corrente Quente do Mar Amarelo. Na confluência entre essas massas d'água a concentração de nutrientes é elevada, resultando em produção primária elevada.

A questão importante e ainda pouco estudada baseia-se na compreensão da variação anômala da temperatura superficial da água e seu efeito sobre os padrões de migração das algas, alterando sua ocorrência e distribuição espacial, além de proporcionar impactos diretos nos organismos presentes no ecossistema aquático. A compreensão desses efeitos também pode auxiliar estudos futuros que visam identificar o perfil térmico que normalmente os organismos aquáticos acumulam ou depuram suas toxinas alterando, conseqüentemente, os efeitos nocivos dos HABs nas redes alimentares do meio aquático (GRIFFITH e GOBLER, 2020). Ainda, a

variedade de tamanhos e formas de lagos que existem na Terra assumem padrões de aquecimento altamente distintos no espaço e no tempo (O'REILLY, et al., 2015) ressaltando-se, assim, que as características locais do reservatório de Itaipu podem influenciar a alteração da temperatura de superfície da água.

2.2 SENSORIAMENTO REMOTO DO INFRAVERMELHO TERMAL

Dados da superfície terrestre podem ser obtidos por uma infinidade de instrumentos de sensoriamento remoto (KUENZER e DECH, 2013). Conceitualmente, destaca-se como uma tecnologia que registra, identifica e classifica uma infinidade de dados de alvos ou eventos da superfície terrestre e oceanos (TANG e LI, 2014), em forma de imagens, a partir da utilização conjunta de sensores e equipamentos colocados a bordo de plataformas, sem que haja contato físico entre o equipamento sensor e o alvo imageado (STEFFEN, LORENZZETTI e STECH, 1981; FLOID e SABINS, 1986; JENSEN, 2009; NOVO, 2010; FLORENZANO, 2011).

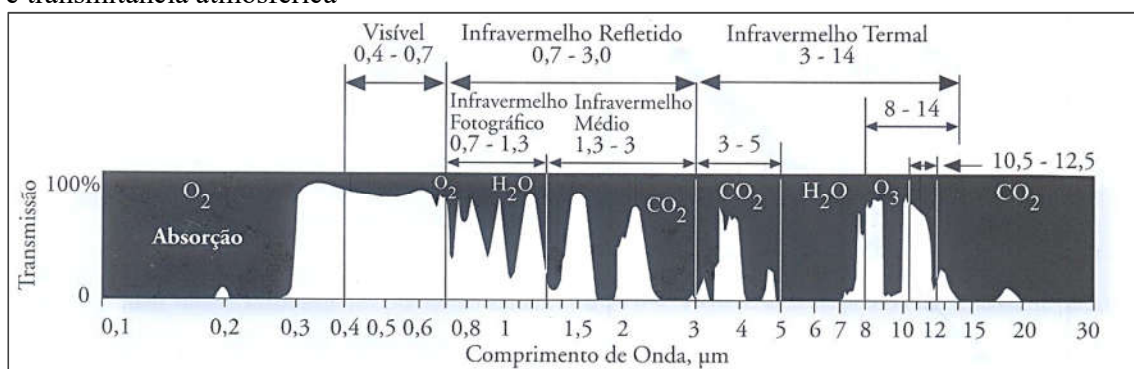
A partir da faixa de resposta espectral desses sensores o sensoriamento remoto pode ser classificado basicamente em: a) região do visível, b) infravermelho próximo e médio e c) infravermelho termal (TIR) (JENSEN, 2009). A abordagem do sensoriamento remoto do infravermelho termal é bastante distinta em relação as demais regiões do espectro eletromagnético (NOVO, 2010).

A energia envolvida no espectro eletromagnético da região do infravermelho termal é proveniente de vibrações moleculares resultantes da temperatura de corpos (NOVO, 2010). Todos os corpos com uma temperatura acima de 0 K apresentam calor cinético (calor real ou verdadeira) e emitem radiação eletromagnética. Com base na Lei de Planck, a vibração dos corpos em dada temperatura produz radiação eletromagnética medida em *fluxo radiante* (Φ , em Watts) (LORENZZETTI, 2015). A concentração da quantidade emitida desse fluxo radiante, por sua vez, denomina-se *temperatura radiante* (T_{rad}) (LIOU, 2002; KUENZER e DECH, 2013). No sensoriamento remoto do infravermelho termal essa temperatura radiante é função basicamente do calor cinético do corpo ponderada pela emissividade de sua superfície. Portanto, registra-se, assim, medições indiretas da radiação emitida pelos corpos para determinar sua temperatura radiante (NOVO, 2010 e HANDCOCK et al., 2012).

Em relação ao domínio do comprimento de onda, autores que estudam as propriedades da radiação TIR definem-o de forma ligeiramente diferente, pois sua emissão máxima depende da variação da temperatura no espectro. Para Sabins (1996) e Jensen (2009), por exemplo, o domínio de comprimento de onda infravermelho termal se estende de 3 a 14 μ m, conforme mostra

a Figura 5. No presente estudo, o domínio do comprimento de onda utilizado é de 10.60 a 11.19 μm (banda 10), característica inerente ao *Thermal Infrared Sensor (TIR)*, Landsat 8.

Figura 5 – Domínio dos comprimentos de onda e bandas de absorção induzidas por gases, água, e transmitância atmosférica



Fonte: Jensen (2009, p. 256)

As áreas escuras na Figura 5 apresentam regiões do espectro onde a atmosfera absorve a maior parte da energia infravermelha, conhecidas como *bandas de absorção*. Estas bandas de absorção são compostas pelo vapor d' água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) e o ozônio (O_3). Nestas regiões, o sensoriamento remoto ambiental é afetado, pois o fluxo radiante emitido no intervalo de 5-7 μm é grande parte absorvido pelo vapor d' água (JIMÉNEZ-MUÑOZ e SOBRINO, 2003). Já as regiões claras observadas na figura são conhecidas como janelas atmosféricas. Apesar do espectro do TIR se situar em uma janela atmosférica (10.60 a 11.19, no caso da banda 10, TIRS) ainda há considerável influência da atmosfera nesta região espectral, pois emite, absorve e reflete parte da radiação da superfície (KAY et al., 2005).

2.2.1 Temperatura radiante da superfície da água a partir do TIR

As observações registradas no infravermelho térmico são muito dependentes da história térmica da região do alvo e da natureza dos materiais (OLSEN, 2007), pois objetos próximos um ao outro no terreno podem apresentar a mesma temperatura cinética, porém, temperaturas aparentes diferentes em função de suas emissividades distintas (citada anteriormente). Para uma melhor compreensão sobre o registro da temperatura radiante da superfície da água a partir de dados do infravermelho térmico torna-se necessário, portanto, conhecer detalhadamente as emissividades dos materiais, principalmente da água (Quadro 1).

Quadro 1 – Emissividade de materiais comuns

Material	Emissividade
Ouro polido @ 8–14 μm	0,02
Folha de alumínio @ 10 μm	0,04
Granito	0,815
Areia, quartzo	0,914
Asfalto	0,959
Passarela de concreto	0,966
Água com camada fina de petróleo	0,972
Água pura	0,995

Fonte: Buettner e Kern, adaptado de Olsen (2007, p. 160)

Alguns aspectos podem influenciar na emissividade de alvos e são importantes considerar, a saber: a cor (quanto mais escuro o alvo, maior a absorção e emissão); a composição química; a rugosidade superficial (quanto maior, melhor a absorção e re-emissão de energia); campo de visada (a emissividade de uma folha medida com um radiômetro de alta resolução versus a emissividade da copa inteira de uma árvore a partir de um radiômetro de baixa resolução espacial apresentarão resultados distintos); comprimento de onda (emissividades diferentes para o mesmo alvo em regiões distintas do espectro) e ângulo de visada (relacionado a variações do ângulo de visada do sensor) (JENSEN, 2009).

Neste contexto, pode-se afirmar que “*bons absorvedores são bons emissores e bons refletores são maus emissores*” (JENSEN, 2009, p. 260). É o caso da água (pura), que absorve muita energia, refletindo muito pouco, portanto, emissividade alta próximo de 1 (0,995). E ainda que ocorra pouca variação sobre a temperatura verdadeira (TK_{in}), a temperatura radiante aparente ($Trad$) dessa água será subestimada sem a correção da emissividade (SALISBURY e D’ARIA, 1992).

A emissividade varia com o comprimento de onda e normalmente é pronunciada a partir da refletância de materiais usando a lei da radiação de *Kirchhoff*: $E = 1 - R$, ou seja, emissividade e refletância, respectivamente. Para muitos autores a emissividade da água é considerada um corpo negro, devido sua emissividade alta no intervalo de 8–14 μm . No entanto, o sensoriamento remoto da emissividade requer que outras suposições sejam destacadas sobre o comportamento espectral da água. A emissividade pode variar com a presença de sedimentos em suspensão ou dissolvidos na água, eventos de espuma na superfície, fragmentos de rochas, bem como rugosidade da superfície e efeitos angulares (SALISBURY e D’ARIA, 1992; HANDCOCK et al, 2012). Ao considerar essas interferências, que se aproximam muito da realidade encontrada na natureza, a emissividade da água pode se afastar significativamente do comportamento espectral de um corpo negro (SALISBURY e D’ARIA, 1992).

Esta compreensão sobre a emissividade dos alvos permite modificar a lei de Stefan-Boltzman inicialmente proposta, pois considera além da temperatura, sua emissividade, e assim, estimativas do fluxo radiante serão mais próximas da temperatura cinética desse alvo. A Equação 01 mostra essa combinação:

$$M_r = \varepsilon \sigma T_{kin}^4 \quad (01)$$

Onde:

M_r = Fluxo radiante espectral total do alvo

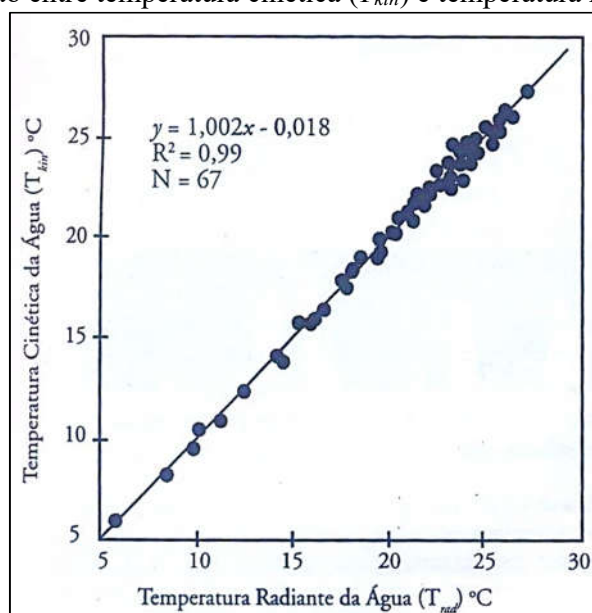
ε = Emissividade do alvo

σ = Constante valor de $5,6697 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

T_{kin} = Temperatura cinética verdadeira do alvo

Inserido neste contexto Torgensen et al (2001) demonstraram que a correlação entre a temperatura radiante da água estimada (*Trad*) por sensoriamento remoto versus a temperatura da água medida (*Tkin*) em rios foi satisfatória, apesar de não ser perfeita. Em quatro levantamentos anuais para cinco rios distintos, os resíduos apontaram valores no intervalo de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, dado a diferença entre a *Trad* e a *Tkin*, observar a Figura 6.

Figura 6 – Correlação entre temperatura cinética (T_{kin}) e temperatura radiante da água (T_{rad})



Fonte: Extraído de Jensen (2009, p. 255)

A relação não é perfeita, porque a temperatura radiante mostra-se sempre um pouco menor que a temperatura cinética do alvo. Nesse sentido, as imagens podem precisar da correção da emissividade do alvo, dado que o fluxo radiante de um alvo terrestre não é igual ao fluxo radiante de um corpo negro sob mesma temperatura. Adicionalmente, problemas de geometria e de efeitos atmosféricos também são observações relevantes (KUENZER e DECH, 2013).

2.2.1.1 Imagens de satélite Landsat

O interesse crescente de pesquisadores no monitoramento de ambientes por sensoriamento remoto tem destacado o Landsat há três décadas como o principal sistema para estudar os fenômenos terrestres. O Landsat 8, último da série lançado em 11 de fevereiro de 2013, da Base da Força Aérea de Vandenberg, na Califórnia, em um foguete Atlas-V 401 (colaboração entre a NASA e o *United States Geological Survey* (USGS) apresenta dois sensores, o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Esses sensores proporcionam resolução temporal de 16 dias e resolução espacial de 30 metros no visível, *Near Infrared* (NIR) e *Short Wave Infrared Region* (SWIR), 15 metros no pancromático e 100 metros no TIR (reamostrado para 30m) (USGS, 2019). O Quadro 2 apresenta as principais características do Landsat 8:

Quadro 2 – Principais características do Landsat 8

Landsat 8 Sensores OLI e TIR		
Banda	Comprimento de onda (μm)	Resolução espacial (m)
B1/Costeira/Aerosol	0.435 – 0.451	30
B2/Azul	0.452 – 0.512	30
B3/Verde	0.533 – 0.590	30
B4/Vermelha	0.636 – 0.673	30
B5/NIR	0.851 – 0.879	30
B6/SWIR-1	1.566 – 1.651	30
B7/SWIR-2	2.107 – 2.294	30
B8/PAN	0.503 – 0.676	15
B9/Cirrus	1.363 – 1.384	30
B10/TIR-1	10.60 – 11.19	100
B11/TIR-2	11.50 – 12.51	100

Fonte: Adaptado de USGS (2019)

Observa-se que a região do *TIRS* atua no domínio de comprimento de onda compreendido entre 10.60 e 12.51 μm (Bandas 10 e 11). No entanto, mediante interferências de luz difusa, o sensor *TIRS* apresentou problemas relacionados à sua calibração radiométrica (REUTER et al., 2015; MONTARANO et al., 2014). Diante da consequência propagada Montarano et al. (2015) desenvolveram um algoritmo que foi implementado nas imagens a partir de 2017 e que, parcialmente, resolveu o problema. As correções propiciaram a redução dos erros de calibração de 2,1°K para 0,3°C na banda 10. A banda 11 ainda não é recomendada para utilização (GERACE e MONTARANO, 2017).

Além disso, as medições de radiação emitida registradas na porção do espectro *TIR* são influenciadas pela composição e estrutura térmica da atmosfera, presentes entre a superfície e os sensores, além da emissividade e temperatura dos corpos da superfície. Teoricamente, apenas a emissividade e a temperatura da superfície terrestre podem ser corrigidas diretamente nos dados *TIRS*; já parâmetros como umidade do solo e evapotranspiração da superfície terrestre podem ser apenas deduzidas indiretamente. Todavia, desde o lançamento do primeiro satélite de observação no infravermelho, o *Television Satélite Operacional Infravermelho (TIROS)*, 1960, grandes esforços estão sendo realizados pela comunidade científica para minimizar as influências supracitadas e aproximar as medidas da temperatura cinética da superfície com a temperatura radiante medida pelos sensores (TANG e LI, 2014).

2.2.1.2 Temperatura radiante da superfície da água versus florações de algas

Imagens de satélite derivadas do sensor TIR são conhecidas comumente por gerar dados térmicos da superfície terrestre e da superfície do mar. No entanto, esses dados térmicos, também chamados de temperatura radiante de superfície, apresentam um potencial muito maior, pois proporcionam a avaliação de anomalias térmicas de diversas naturezas (KUENZER e DECH, 2013). No contexto aquático estudos de Sathyendranath et al. (1991), Nakamoto et al. (2000), Wang e Tang (2010) e Wang e Tang (2014) revelaram que a temperatura da superfície do mar poderia ser alterada substancialmente no local de proliferação de florações de algas.

No estudo de Wang e Tang (2010) a partir de imagens do *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) constatou-se que a temperatura diurna da superfície da água foi elevada durante a ocorrência de 12 eventos de florações localizados no mar da China Oriental entre 2000 e 2005, com variação média de 4°C em relação às áreas sem floração (Quadro 3). Dados a partir de imagens de satélite e registros *in situ* da temperatura e *Chl-a* revelaram uma relação positiva com o aumento na temperatura de superfície da água nos locais de maior concentração do fitoplâncton. As correlações observadas entre as variáveis foram: a) dados via sensoriamento remoto $r=0,30$ e $p < 0,01$ e b) dados *em situ* $r=0,79$ e $p < 0,01$. Normalmente, tais florações se concentram em camadas mais profundas à noite (de 0 a 5m), em busca de nutrientes, e retornam à camada superficial da água no período do dia para realizar fotossíntese.

Quadro 3 – Impacto termal na superfície da água durante eventos de florações de algas

Data da imagem	Área (Km ²)	Aumento (°C)
03-21 Maio 2000	7.000	1-4
12-24 Maio 2000	5.800	2-3
10-17 Maio 2001	3.400	2-4
12-16 Jun 2002	1.300	2-4
20 Ago 2002	1.200	2-5
22 Ago 2002	1.500	2-3
1 Maio 2003	1.200	2-3
19 Maio 2003	1.000	3-5
28-30 Jun 2003	1.000	3-4
10 Maio 2004	8.000	1-2
4 Abril 2005	3.000	5-6
31 Maio-12 Jun 2005	7.000	2-4

Fonte: Informações adaptadas de Wang e Tang (2010)

No mar da Arábia, entre a península Arábica e a Índia, a ressurgência de águas profundas ricas em nutrientes nos períodos da primavera e outono, decorrente da monção de sudoeste,

promove um aumento acentuado do fitoplâncton na camada superficial. Em consequência disso, tem-se o aumento da taxa de aquecimento da camada superficial da água (SATHYENDRANATH et al., 1991 e NAKAMOTO et al., 2000). Adicionalmente, Ma et al. (2014) afirmam que a variação da temperatura de superfície da água no mar da Arábia nos períodos de inverno (dezembro a março) e verão (maio a setembro) também recebe influência dos processos metabólicos de mistura e ressurgência.

No estudo de Wang e Tang (2014) constatou-se a partir de imagens MODIS que as temperaturas diurnas da superfície da água do mar Amarelo, na China, aumentaram entre 1 e 4 °C durante episódios expressivos de floração da *U. Prolifera*, período do verão. Nota-se no Quadro 4 que em 3 de junho, a temperatura da água na região da floração atingiu até 4°C superiores à região de entorno. Em 15 de julho, a temperatura no local da floração foi superior até 2°C em relação a temperatura da área circundante, valores menores que os registrados na data de 3 de junho de 2009, mas ainda assim, temperaturas mais altas nas áreas das florações. Além disso, verificou-se concentrações mais altas de *chl* nestas áreas, coincidindo com o aumento anômalo da temperatura de superfície da água no local das florações.

Quadro 4 – Impacto termal na superfície da água durante eventos de florações de algas

Data da imagem	Área coberta (Km ²)	Área impactada (Km ²)	Aumento (°C)
03-07-2008	500	16.000	1-2
03-06-2009	42	6.550	3-4
15-07-2009	40	7.000	1-2
18-06-2010	350	12.400	2-3

Fonte: Informações adaptadas de Wang e Tang (2014)

Aumentos na concentração da biomassa durante as florações de algas podem impulsionar uma maior absorção de radiação da água e, portanto, promover aumento da taxa de aquecimento da água, a exemplo desta floração de *U. prolifera* na superfície do mar Amarelo (WANG e TANG, 2014). Todavia, os efeitos dependem também da distribuição e tamanho da floração. As algas menores apresentam maior absorção e dispersão por unidade de massa em relação às algas maiores que têm sua área de superfície por unidade de massa maior (MAZUMDER et al., 1990). Assim, a temperatura de superfície da água nos locais de florações pode variar de acordo com a diversidade das espécies de algas (WANG e TANG, 2010).

Inseridos neste contexto, observações remotas da temperatura radiante da superfície da água permitem identificar e avaliar a ocorrência de fenômenos anômalos e seus efeitos no meio aquático. Em episódios de florações de algas, conclui-se que a concentração de *chl-a* é um dos

elementos principais que afetam a variação da temperatura de superfície da água no local das florações das algas (WANG e TANG, 2014 e WANG e TANG, 2010). Desse modo, imagens de satélite derivadas da região do infravermelho termal podem proporcionar uma interpretação do contexto e padrões espaço-temporais da condição térmica da água durante a ocorrência de episódios de florações de algas.

2.3 PROCEDIMENTOS TÉCNICO-OPERACIONAIS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Ao longo de anos métodos têm sido desenvolvidos para investigar e produzir informações a partir de produtos do sensoriamento remoto, resultando em mapas temáticos ou gráficos, a fim de gerar estimativas relacionados aos alvos da superfície. Dentre estes métodos, o uso de algoritmos é cada vez mais comum e vêm se aperfeiçoando de acordo com as necessidades do que se pretende investigar. Nesse sentido e diante das interferências que acometem a geração das estimativas da temperatura de superfície Ndossi e Avdan (2016) desenvolveram um *plugin* no *QGIS* com o objetivo de facilitar a produção de mapas de temperatura da superfície terrestre (LST). Este *plugin* experimental *Land Surface Temperature Estimation* por meio da *Planck Equation* gera estimativas a partir de imagens Landsat 5 TM, Landsat 7 imagens ETM + e Landsat 8 (*TIRS*), com a correção da emissividade, por exemplo. Um estudo inicial nesse *plugin* desenvolvido pelos autores mostrou resultados satisfatórios. Ademais, sugerem novas pesquisas a fim de contribuir para o aprimoramento dos resultados com respaldo nos dados de entrada.

Paralelamente a esta análise, os algoritmos empíricos buscam estabelecer relações estatísticas entre a resposta térmica da superfície da água via sensoriamento remoto (no caso deste estudo) e sua correspondente *in situ*, normalmente realizadas por regressões lineares simples (CALLEGARI-JAQUES, 2003; ANDY, 2009). Amostras *in situ* do alvo analisado são requeridas simultaneamente ou mais próximas do momento em que o sensor adquire as imagens de satélite, a fim de estabelecer relações mais precisas. A partir disso, o modelo gerado permite extrapolar as estimativas em áreas não mensuradas (GUJARATI, 2011), de forma contínua. Assim, uma vez validado tal modelo, grandes massas d'água são monitoradas considerando as características inerentes à unidade de estudo e propiciando assertivas mais precisas sobre os fenômenos geográficos observados.

2.3.1 Geração de estimativas da temperatura de superfície da água

O método conhecido como *Planck Equation* (Equação 02) considera imagens em temperatura de brilho e de emissividade como dados de entrada. As imagens de emissividade (com dados de entrada do sensor OLI, Landsat, bandas 2 a 7 em valores de reflectância) são constituídas a partir de imagens NDVI (bandas 5 e 4) (Equação 03), ambas processadas na ferramenta *Land Surface Emissivity* presente no *LST* (VAN de GRIEND e OWE, 1993; VALOR e CASELES, 1996; ZHANG, WANG e LI, 2006, Tabela 01).

$$T_s = \frac{T_b}{1 + \left(\frac{\lambda T_b}{a}\right) \ln \epsilon} \quad (02)$$

Onde:

T_b = temperatura de brilho ou aparente registrada pelo sensor em Kelvin;

λ = comprimento de onda médio do infravermelho termal;

$a = hc/K = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m K}$, onde:

K = constante de Stefan-Boltzman ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)

h = constante de Planck ($6.28 \times 10^{-34} \text{ J/s}$)

c = velocidade da luz ($2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$)

$\ln \epsilon$ = logaritmo natural da emissividade da superfície.

$$NDVI = \frac{\rho_{ivp} - \rho_v}{\rho_{ivp} + \rho_v} \quad (03)$$

Onde:

ρ_{ivp} = reflectância no infravermelho próximo;

ρ_v = reflectância no vermelho;

Tabela 1 - Algoritmo para cálculo de emissividade baseado no NDVI

Valores NDVI	Valores Emissividade
$NDVI < -0.185$	0.995
$-0.185 \leq NDVI < 0.157$	0.985
$0.157 \leq NDVI \leq 0.727$	$1.009 + 0.047 \times \ln(NDVI)$
$NDVI > 0.727$	0.990

Fonte: Adaptado de Ndossi e Avdan (2016).

2.3.2 Geração de modelo de regressão linear

A geração de estimativas a partir de um conjunto de amostras pode ser modelada estatisticamente, sob determinadas suposições e hipóteses. Para a suposição de distribuição normal de um conjunto de dados pode ser utilizado o teste *Kolmogorov – Smirnov*, o qual observa a diferença máxima entre a função de distribuição acumulada, a normal e a função de distribuição empírica dos valores, dado um valor crítico e o nível de significância adotado (CALLEGARI-JAQUES, 2003; ANDY, 2009; GUJARATI, 2011). Nesse estudo, o nível de significância escolhido de 0,05 indica que para que a normalidade dos dados da temperatura de superfície da água seja confirmada o valor de D_n calculado foi inferior ao valor crítico tabelado e o *p-valor* > 0,05. A equação 04 expressa a estatística do D_n :

$$D_n = \sup|F(x) - F_n(x)| \quad (04)$$

Onde:

D_n = teste de Komolgorov-Smirnov

$F(x)$ = representa a função de distribuição acumulada dos dados;

$F_n(X)$ = função de distribuição acumulada empírica dos dados.

Em síntese, seguem as hipóteses:

H0: $F_x = F$ - Os dados seguem uma distribuição normal

H1: $F_x \neq F$ - a distribuição normal dos dados é refutada.

No modelo de regressão linear é possível estudar a relação entre variáveis dependente (y) e independente (x), por meio de abordagens empíricas. Nesse sentido, dado um modelo e um conjunto de dados inerente a variável resposta (x), será possível calcular estimativas para a variável dependente (y) (CALLEGARI-JAQUES, 2003). Assim, a presente pesquisa gerou modelos de regressão linear simples entre dados de temperatura de superfície da água registrados em campo e nas imagens de satélite Landsat 8, a fim de estimar a temperatura de superfície da água no eixo central do reservatório e de seus compartimentos aquáticos. A equação (05) desta regressão linear gerada é expressa da seguinte forma:

$$y = a + bx \quad (05)$$

Onde:

y = variável dependente (neste estudo, valores de TSA_i);

a = coeficiente linear;

b = coeficiente angular;

x = variável independente (neste estudo, valores de TSAs).

O cálculo dos coeficientes é realizado a partir do Método dos Mínimos Quadrados, com a geração de uma reta baseada nas menores distâncias, ao quadrado, entre os valores observados e a reta. Outro aspecto relevante levado em conta é a análise dos resíduos desta regressão (distribuição normal e homocedasticidade). Além disso, para um modelo de regressão ser considerado satisfatório, a análise gráfica (resíduos x valores ajustados) deve apresentar seus resíduos próximos a zero, aleatoriamente (CALLEGARI-JAQUES, 2003; LEVINE et al, 2005).

Ainda, é preciso que a variância destes resíduos seja constante para observações diferentes, ou seja, que os resíduos cumprem a suposição de homocedasticidade, garantindo uma inferência estatística adequada. Para tal, utiliza-se o teste de *Breuch-Pagan*, quando a hipótese nula apresenta igualdade para a variância dos erros e a hipótese alternativa apresenta diferenças na variância desses erros para observações distintas (CALLEGARI-JAQUES, 2003; LEVINE et al, 2005).

2.3.2.1 Validação do modelo de regressão linear

A fim de avaliar estatisticamente o desempenho do modelo, o conjunto de amostras de validação pode ser submetido a testes de comparação entre o estimado e observado mediante os seguintes indicadores: coeficiente de correlação (r); coeficiente de determinação (r²); índice de Willmott (d); coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE); erro médio absoluto (EMA) e raiz do erro médio quadrático (REMQ).

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas. E quanto mais próximos de 1, melhor o desempenho de correlação das variáveis (LEVINE et al, 2005).

O índice de *Willmott (d)* indica o grau de concordância do modelo (WILLMOTT et al, 1985) com valores que variam de zero a 1, para nenhuma concordância e concordância perfeita, respectivamente. Valores de d acima de 0,75 são considerados satisfatórios (Equação 06).

$$d = 1 - \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2} \quad (06)$$

Onde:

d = é o índice de concordância de *Willmott*;

P_i = valores estimados;

O_i = valores observados;

O = média dos valores observados.

O coeficiente de *Nash e Sutcliffe (NSE)* (NASH e SUTCLIFFE, 1970) é um critério estatístico importante para avaliar a precisão de modelos (MACHADO, VETTORAZZI, CRUCIANI, 2003). Quanto mais próximo do 1, melhor o modelo (Equação 07).

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum(Y_m - Y_c)^2}{\sum(Y_m - \bar{Y}_m)^2} \right] \quad (07)$$

Onde:

NSE = coeficiente de *Nash e Sutcliffe*;

Y_m = valor medido;

Y_c = valor calculado;

\bar{Y}_m = média dos valores medidos.

O erro médio absoluto (EMA) é definido como sendo a diferença entre a previsão e a observação, dividida pelo número de observações. Quando uma previsão for perfeita o EMA será igual a zero (Equação 08) (LEVINE et al, 2005).

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X'_i - X_i| \quad (08)$$

Onde:

EMA = erro médio absoluto;

X_i = dados observados;

X'_i = dados estimados;

N = número pares de pontos utilizados.

A raiz do erro médio quadrático (REMQ) indica o grau de similaridade entre os dados medidos e os estimados usando os modelos, sendo o valor ideal igual a zero (Equação 09) (CALLEGARI-JAQUES, 2003; LEVINE et al, 2005).

$$\text{REMQ} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X'_i - X_i]^2} \quad (09)$$

REMQ = raiz do erro médio quadrático;

X_i = dados observados;

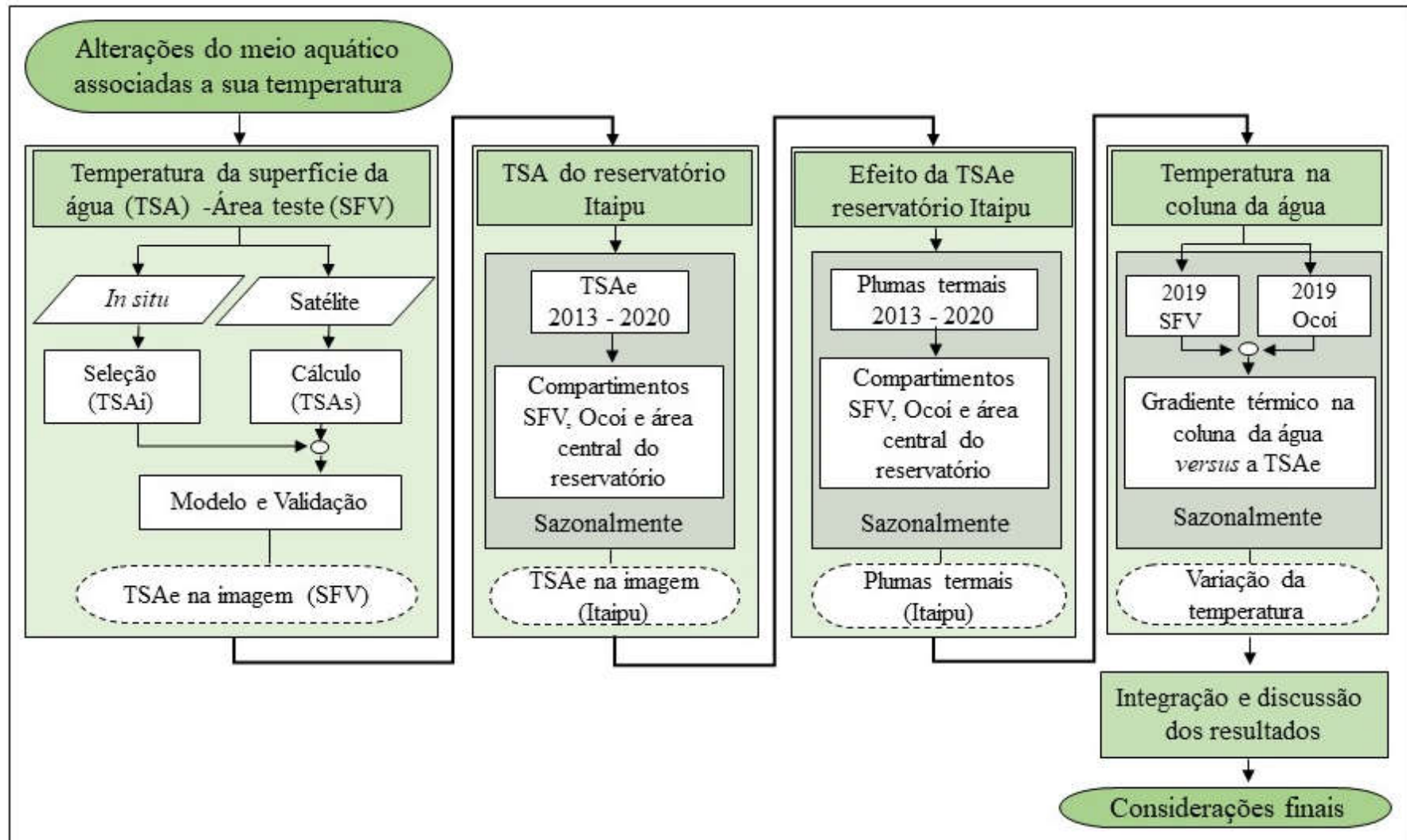
X'_i = dados estimados;

N = número pares de pontos utilizados.

3 METODOLOGIA

A compreensão das alterações no metabolismo do meio aquático associados à sua temperatura requer um conjunto de informações em um contexto dinâmico. Para estabelecer tal contexto, reuniu-se as seguintes informações: 1) temperatura da superfície da água no compartimento aquático SFV registradas em missões *in situ* (TSAi) e imagens de satélite (TSAs) para gerar e validar um modelo matemático de estimativas de temperatura de superfície da água (TSAe); 2) identificação da TSAe em compartimentos aquáticos (SFV e Ocoí) e na área central do reservatório de Itaipu, entre 2013 e 2020; e 3) ocorrência de plumas termais identificada nas imagens de satélite (Figura 7).

Figura 7 – Fluxograma das etapas da pesquisa



3.1 TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DA ÁGUA NA ÁREA TESTE DO COMPARTIMENTO AQUÁTICO SÃO FRANCISCO VERDADEIRO (SFV)

Os valores da TSAi foram registrados entre os períodos de 2015 e 2017 durante o desenvolvimento de um projeto entre a Usina Itaipu Binacional e o Labgeotec (Laboratório de Geotecnologia - Universidade Federal de Santa Maria). Os valores da TSAe obtidos a partir de imagens do satélite Landsat 8 (TSAs), sensores OLI e TIR foram calculados em resolução espacial de 30m, entre os períodos de 2015 e 2017. Ainda, o compartimento aquático SFV, em todos os seus locais de amostragens, apresentou na imagem área mínima de 3 pixels puros, premissa fundamental para recuperar a TSAe sem a influência do entorno terrestre da planície de inundação, conforme ressaltam os autores Handcock et al (2006) e Wawrzyniak, Piegay e Poirel (2011).

3.1.1 Temperatura de superfície da água *in situ*

O registro da TSAi no compartimento aquático SFV ocorreu por meio do verificador de qualidade da água multiparâmetros da série U-50, empresa *HORIBA Advanced Techno*. No Quadro 5, seguem as especificações técnicas do equipamento:

Quadro 5 – Características do verificador da temperatura da água

Atributo de especificação	Valor da especificação
Princípio de medição	método termistor
Alcance	-10 a 55 ° C
Resolução	0.01 ° C
Repetibilidade	± 0,10 ° C (no ponto de calibração)
Precisão	sensor JIS para termômetro de platina classe B (± 0,3 + 0,005 t)

Fonte: Horiba (2020).

Para o registro da temperatura de superfície da água *in situ*, o termômetro foi imerso na água até 0,5m de profundidade, pois diferenças entre as temperaturas da superfície (chamada de *skin temperature*, próximo dos 100m superiores) e de profundidade (próximo de 0,5 m de profundidade) é mínima entre o intervalo das 09h:00min e 11h:00min.

A correlação entre os registros da TSAi e TSAs apresenta melhor desempenho quanto menor for a diferença temporal durante a aquisição de ambos os dados, principalmente no período de verão (HANDCOCK et al, 2012; LING et al, 2017). Diante dessa certeza, foi realizada uma investigação nos dados da TSAi para selecionar o intervalo de registros que apresentou melhor desempenho com os dados do satélite, levando em consideração o horário

de aquisição da imagem (10h35min, aproximadamente). Além disso, a seleção desse intervalo de tempo foi um critério importante para se obter a normalização estatística dos dados das temperaturas e proporcionar a aplicação da correlação e teste de hipóteses para dados paramétricos.

Para esta investigação os dados da TSAi foram organizados em quatro grupos, de acordo com os seus intervalos de registro, a saber: 08h58min e 11h00min, 08h58min e 12h00min, 08h58min e 13h00min e, por fim, 08h45min e 15h35min. Conjuntamente, as missões de campo com problemas na coleta dos dados ou na qualidade das imagens de satélite foram descartadas.

O resultado desta seleção foi submetido a análise estatística exploratória no *Action 3.3.2*, suplemento instalado no excel, para identificar o melhor intervalo de tempo de coleta e normalidade dos dados no contexto da área teste do compartimento aquático SFV.

3.1.2 Temperatura de superfície da água estimada nas imagens do satélite Landsat 8

As cenas do satélite Landsat 8, sensores *OLI* e *TIR*, órbita/ponto 077/224 foram adquiridas no site do *United States Geological Survey* (USGS), reprojatadas para Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 21, hemisfério Sul, datum WGS84.

Para o cálculo da TSAe em °C foi empregado o método *Planck Equation* presente no complemento *Land Surface Temperature (LST)* desenvolvido por Ndossi e Avdan (2016) disponível no *software QGIS 2.14*. Esse método considera valores de emissividade para correção a partir dos dados de NDVI (VAN de GRIEND e OWE, 1993; VALOR e CASELES, 1996; ZHANG, WANG e LI, 2006).

Para a geração do NDVI foram processadas as bandas 5 (intervalos espectrais 0.85-0.88 μm) e 4 (intervalos espectrais 0.64-0.67 μm), em reflectância de superfície, sensor *OLI*, na ferramenta *Band Math* do *Envi 5.5*. No complemento *Land Surface Temperature (LST)* o cálculo da emissividade foi realizado a partir dos resultados de NDVI. Ulteriormente, as imagens de emissividade e temperatura de brilho (banda 10, intervalos espectrais 10.6-11.19 μm) resultaram em imagens da temperatura de superfície em °C (TRINDADE, P. M. T.; SALDANHA, D. L.; PEREIRA FILHO, 2017).

Assim, a TSAe foi identificada em cada ponto amostral correspondente às coletas *in situ* e para a mesma data. O resultado desse processo foi submetido a análise estatística exploratória no *Action 3.3.2* e revelou o contexto de variação da TSAe na área teste do compartimento aquático SFV.

3.1.3 Geração do modelo matemático e validação das informações da TSA

Para verificar o desempenho entre TSA_i e TSA_s foram testadas inicialmente suposições estatísticas a fim de identificar a distribuição de normalidade, erros ou diferenças dos dados e definir o melhor método para a avaliação das informações.

Para testar a distribuição da normalidade da TSA_i, TSA_s e dos resíduos foram utilizados os testes *Kolmogorov – Smirnov*, *Anderson-Darling* e *Shapiro-Wilk*, que observaram as diferenças máximas entre as funções de distribuição acumulada, dado valores críticos e nível de significância empregados (CALLEGARI-JAQUES, 2003; ANDY, 2009; GUJARATI, 2011).

Dada a análise de distribuição dos dados, o modelo matemático foi gerado em 60% das amostras resultantes da seleção dos dados, de forma pareada (TSA_i versus TSA_s) e aleatória (por meio de um sorteio), evitando-se com isso a indução de um modelo com resultados tendenciosos. Sequencialmente a validação do modelo foi realizada empregando-se dados que compõem os outros 40% do sorteio das amostras.

Para avaliar estatisticamente o desempenho e concordância do modelo, o conjunto de amostras da validação foi submetida a testes de comparação entre a TSA_i e TSA_e mediante os seguintes indicadores: coeficiente de correlação (r); coeficiente de determinação (r^2); índice de *Willmott* (d); coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NSE); erro médio absoluto (EMA) e raiz do erro médio quadrático (REMQ).

3.2 ESPACIALIZAÇÃO SAZONAL DA TSA_e NO RESERVATÓRIO DE ITAIPU E SEUS COMPARTIMENTOS AQUÁTICOS SFV E OCOÍ

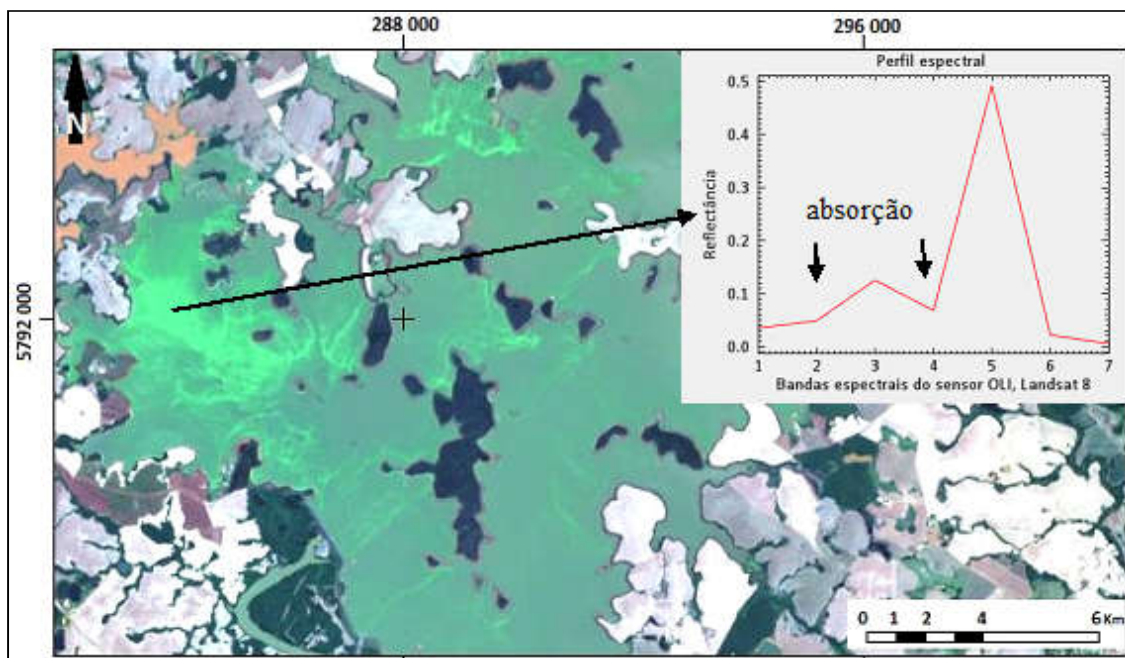
A espacialização da TSA_e a partir do modelo matemático, o qual implementou-se por meio da ferramenta “band math” nas imagens de satélite Landsat 8 disponíveis, foi extrapolada para o reservatório e seus compartimentos aquáticos SFV e Ocoí entre 2013 e 2020. Mapas desenvolvidos no software *ArqGis 10.5* identificaram o regime térmico para as estações do ano (outono, inverno, primavera e verão) nos compartimentos aquáticos São Francisco Verdadeiro, Ocoí e na área central do reservatório de Itaipu. Para apresentar as informações nos mapas utilizou-se os valores médios máximo e mínimo da TSA_e de cada estação, espacializando-os a partir do “stretch values along a color ramp” presente em “layer Properties” do *ArqGis 10.5*. Esta avaliação espaço-temporal proporcionou a avaliação das informações da temperatura num contexto mais amplo do reservatório, importante para traçar assertivas mais precisas sobre o impacto na sua dinâmica metabólica.

3.3 EFEITO DA TSAe NO RESERVATÓRIO DE ITAIPU

A identificação de diferenças na temperatura de superfície da água, presentes nos dados de uma mesma cena Landsat, pode revelar informações valiosas sobre o regime térmico e processos metabólicos de compartimentos aquáticos (LING et al., 2017). Nesse sentido, a fim de estabelecer relações entre o efeito da temperatura da água e os processos metabólicos, buscou-se investigar, inicialmente, a ocorrência espacial de fenômenos anômalos definidos por plumas termais nos compartimentos São Francisco Verdadeiro e Ocoí e área central do reservatório, entre 2013 e 2020.

A identificação destes fenômenos anômalos realizou-se de forma visual nos espectros de reflectância das imagens Landsat 8 para as bandas 2, 3, 4 e 5. Este procedimento seguiu duas etapas: 1) Construção em uma composição cor verdadeira (RGB-432) para a identificação dos locais com potenciais florações em função da cor e forma (plumas); 2) Análise dos espectros de reflectância, nesta etapa, considerou-se florações quando as absorções de radiação na região do azul (sensor *OLI*, banda 2) e do vermelho (sensor *OLI*, banda 4) eram menores do que a do verde (sensor *OLI*, banda 3), na faixa do visível, e a reflectância no infravermelho próximo (sensor *OLI*, banda 5) maior do que a faixa do visível. Além disso, trabalhos de campo nas áreas de estudo confirmaram as evidências de que as plumas termais observadas nas imagens de satélite se tratavam de ocorrência de florações algais. De acordo com Jensen (2009) e Barbosa, Novo e Martins (2019) a maior absorção de radiação na região do azul (sensor *OLI*, banda 2) e do vermelho (sensor *OLI*, banda 4) e maior reflexão no infravermelho próximo (sensor *OLI*, banda 5) é um indicador de alta concentração de pigmentos fotossintéticos de *Chl-a*, conseqüentemente, presença de organismos fitoplanctônicos (Figura 8).

Figura 8- Reflectância espectral de plumas de organismos fitoplanctônicos



Fonte: Imagem do satélite Landsat 8, sensor *Operational Land Imager (OLI)*, RGB-432, reservatório Passo Real-RS, disponível em *United States Geological Survey (USGS)*, 2020). Reflectância de superfície da imagem processada no software *Environment for Visualizing Images (Envi 5.5)*, extraída de Kramer et al. (2020).

Posteriormente, a ocorrência de fenômenos anômalos revelados nas imagens do sensor *OLI* entre 2013 a 2020 foi associada: a) com o respectivo efeito termal nas imagens do sensor *TIR* e b) análise temporal (2013-2020) de dados de temperatura do ar (INMET, 2020); c) variação da temperatura na coluna da água nos compartimentos aquáticos (adquiridas nas estações automáticas Diatomacea, no SFV e Espirogira, no Ocoí); e d) biodiversidade de fitoplâncton em imagens com florações. A análise desta biodiversidade foi realizada em 32 amostras em cada uma das datas: 25/03/2019 e 11/06/2019, as quais foram coletadas em 6 pontos amostrais de superfície entre às 10h20min e 13h20min, localizados no compartimento aquático Ocoí. Já no compartimento aquático SFV foram analisadas 31 amostras de superfície no total, coletadas na estação E8 do compartimento aquático, entre às 09h20min e 10h30min, nas datas 22/05/2014 e 09/08/2019 (Dados coletados pelo Instituto Ambiental do Paraná – IAPE e fornecidos pelo Núcleo de Inteligência Territorial do FPTI, 2020). A combinação destes dados proporcionou evidenciar os efeitos da variação temperatura de superfície da água e a ocorrência de eventos de florações para os períodos estudados.

A água exige maior quantidade de energia para aumentar a sua temperatura, logo, maior capacidade térmica que a vegetação e o solo. Assim, quando a concentração de clorofila na

água aumentar significativamente, a capacidade térmica da água será reduzida como resultado da menor quantidade de energia necessária para aumentar a sua temperatura (JENSEN, 2009). Partindo deste princípio, o estudo nesta fase da pesquisa identificou a amplitude térmica entre as temperaturas média e máxima nas imagens termais que revelaram a ocorrência de plumas termais caracterizadas por eventos de florações. Tais informações foram apresentadas em gráficos para cada compartimento a fim de observar as TSAe que destoaram da média geral dos valores. Ainda, aplicaram-se a correlação e Teste de hipótese (no *Action 3.3.2*) para identificar a média das diferenças da TSAe entre os locais com florações e àqueles com sua ausência. Conseqüentemente, identificou-se as tendências da recorrência de eventos de florações de algas no reservatório de Itaipu e seus compartimentos aquáticos a partir do efeito da variação da TSAe sobre o metabolismo aquático.

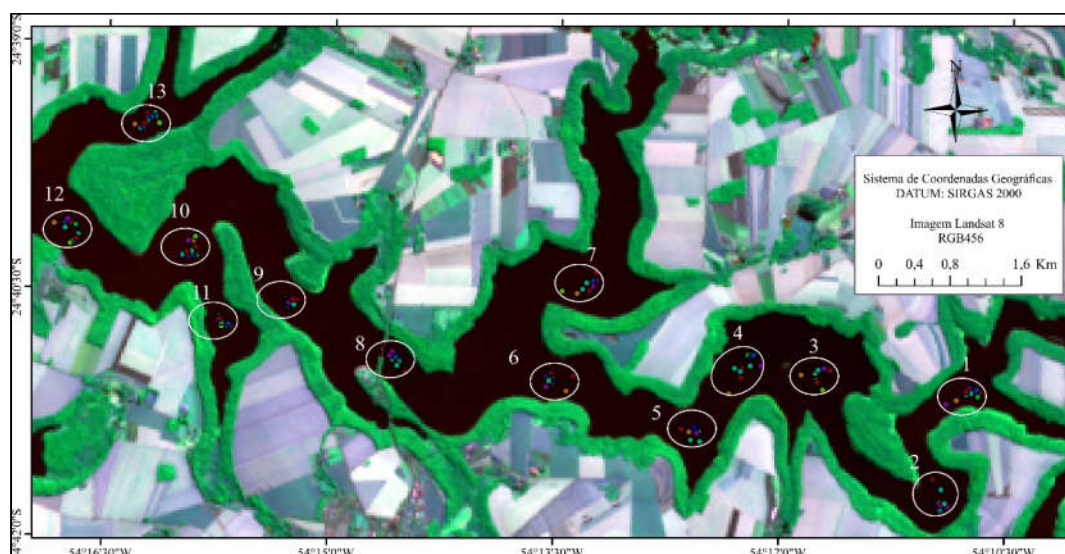
4 RESULTADOS

Normalmente técnicas tradicionais de registro *in situ* para o controle sazonal da temperatura da água em reservatórios apresentam limitações no espaço e no tempo, conseqüentemente, informações termais adquiridas remotamente é uma alternativa viável largamente utilizada por pesquisadores do mundo todo. Nesse sentido, a seção 4.1 detalha o resultado da metodologia utilizada para estimar a temperatura de superfície da água na área teste do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro (SFV), por meio da geração e validação de um modelo matemático a partir de dados da temperatura de superfície da água registrados *in situ* (TSAi) e em imagens de satélite (TSAs). Subseqüentemente, a seção 4.2 apresenta o resultado da implementação desse modelo matemático nas imagens termais e a identificação do padrão sazonal de variabilidade da TSAe (2013-2020) a partir da sua análise nos compartimentos aquáticos SFV e Ocoí e eixo central do reservatório de Itaipu. Ulteriormente, a seção 4.3 apresenta o efeito da TSAe na ocorrência de plumas termais de abrangência e localização geográfica distintas nas áreas de estudo e mostra evidências sobre a sua tendência espacial e sazonal de recorrência. Por fim, a seção 5 aborda a integração e discussão dos resultados, buscando entender o contexto geral do efeito das temperaturas no processo metabólico do reservatório de Itaipu.

4.1 TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DA ÁGUA NA ÁREA TESTE DO COMPARTIMENTO AQUÁTICO SÃO FRANCISCO VERDADEIRO (SFV)

Com base na metodologia e nos objetivos propostos neste estudo, o registro das temperaturas *in situ* no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro foi realizado em 13 missões de campo, com 13 pontos amostrais em cada missão, localizados equidistantemente. A área deste compartimento apresenta uma superfície hídrica de aproximadamente 22,5 km², largura mínima de 0,2 km, largura máxima 1 km e 18 km de extensão. A distribuição espacial dos pontos amostrais no compartimento é ilustrada na Figura 9. As datas e horários no Quadro 6.

Figura 9 – Cenário das coletas da TSAi no compartimento SFV



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Quadro 6 – Missões, datas e horários das coletas da TSAi

Missão	Data	Horário das coletas	
		Início	Fim
01	21/05/2015	08h58min	13h25min
02	22/06/2015	10h11min	13h54min
03	09/08/2015	09h37min	13h55min
04	17/02/2016	12h38min	15h35min
05	05/04/2016	09h30min	12h50min
06	08/06/2016	10h10min	13h50min
07	11/08/2016	09h45min	13h15min

08	27/08/2016	09h45min	13h35min
09	28/09/2016	09h48min	14h24min
10	30/10/2016	10h10min	14h35min
11	11/06/2017	10h05min	13h30min
12	13/07/2017	10h00min	13h50min
13	29/07/2017	10h15min	13h45min

O intervalo dos registros que apresentou melhor desempenho entre os dados de TSAi e TSAs foi o grupo de amostras coletadas entre 08h:58min e 11h:00min. No Quadro 7 é apresentado o resultado da seleção da TSAi e TSAs e suas respectivas missões, datas, horários, identificação da quantidade de amostras em cada missão e as amplitudes térmicas entre as médias da temperatura de superfície da água sobre o grupo amostral.

Quadro 7– Grupo amostral dos dados da temperatura de superfície da água no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro (SFV), reservatório de Itaipu

Missão	Data	Horário da TSAs	Horário médio da TSAi	Número de Amostras	Média da TSAs (°C)	Média da TSAi (°C)	Amplitude (TSAi-TSAs)
13	29/07/17	10h35min	10h38min	4	19,03	18,80	-0,23
11	11/06/17	10h35min	10h31min	5	17,92	19,17	1,25
10	30/10/16	10h35min	10h35min	4	22,49	22,23	-0,26
9	28/09/16	10h35min	10h28min	4	24,10	24,39	0,29
8	27/08/16	10h35min	10h25min	5	21,45	21,08	-0,37
7	11/08/16	10h35min	10h24min	5	19,28	19,24	-0,04
6	08/06/16	10h35min	10h33min	4	16,16	16,67	0,52
3	09/08/15	10h35min	10h34min	6	21,14	20,13	-1,02
Mínima		10h35min	10h24min	4	16,16	16,67	-1,02
Máxima		10h35min	10h38min	6	24,10	24,39	1,25
Média geral		10h35min	10h31min	5	20,20	20,21	0,02

Fonte: Registros dos valores de temperatura *in situ* compartimento SFV e em imagens de satélite *Landsat 8*; a análise estatística exploratória realizada no portal *Action 3.3.2*.

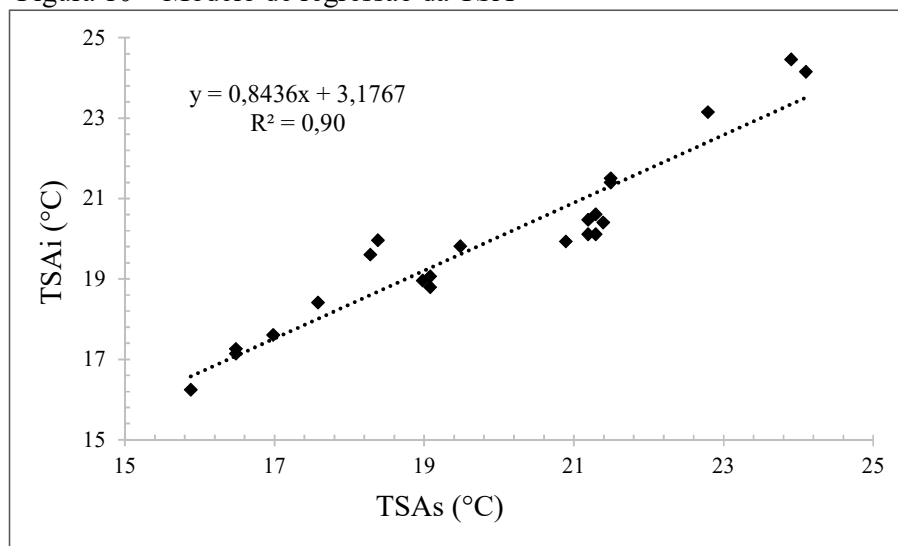
Dada a normalidade confirmada para os testes de *Anderson-Darling*, *Kolmogorov-Smirnov* e *Shapiro-Wilk* (com *p-valor* > 0,05), a correlação de *Pearson* foi estatisticamente significativa ($r=0,90$) e o teste-*t* pareado com *p-valor* 0,89 indicou a média das diferenças menor que zero (>0,02) a um nível de confiança de 95%. Além disso, o horário médio das coletas da TSAs e TSAi foram semelhantes (10h35min e 10h31min, respectivamente). As diferenças entre a TSAi e TSAs apresentaram dados superestimados em até -1,02°C, subestimados em até 1,25°C e desvio padrão das diferenças de até 0,76°C. As missões com

problemas nas coletas de campo, imagens de satélite com nuvens (acima de 10%) e vento forte (efeito *sunglint*) foram descartadas.

4.1.1 Geração e validação do modelo de regressão da TSAe

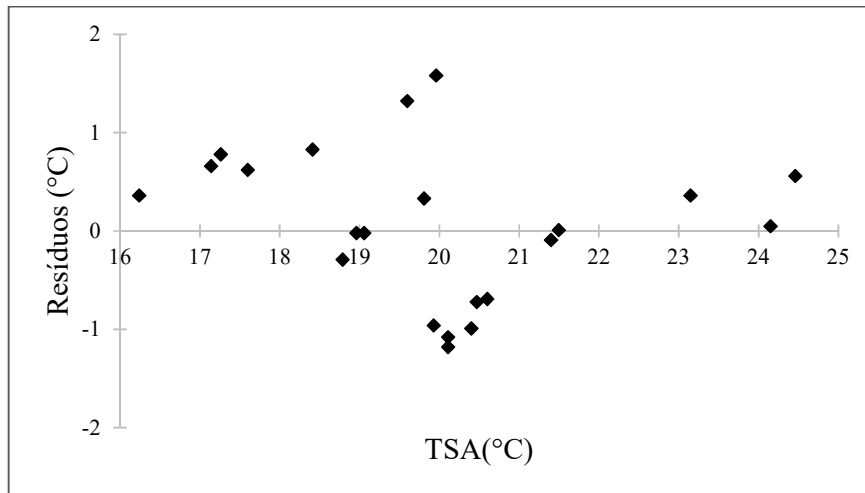
Para estimar o valor da temperatura de superfície da água de campo o modelo de regressão foi gerado e validado a partir dos dados do compartimento aquático SFV apresentados no Quadro 7. A geração do modelo sobre 60% desses dados, correspondentes a 22 amostras pareadas e aleatórias, indicou r^2 0,90 a um nível de confiança de 95% (Figura 10). Inclusive, os testes de normalidade *Anderson-Darling*, *Kolmogorov-Smirnov* e *Shapiro-Wilk* aplicados previamente sobre a TSAi, TSAs e resíduos apresentaram p -valor $> 0,05$, assumindo a suposição de distribuição normal. Nesse contexto, pode-se afirmar que o modelo apresentou um forte ajuste.

Figura 10 – Modelo de regressão da TSA



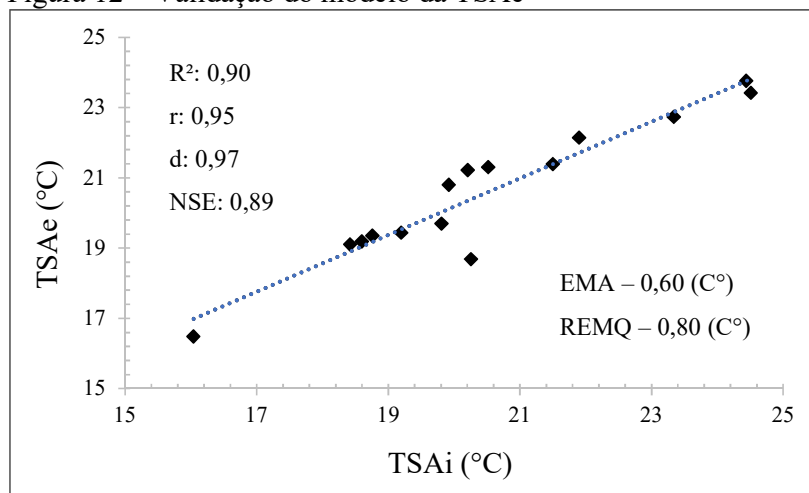
Sequencialmente gerou-se o gráfico dos resíduos dada a diferença entre a variável resposta observada e a variável estimada. Nesse sentido, não se observou variações dos resíduos em função da temperatura para o intervalo avaliado. Nota-se, ainda, que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente próximos do zero e entre -1,18 e 1,58. A maior parte das amostras dos resíduos (45,5%) concentra valores menores ou iguais a 0,5°C, 36,36% aponta valores entre 0,5°C e 1°C e 18,18% acima de 1°C (Figura 11).

Figura 11 – Dispersão entre os resíduos e a TSA no compartimento SFV



Para validar o modelo de regressão aplicou-se a equação nos outros 40% dos dados que somaram 15 amostras pareadas e aleatórias. Diante da estatística aplicada, obteve-se forte desempenho para o r (0,95) e r^2 (0,90). Em relação ao Índice de Willmott (d), o desempenho e concordância do modelo foi satisfatório ($d=0,97$). Para o NSE o desempenho e precisão do modelo foram consideráveis (0,89 está próximo de 1). Observar a Figura 12.

Figura 12 – Validação do modelo da TSAe



EMA e REMQ mostraram-se relativamente baixos (0,6 e 0,8 °C, respectivamente) com os resíduos distribuídos aleatoriamente próximos do zero e entre -1,18 e 1,58. Nesse sentido,

os valores de TSAe foram subestimadas em 40% e superestimadas em 60% das amostras (Figura 12).

4.2 ESPACIALIZAÇÃO SAZONAL DA TSAe NO RESERVATÓRIO DE ITAIPU

Durante a fase de identificação TSAe foram utilizadas 53 imagens de satélites Landsat 8 para a análise nos compartimentos SFV, Ocoí e área central do reservatório, distribuídas nas estações do ano: outono, inverno, primavera e verão. No período de outono ocorreu o maior número de imagens de satélite disponíveis para a análise (53), seguidos dos períodos de inverno (41), primavera (21) e verão (20). O compartimento aquático SFV apresentou, no total, o maior número de imagens de satélite com boa qualidade analisadas (51), seguidas do Ocoí (47) e reservatório (37), Quadro 8.

Quadro 8 – Número de imagens de satélite utilizadas na identificação da TSAe

Imagens de satélite				
Período	SFV	Ocoí	Reser.	Amostragem
Outono	18	19	16	53
Inverno	16	13	12	41
Primavera	8	8	5	21
Verão	9	7	4	20
Amostragem	51	47	37	135

4.2.1 Período de Outono

Com base no Quadro 9 é possível observar que as estimativas médias da temperatura de superfície da água no período de outono (2013-2020) apresentaram variação entre 17 e 28°C em 19 imagens de satélite analisadas. Na média geral da temperatura mínima os compartimentos aquáticos Ocoí e São Francisco Verdadeiro apresentaram valores médios aproximados (20,59°C e 20,40°C, respectivamente). O leito principal do reservatório de Itaipu apresentou a maior média mínima das temperaturas estimadas (21,12°C), com a menor temperatura da água registrada no dia 08/06/2016 (18,01°C).

O compartimento aquático Ocoí apresentou a maior estimativa média geral da temperatura máxima de superfície da água (23,02°C), atingindo sua temperatura máxima no dia 29/03/2019 com 28°C. Já no reservatório de Itaipu foi registrada a menor média geral da temperatura máxima, 22,13°C. Em relação a temperatura média máxima da superfície da água conclui-se que os valores são semelhantes entre as áreas analisadas (24,74-SFV, 24,47-Ocoí e

24,69-reservatório). Na média geral da temperatura média da superfície da água destaca-se o reservatório da Itaipu com uma diferença de até 0,5°C em relação aos compartimentos aquáticos Ocoí (21,21°C) e SFV (21,19°C).

Em relação ao desvio padrão, o maior grau de dispersão no conjunto de valores extraídos dos transectos foi registrado no dia 29/03/2019, compartimento aquático Ocoí, com valores da temperatura de superfície da água distantes da média até 1,01°C. Posteriormente o compartimento SFV com 0,70 °C e o reservatório de Itaipu, com apenas 0,53°C. Notou-se, no entanto, que os valores médios de desvio padrão registrados nas áreas de estudo foram relativamente baixos e demonstraram atenuada variabilidade térmica. Tal estabilidade é observada para todos os meses de outono, a exemplos: 20/03/2016 (0,09°C-SFV), 16/04/2020 (0,10°C-reservatório), 18/05/2014 (0,10°C-reservatório) e 19/06/2014 (0,10°C-Ocoí), (Quadro 9).

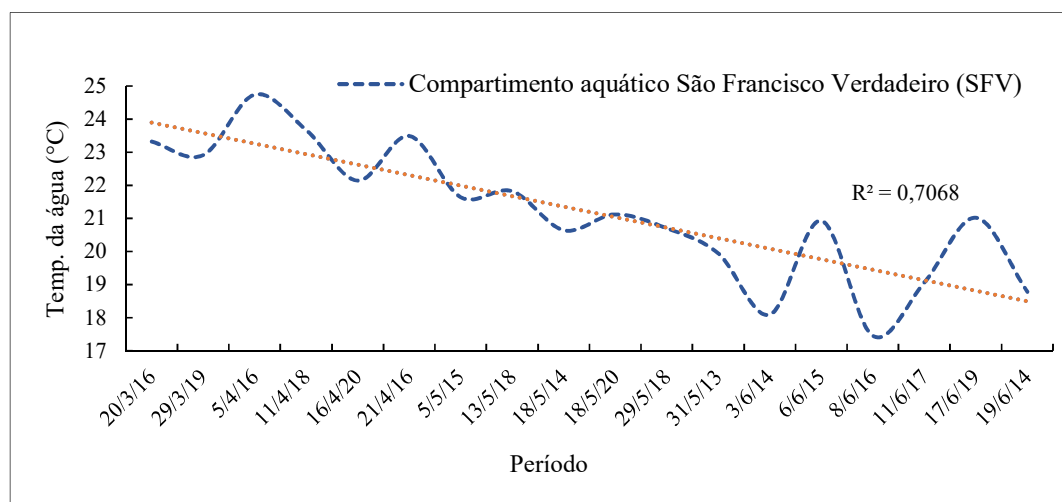
Quadro 9 – Estimativas da temperatura da água no período de Outono a partir de imagens Landsat, sensor TIR, banda 10, 2013-2020

Data	Compartimento aquático SFV					Compartimento aquático Ocoí					Reservatório de Itaipu (leito principal)				
	Mín. (°C)	Máx. (°C)	Ampl. (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Mín. (°C)	Máx. (°C)	Ampl. (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Mín. (°C)	Máx. (°C)	Ampl. (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)
20/03/16	23,09	23,68	0,59	23,32	0,09	22,32	23,17	0,85	22,69	0,14	22,07	23,34	1,27	22,73	0,30
29/03/19	22,66	23,68	1,02	22,91	0,15	22,49	28,00	5,51	23,35	1,01	22,24	23,09	0,85	22,65	0,18
05/04/16	24,35	25,21	0,86	24,74	0,16	24,10	24,86	0,76	24,47	0,14	23,68	24,69	1,01	24,21	0,23
11/04/18	22,49	24,10	1,61	23,67	0,25	23,51	24,70	1,19	23,93	0,11	23,34	24,10	0,76	23,71	0,16
16/04/20	21,39	22,58	1,19	22,14	0,26	21,48	24,79	3,31	22,13	0,3	22,15	22,75	0,60	22,49	0,10
21/04/16	23,17	23,76	0,59	23,49	0,10	22,83	23,68	0,85	23,12	0,12	22,83	23,76	0,93	23,34	0,18
05/05/15	20,29	25,23	4,94	21,64	0,50	21,39	22,66	1,27	22,12	0,33	21,65	22,92	1,27	22,55	0,24
13/05/18	20,80	22,49	1,69	21,82	0,37	21,90	23,09	1,19	22,55	0,26	21,99	23,17	1,18	22,73	0,25
18/05/14	19,87	25,39	5,52	20,64	0,70	19,79	20,79	1	20,17	0,12	20,04	20,72	0,68	20,43	0,10
18/05/20	20,55	25,20	4,65	21,12	0,28	20,63	21,65	1,02	21,22	0,25	20,89	21,82	0,93	21,48	0,22
29/05/18	19,79	21,06	1,27	20,70	0,24	20,55	21,56	1,01	21,18	0,23	20,21	21,56	1,35	21,01	0,37
31/05/13	19,11	24,46	5,35	19,94	0,53	19,70	24,47	4,77	20,17	0,40	*	*	*	*	*
03/06/14	17,25	20,49	3,24	18,09	0,41	17,59	19,70	2,11	18,77	0,55	18,35	20,04	1,69	19,39	0,53
03/06/20	*	*	*	*	*	17,67	19,26	1,59	18,44	0,39	*	*	*	*	*
06/06/15	19,87	21,48	1,61	20,93	0,28	20,89	25,60	4,71	21,26	0,25	20,29	21,22	0,93	20,87	0,22
08/06/16	16,41	18,27	1,86	17,45	0,53	17,17	21,56	4,39	18,22	0,43	18,01	18,77	0,76	18,46	0,14
11/06/17	17,42	20,13	2,71	19,06	0,65	18,52	23,40	4,88	19,52	0,45	19,87	20,55	0,68	20,31	0,11
17/06/19	20,46	25,27	4,81	21,02	0,27	20,46	25,66	5,2	21,21	0,52	20,29	21,56	1,27	20,83	0,21
19/06/14	18,18	19,03	0,85	18,78	0,14	18,18	18,86	0,68	18,56	0,10	*	*	*	*	*
Máxima	24,35	25,39	5,52	24,74	0,70	24,10	28,00	5,51	24,47	1,01	23,68	24,69	1,69	24,21	0,53
Mínima	16,41	18,27	0,59	17,45	0,09	17,17	18,86	0,68	18,22	0,10	18,01	18,77	0,60	18,46	0,10
Média geral	20,40	22,86	2,46	21,19	0,33	20,59	23,02	2,44	21,21	0,32	21,12	22,13	1,01	21,70	0,22

*Presença de nuvens na imagem de satélite

Com base ainda nos dados apresentados no Quadro 9 é possível observar a variação temporal da temperatura de superfície da água estimada pelo satélite (TSAe) entre 2013 e 2020, período de outono (18 imagens, Figura 13). Assim, notou-se maior aquecimento das águas entre os meses de março e abril e seu resfriamento a partir do mês de maio, em geral, com temperaturas da superfície menores para o mês de junho. Nesse sentido, a tendência das médias da TSAe indicou variações significativas, com valor de $r^2=0,70$. A imagem do dia 03/06/2020 foi descartada da análise por apresentar cobertura de nuvens na área de estudo de SFV.

Figura 13 – Variação temporal das médias TSAe no compartimento aquático SFV, período de Outono, 2013-2020

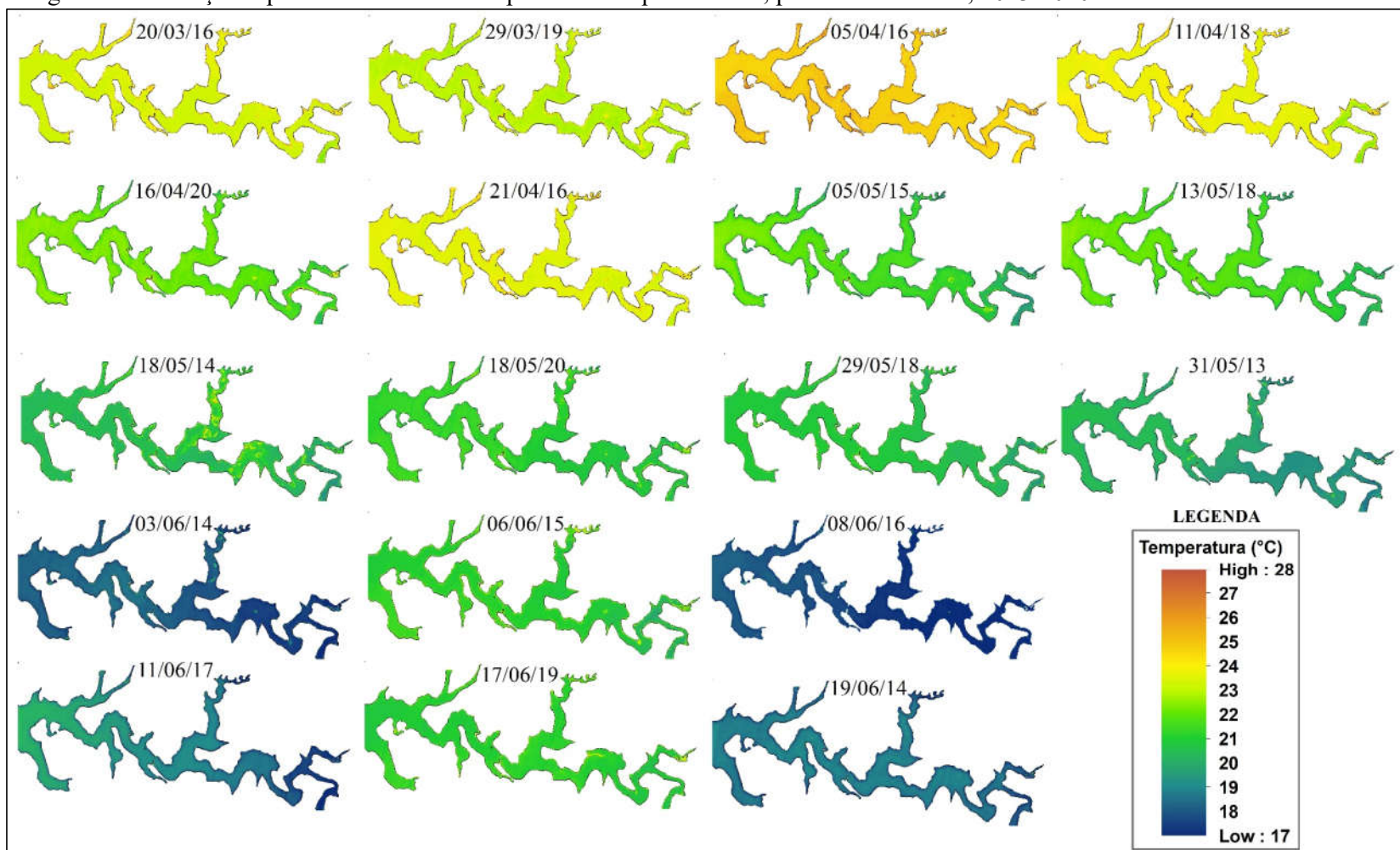


Observou-se que a variabilidade termal das águas no compartimento ocorreu de forma mais expressiva para as datas: 05/05/2015, com amplitude térmica de 4,94°C; 18/05/2014, com amplitude térmica de 5,52°C; 18/05/2020, com amplitude térmica de 4,65°C; 31/05/2013, com amplitude térmica de 5,35°C; 03/06/2014, com amplitude térmica de 3,24°C e 17/06/2019, com amplitude térmica de 4,81 °C. Porém, essa variação da amplitude é explicada pelo registro de plumas termais isoladas relacionadas a processos metabólicos do compartimento, as quais são responsáveis pela elevação da temperatura, sobressaindo-se sobre as temperaturas médias das águas registradas nessas datas. Nesse sentido, a amplitude térmica da temperatura superficial das águas para as datas supracitadas, em média 4,46°C, é expressiva devido a ocorrência de plumas termais de abrangência e localização geográfica distintas para cada data, logo, a

variação termal amostrada não representa o contexto geral do curso do compartimento aquático (Figura 13).

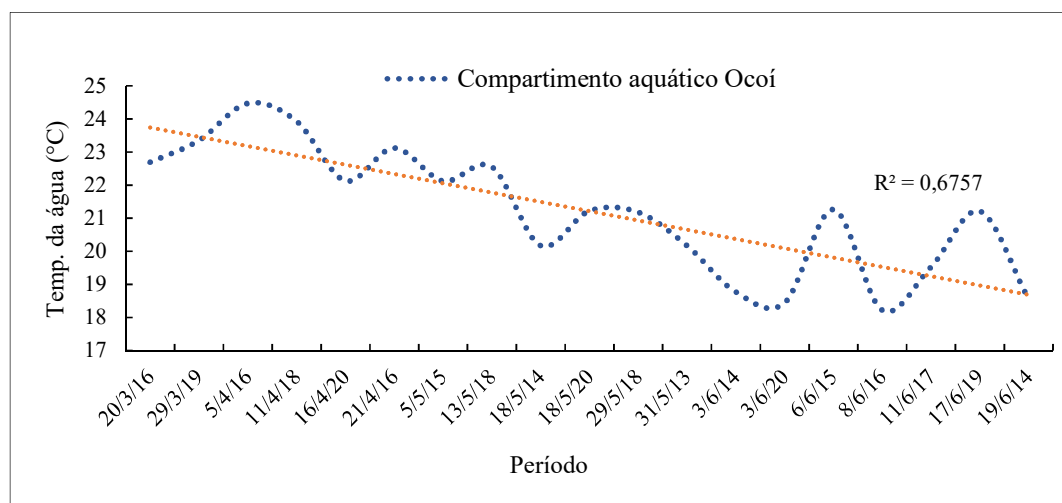
Ainda, identificou-se uma tendência no aumento da temperatura de superfície da água do setor leste para o setor oeste do compartimento aquático SFV, próximo à área do leito principal do reservatório de Itaipu. Tal constatação pode ser verificada com mais ênfase em algumas datas, a citar: 11/06/2017, com temperaturas mínima 17,42°C, máxima 20,13°C, logo, amplitude térmica de 2,71°C; 08/06/2016, com temperaturas mínima 16,41°C, máxima 18,27°C, logo, amplitude térmica de 1,86°C; e, 13/05/2018, com temperatura mínima 20,80°C, máxima 22,49°C, logo, amplitude térmica 1,69°C (Figura 14). Sobretudo, 61,12% dos períodos analisados apresentaram variabilidade térmica inferior a 2°C no compartimento aquático SFV.

Figura 14 - Variação espacial da TSAe no compartimento aquático SFV, período de Outono, 2013-2020



Em análise semelhante é possível observar a variação temporal de 2013 a 2020 da temperatura de superfície da água no Ocoí estimada pelo satélite (TSAe), analisadas em 19 imagens de satélite do período de outono (Figura 15). Assim, observou-se maior aquecimento das águas entre os meses de março e abril e seu resfriamento a partir do mês de maio, gradativamente, com menores temperaturas de superfície registradas em junho. Logo, a tendência das médias da TSAe apresentou variações significativas com $r^2=0,67$, ou seja, observa-se tendência de diminuir a TSA neste período.

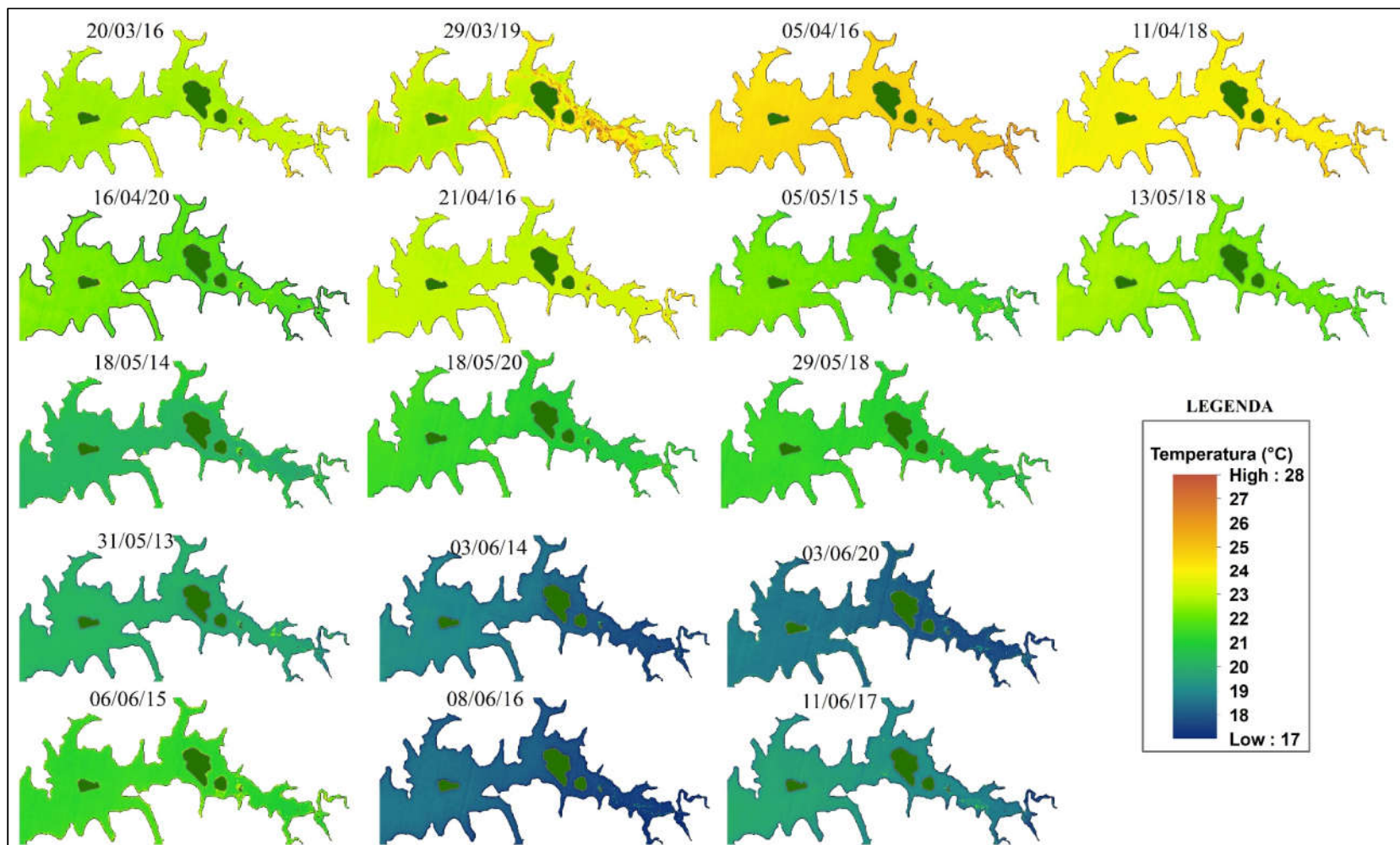
Figura 15 – Variação temporal das médias da TSAe no compartimento aquático Ocoí, período de Outono, 2013-2020



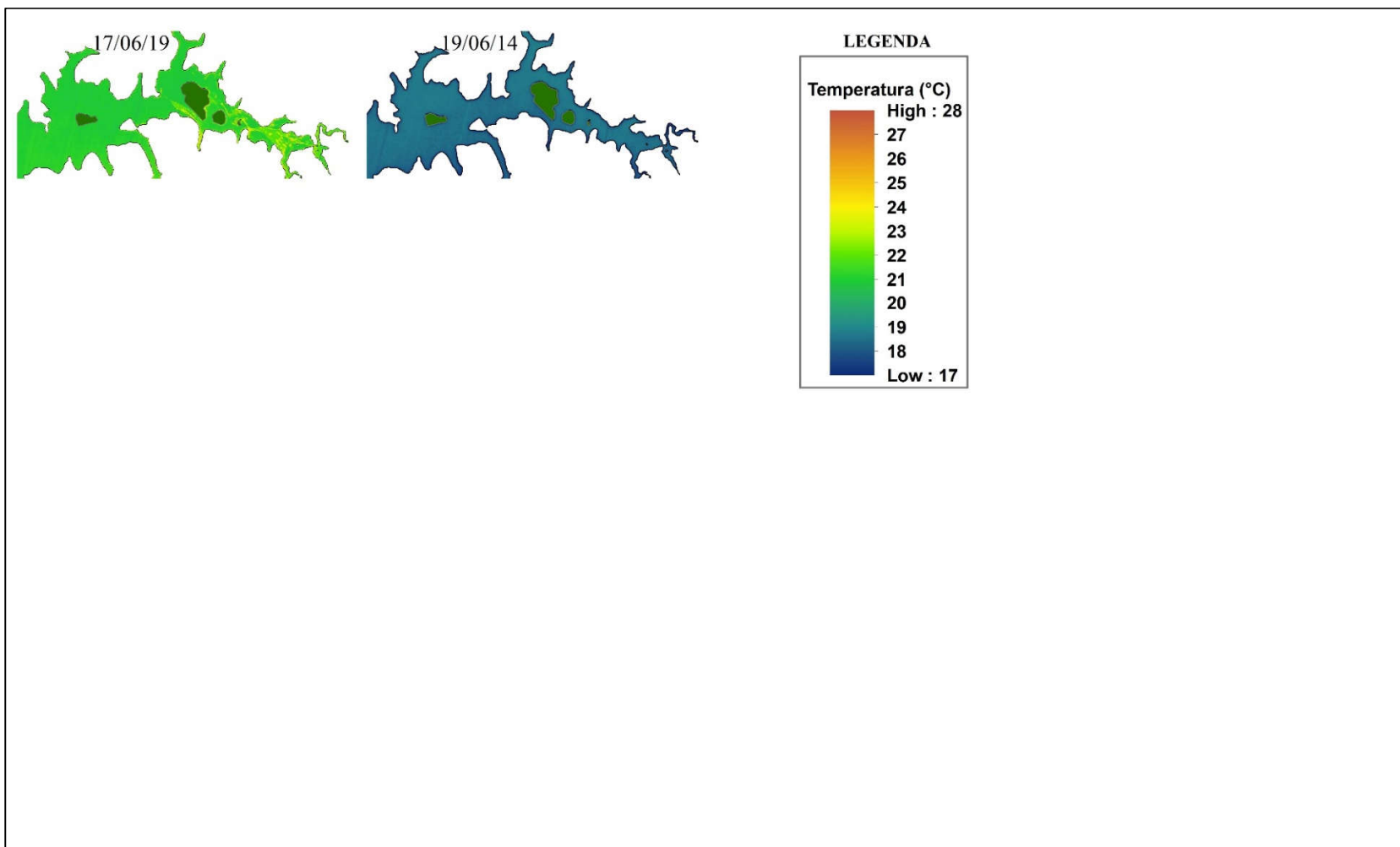
A variabilidade termal das águas do compartimento aquático Ocoí ocorreu de forma mais expressiva para as datas: 29/03/2019, com amplitude térmica de 5,51°C; 16/04/2020, com amplitude térmica de 3,31°C; 31/05/2013, com amplitude térmica de 4,77°C; 06/06/2015, com amplitude térmica de 4,71°C, 08/06/2016, com amplitude térmica de 4,39°C; 11/06/2017, com amplitude térmica de 4,88°C e 17/06/2019, com amplitude térmica de 5,2°C. Diante dessas amplitudes expressivas, em média 4,68°C, verificou-se novamente a ocorrência de plumas termais isoladas associadas a processos hidrodinâmicos e ecológicos do local e, conseqüentemente, a variabilidade termal amostrada na superfície da água não representa o contexto geral do curso do compartimento (Figura 16).

Além disso, verificou-se uma tendência no aumento da temperatura de superfície da água do setor leste para o setor oeste do compartimento aquático Ocoí, próximo à área do leito principal do reservatório de Itaipu. Essa tendência pode ser observada de forma mais evidente em algumas datas, a citar: 03/06/2014, com temperaturas mínima 17,59°C, máxima 19,70°C, logo, amplitude térmica de 2,11°C; 05/05/2015, com temperaturas mínima 21,39°C, máxima 22,66°C, logo, amplitude térmica de 1,27°C; e, 13/05/2018, com temperatura mínima 21,90°C, máxima 22,66°C, logo, amplitude térmica 1,19°C (Figura 16). Sobretudo, 42,10% dos períodos analisados apresentaram variabilidade térmica superior a 2°C no compartimento aquático Ocoí.

Figura 16 - Variação espacial da TSAe no compartimento aquático Ocoí, período de Outono, 2013-2020

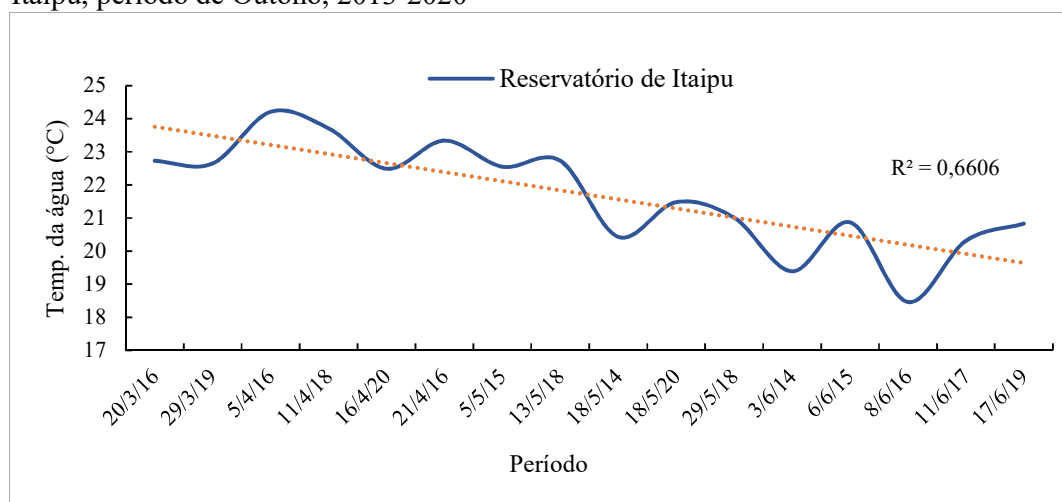


Continuação...



Em um contexto mais amplo é possível observar a variação temporal da temperatura de superfície da água estimada pelo satélite (TSAe) na área central do reservatório de Itaipu entre 2013 e 2020, período de outono (Figura 17). Assim, observou-se maior aquecimento das águas entre os meses de março e abril, resfriando-se gradativamente a partir do mês de maio, destacando temperaturas da superfície menores para o mês de junho. A tendência das médias da TSAe mostrou-se com variações significativas com valor de $r^2=0,66$. Portanto, observa-se uma tendência de diminuição da TSA neste período. Ao todo foram analisadas 16 imagens de satélite. Devido à presença de nuvens na área do reservatório para as datas 31/05/2013, 03/06/2020 e 19/06/2014, os valores de TSAe foram desconsiderados na análise.

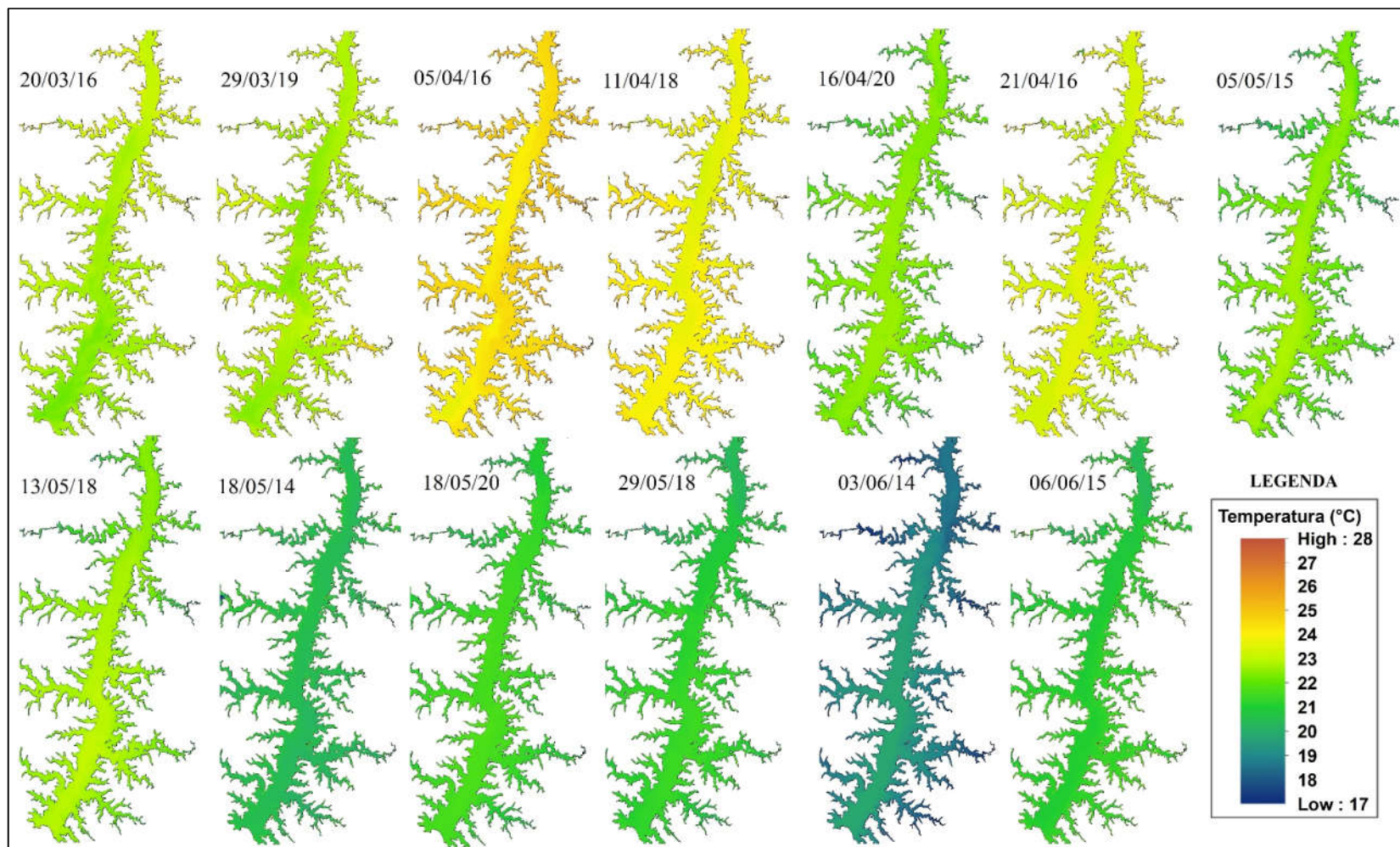
Figura 17 – Variação temporal das médias da TSAe na área central do reservatório de Itaipu, período de Outono, 2013-2020



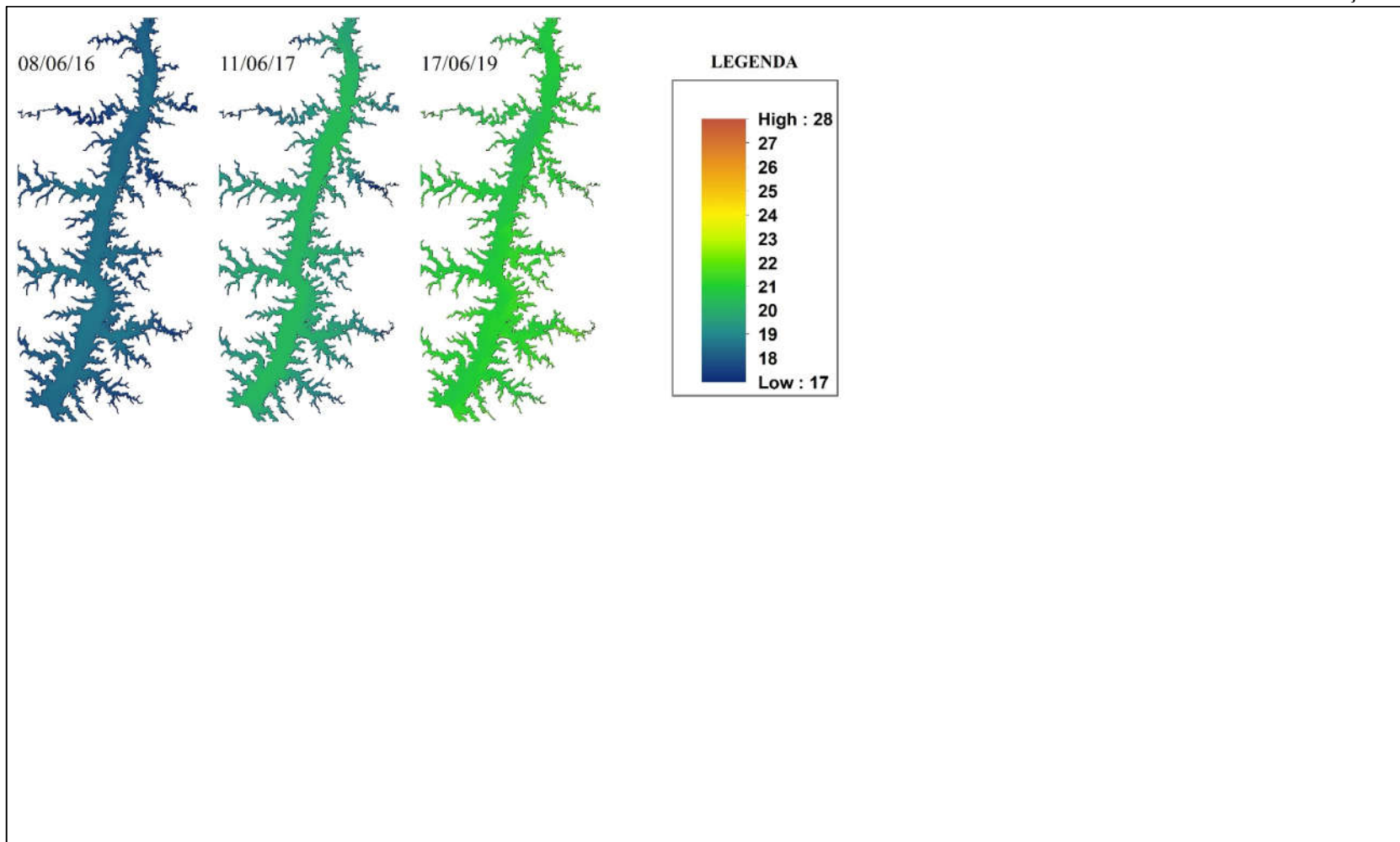
A variabilidade térmica das águas da área do reservatório de Itaipu foi inferior a 2°C para o período analisado. Não foram observadas amplitudes térmicas expressivas e relacionadas a ocorrência de plumas termais. Notou-se, no entanto, alguns períodos com diferenças na temperatura de superfície da água entre o setor montante e jusante do curso principal do reservatório e no deságue de compartimentos aquáticos, a saber: 03/06/2014, com temperaturas mínima $18,35^{\circ}\text{C}$, máxima $20,04^{\circ}\text{C}$, logo, amplitude térmica de $1,69^{\circ}\text{C}$; 29/05/2018, com temperaturas mínima $20,21^{\circ}\text{C}$, máxima $21,56^{\circ}\text{C}$, logo, amplitude térmica $1,35^{\circ}\text{C}$; e 05/05/2015, com temperaturas mínima $21,65^{\circ}\text{C}$, máxima $22,92^{\circ}\text{C}$, logo, amplitude térmica de

1,27°C. Sobretudo, identificou-se em média uma amplitude térmica de 1,02°C ao longo da área do reservatório de Itaipu (Figura 18). .

Figura 18 – Variação espacial da TSAe no reservatório de Itaipu, período de Outono, 2013-2020



Continuação...



4.2.2 Período de Inverno

Com base no Quadro 10 é possível observar que as estimativas médias da temperatura de superfície da água no período de inverno (2013-2020) apresentaram variação entre 17 e 26°C em 16 imagens de satélite analisadas. Na média geral da temperatura mínima os compartimentos aquáticos Ocoí e São Francisco Verdadeiro apresentaram valores médios aproximados (19,26°C e 19,25°C, respectivamente). A área central do reservatório de Itaipu apresentou a menor média mínima das temperaturas estimadas (18,85°C), com a menor temperatura da água registrada no dia 19/08/2013 (17,59°C).

O compartimento aquático Ocoí apresentou a maior estimativa média geral da temperatura máxima de superfície da água (22,34°C), atingindo temperaturas elevadas, por exemplo, em 22/08/2014 (26°C) e 06/08/2020 (25,66°C). Já no reservatório de Itaipu foi registrada a menor média geral da temperatura máxima, 19,87°C. Em relação a temperatura média de superfície da água para as datas analisadas conclui-se que os valores das médias máximas são semelhantes entre os compartimentos aquáticos e distintas do leito principal do reservatório (21,54-SFV, 21,38-Ocoí e 20,64-reservatório). Na média geral da temperatura média de superfície da água destacam-se os compartimentos aquáticos SFV e Ocoí com as maiores médias (19,91°C e 19,84, respectivamente), seguido da área central do reservatório da Itaipu (19,32°C).

Em relação ao desvio padrão, o maior grau de dispersão no conjunto de valores extraídos dos transectos foi registrado no dia 19/08/2013, compartimento aquático Ocoí, com valores da temperatura de superfície da água distantes da média até 0,95°C. Na média geral do desvio padrão o compartimento Ocoí se destacou também com 0,35°C, SFV com 0,27 e o reservatório de Itaipu com apenas 0,23°C. Notou-se, desse modo, que os valores médios de desvio padrão registrados nas áreas de estudo foram relativamente baixos e demonstraram atenuada variabilidade térmica. Tal estabilidade é observada em todos os meses do inverno, a exemplos: 06/08/2013 e 04/09/2013 (0,13°C e 0,24°C, respectivamente-SFV), 02/07/2013 (0,10°C-Ocoí) e 13/07/2017 (0,15°C-reservatório), (Quadro 10).

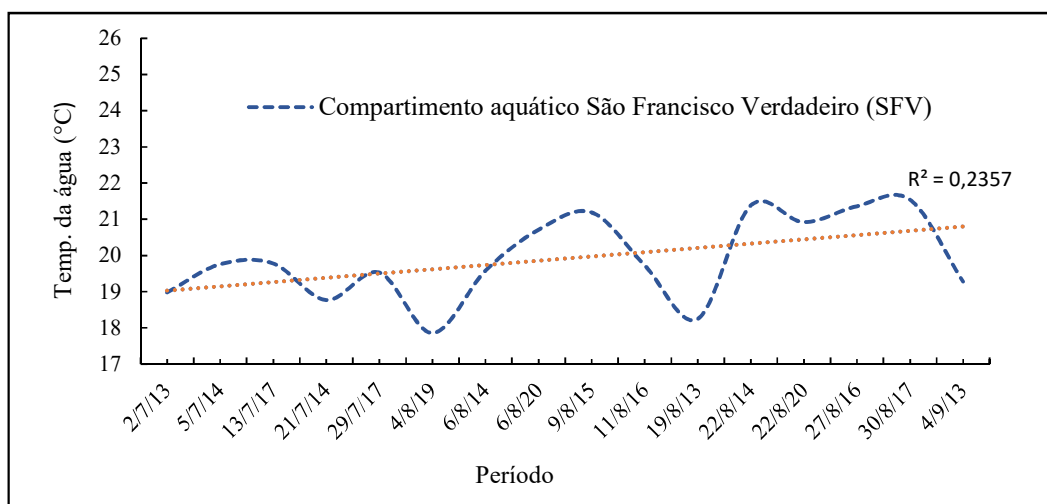
Quadro 10 – Estimativas da temperatura da água no período de Inverno a partir de imagens Landsat, sensor TIR, banda 10, 2013-2020

Data	Compartimento Aquático SFV					Compartimento Aquático Ocoí					Reservatório de Itaipu (leito principal)				
	Mín. (°C)	Máx. (°C)	Ampl. (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Mín. (°C)	Máx. (°C)	Ampl. (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Mín. (°C)	Máx. (°C)	Ampl. (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)
02/07/13	18,77	19,28	0,51	18,98	0,14	18,6	19,20	0,60	18,98	0,10	18,69	19,45	0,76	19,06	0,16
05/07/14	18,77	20,63	1,86	19,76	0,33	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
13/07/17	19,11	20,38	1,27	19,78	0,21	19,53	22,94	3,41	19,89	0,22	19,11	19,96	0,85	19,52	0,15
21/07/14	17,5	19,62	2,12	18,77	0,50	18,43	19,36	0,93	19	0,16	19,03	19,79	0,76	19,42	0,19
29/07/17	18,94	20,29	1,35	19,53	0,20	19,03	23,43	4,40	19,48	0,24	18,77	19,62	0,85	19,20	0,18
04/08/19	17,42	22,00	4,58	17,86	0,41	17,08	18,67	1,59	17,86	0,29	17,93	19,28	1,35	18,38	0,33
06/08/14	19,03	20,13	1,10	19,58	0,13	18,94	20,29	1,35	19,51	0,25	18,77	19,79	1,02	19,18	0,25
06/08/20	20,21	21,39	1,18	20,71	0,18	20,21	25,66	5,45	20,86	0,71	19,7	20,8	1,1	20,21	0,22
09/08/15	20,72	21,99	1,27	21,19	0,19	20,46	21,39	0,93	20,8	0,20	20,21	21,06	0,85	20,64	0,17
11/08/16	19,03	20,29	1,26	19,73	0,25	19,11	22,70	3,59	19,35	0,23	18,94	20,21	1,27	19,72	0,3
19/08/13	17,17	19,28	2,11	18,25	0,31	18,18	24,57	6,39	19,15	0,95	17,59	18,77	1,18	18,14	0,26
22/08/14	20,63	22,49	1,86	21,38	0,29	20,55	26,00	5,45	21,38	0,45	*	*	*	*	*
22/08/20	20,34	24,69	4,35	20,92	0,52	20,21	25,31	5,10	20,8	0,51	19,70	20,72	1,02	20,20	0,23
27/08/16	20,8	22,41	1,61	21,36	0,21	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
30/08/17	21,06	22,07	1,01	21,54	0,23	20,04	24,26	4,22	20,81	0,42	*	*	*	*	*
04/09/13	18,52	19,96	1,44	19,28	0,24	*	*	*	*	*	17,76	19,03	1,27	18,2	0,3
Máxima	21,06	24,69	3,63	21,54	0,52	20,55	26,00	5,45	21,38	0,95	20,21	21,06	1,35	20,64	0,33
Mínima	17,17	19,28	2,11	17,86	0,13	17,08	18,67	1,59	17,86	0,1	17,59	18,77	0,76	18,14	0,15
Média geral	19,25	21,06	3,75	19,91	0,27	19,26	22,34	3,30	19,84	0,35	18,85	19,87	1,02	19,32	0,23

*Presença de nuvens na imagem de satélite

Com base ainda nos dados apresentados no Quadro 10 é possível observar que a variação temporal (2013-2020, Figura 19) da temperatura de superfície da água estimada pelo satélite (TSAe) no SFV apresentou oscilações ao longo do período em 16 imagens analisadas. Assim, as médias da TSAe não apresentaram variações significativas ($r^2=0,23$).

Figura 19 – Variação temporal das médias TSAe no compartimento aquático SFV, período de Inverno, 2013-2020



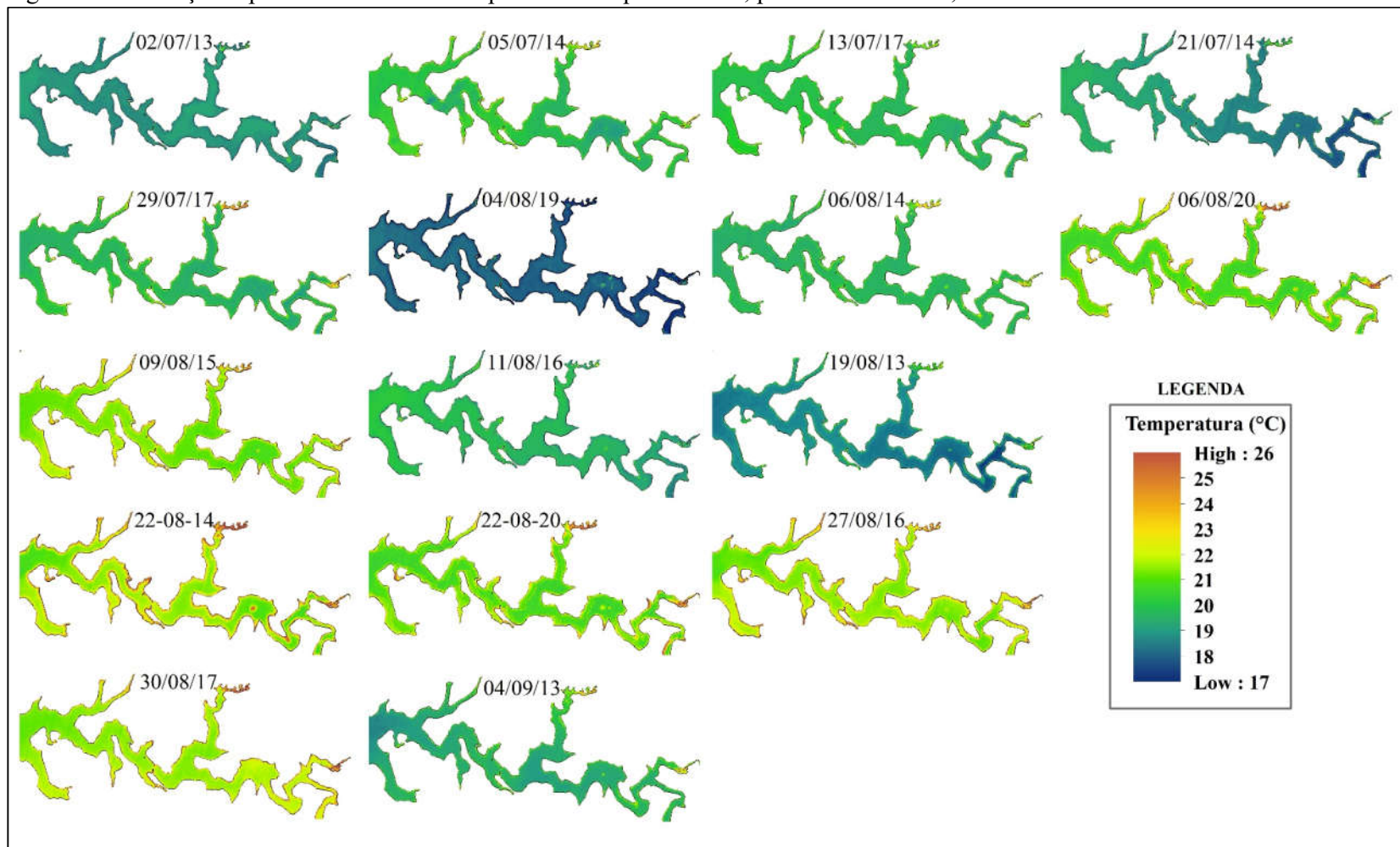
Observou-se que a variabilidade térmica das águas no compartimento ocorreu de forma mais expressiva para as datas: 04/08/2019, com amplitude térmica de 4,58°C e 22/08/2020, com amplitude térmica de 4,35°C. Semelhantemente aos registros encontrados no período de outono, essa variação da amplitude é explicada pelo registro de plumas termais isoladas relacionadas a processos metabólicos do compartimento, as quais são responsáveis pela elevação da temperatura, sobressaindo-se sobre as temperaturas médias das águas registradas nessas datas. Nesse sentido, a amplitude térmica da temperatura superficial das águas para as datas supracitadas, em média 4,47°C, é expressiva devido a ocorrência de plumas termais de abrangência e localização geográfica distintas para cada data e a variabilidade termal amostrada não corresponde o contexto geral do curso do compartimento aquático (Quadro 10).

Ainda, observou-se uma tendência no aumento da temperatura de superfície da água do setor leste para o setor oeste do compartimento aquático SFV, próximo à área do leito principal do reservatório de Itaipu. Tal constatação pode ser verificada com mais ênfase em algumas

datas, a citar: 13/07/2017, com temperaturas mínima 19,11°C, máxima 20,38°C, logo, amplitude térmica de 1,27°C; 21/07/2014, com temperaturas mínima 17,5°C, máxima 19,62°C, logo, amplitude térmica de 2,12°C; 11/08/2016, com temperaturas mínima 19,03°C, máxima 20,29°C, logo, amplitude térmica 1,26°C; e 19/08/2013, com temperaturas mínima 17,17°C, máxima 19,28°C, logo, amplitude térmica de 2,11°C (Quadro 10 e Figura 20).

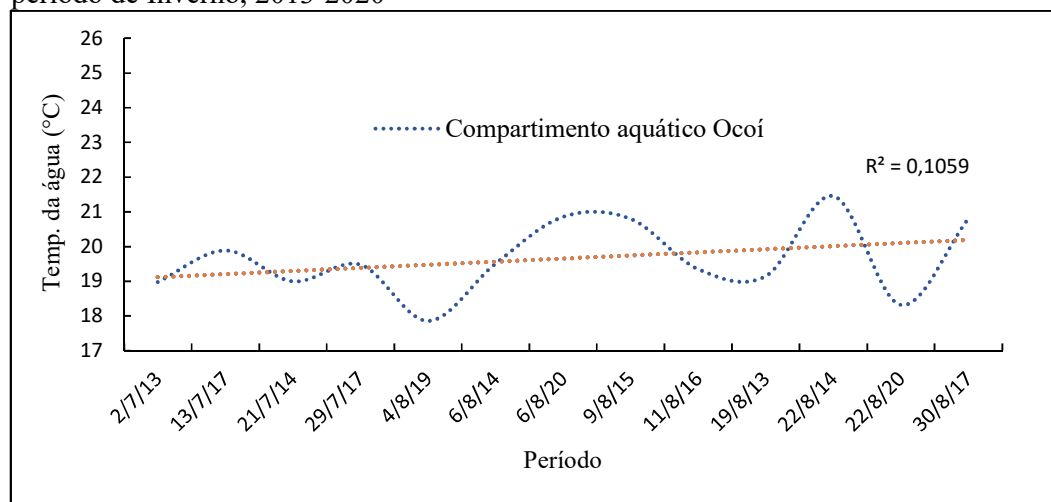
Já em 30/08/2017 as águas mais aquecidas encontravam-se à montante, setor leste do compartimento aquático. Em geral, este fato pode estar associado ao contrafluxo do reservatório e a entrada de água mais aquecida no compartimento devido a transição do inverno para o início da primavera. Porém, em 04/19/2013 as águas encontravam-se menos aquecidas, considerando o conjunto de imagens analisadas para o período. Tal fato é dependente do ano analisado, pois observa-se que a imagem do dia 19/08/2013 também está com suas águas menos aquecidas. Sobretudo, 75% dos períodos analisados apresentaram variabilidade térmica inferior a 2°C no compartimento aquático SFV (Figura 20).

Figura 20 – Variação espacial da TSAe no compartimento aquático SFV, período de Inverno, 2013-2020



Em análise semelhante é possível afirmar que a variação temporal de 2013 a 2020 da temperatura de superfície da água estimada pelo satélite (TSAe) no Ocoí, mediante a análise de 13 imagens de satélite, apresentou oscilações (Figura 21). No geral, menor aquecimento das águas em julho e, gradativamente, águas mais aquecidas em agosto para a maioria das imagens analisadas. Assim, as médias da TSAe não apresentaram variações expressivas já que o valor crítico de referência foi de apenas $r^2=0,10$. Devido à presença de nuvens na área do compartimento para as datas 05/07/2014, 27/08/2016 e 04/09/2013 os valores de TSAe foram desconsiderados na análise.

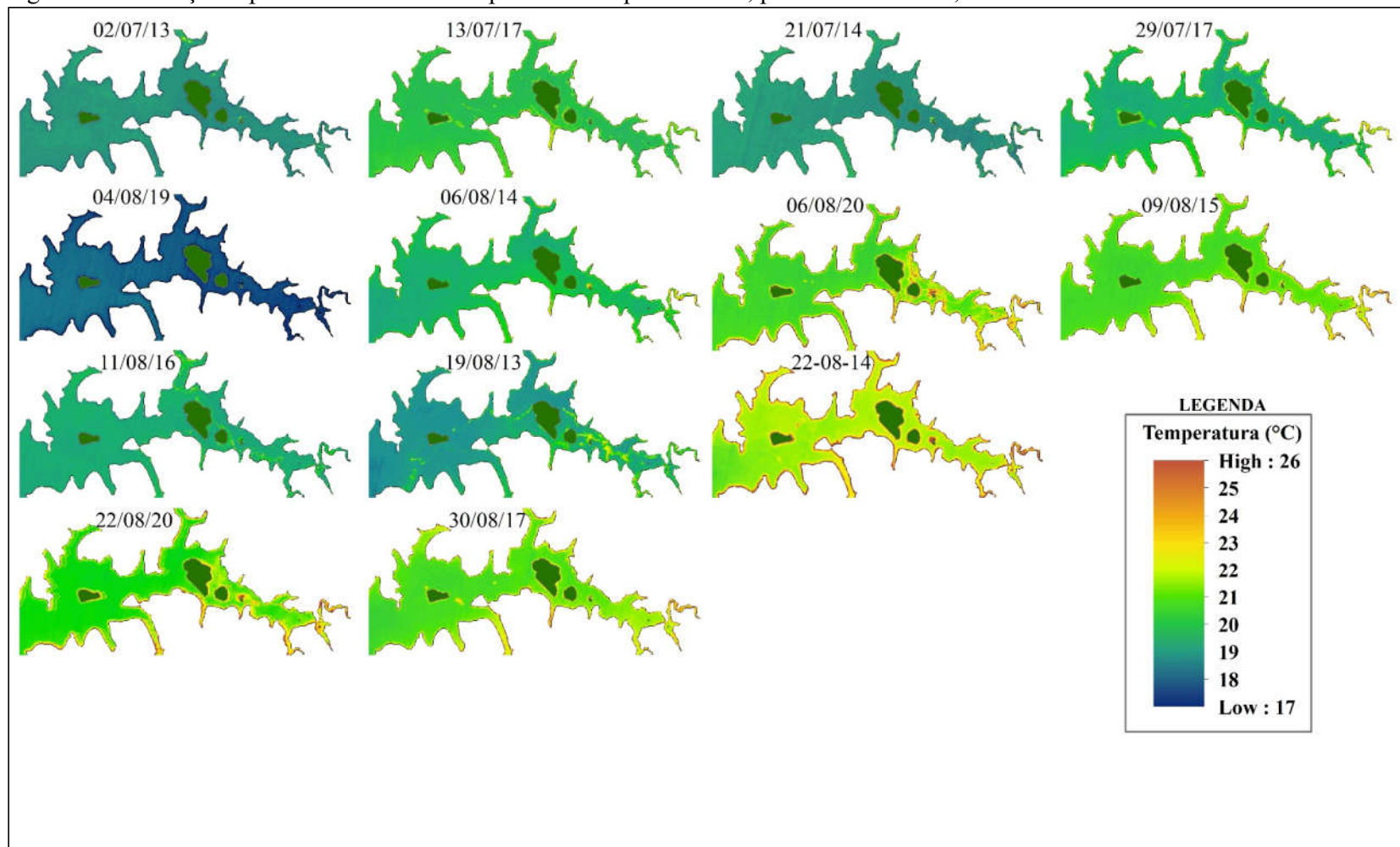
Figura 21 – Variação temporal das médias da TSAe no compartimento aquático Ocoí, período de Inverno, 2013-2020



A variabilidade termal das águas do compartimento aquático Ocoí ocorreu de forma mais expressiva para as datas: 13/07/2017, com amplitude térmica de 3,41°C; 06/08/2020, com amplitude térmica de 5,45°C; 19/08/2013, com amplitude térmica de 6,39°C; 22/08/2014, com amplitude térmica de 5,45°C e 22/08/2020, com amplitude térmica de 5,10°C. Diante dessas amplitudes expressivas, em média 5,16°C, verificou-se novamente a ocorrência de plumas termais isoladas relacionadas a processos hidrodinâmicos e ecológicos do local e, conseqüentemente, a variabilidade termal amostrada na superfície da água não representa, de forma geral, o contexto geral do curso do compartimento (Figura 22). Sobretudo, a alta variabilidade termal para as datas 29/07/2017 (4,40°C), 11/08/2016 (3,59°C) e 30/08/2017 (4,22°C) correspondem a bancos de macrófitas aquáticas no compartimento.

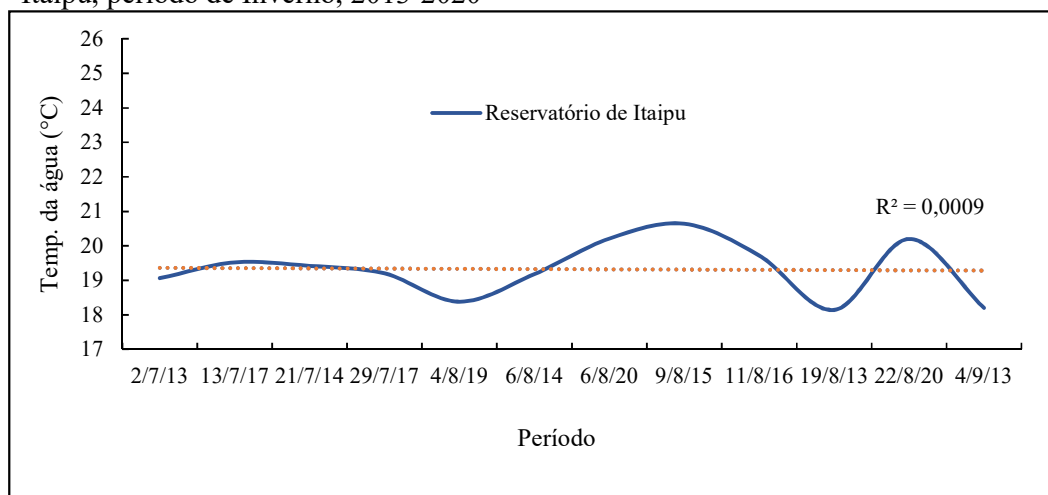
Além disso, verificou-se uma tendência no aumento da temperatura de superfície da água do setor leste para o setor oeste do compartimento aquático Ocoí, próximo à área do leito principal do reservatório de Itaipu. Essa tendência pode ser observada de forma mais expressiva em algumas datas, a citar: 19/08/2013, com temperaturas mínima 18,18°C, máxima 24,57°C, logo, amplitude térmica de 6,39°C; 06/08/2020, com temperaturas mínima 20,21°C, máxima 25,66°C, logo, amplitude térmica de 5,45°C; 22/08/2020, com temperaturas mínima 20,21°C, máxima 25,31°C, logo, amplitude térmica 5,10°C; 30/08/2017, com temperaturas mínima 20,04°C, máxima 24,26°C, logo, amplitude térmica 4,22°C; 09/08/2015, com temperaturas mínima 20,46°C, máxima 21,39°C, logo, amplitude térmica 0,93°C; e, 22/08/2014, com temperaturas mínima 20,55°C, máxima 26°C, logo, amplitude térmica 5,45°C (Figura 22). Sobretudo, 61,5% dos períodos analisados apresentaram variabilidade térmica superior a 3°C no compartimento aquático Ocoí decorrente, principalmente, da presença de episódios de floração de algas.

Figura 22 – Variação espacial da TSAe no compartimento aquático Ocoí, período de Inverno, 2013-2020



Em um contexto mais amplo observou-se que a variação temporal da TSAe entre 2013 e 2020 na área central do reservatório de Itaipu, apresentou, no geral, menor aquecimento das águas em julho, aquecendo-se gradativamente a partir do mês de agosto (Figura 23). No entanto, as médias da TSAe não apresentaram variações significativas já que o valor crítico de referência foi $r^2=0,00$. Algumas datas (19/08/2013 e 04/09/2013) apresentaram temperaturas menores, característica do ano em que foram registradas. Ao todo foram analisadas 12 imagens de satélite. Devido a presença de nuvens na área do reservatório para as datas 05/07/2014, 22/08/2014 e 27/08/2016 os valores de TSAe foram desconsiderados na análise.

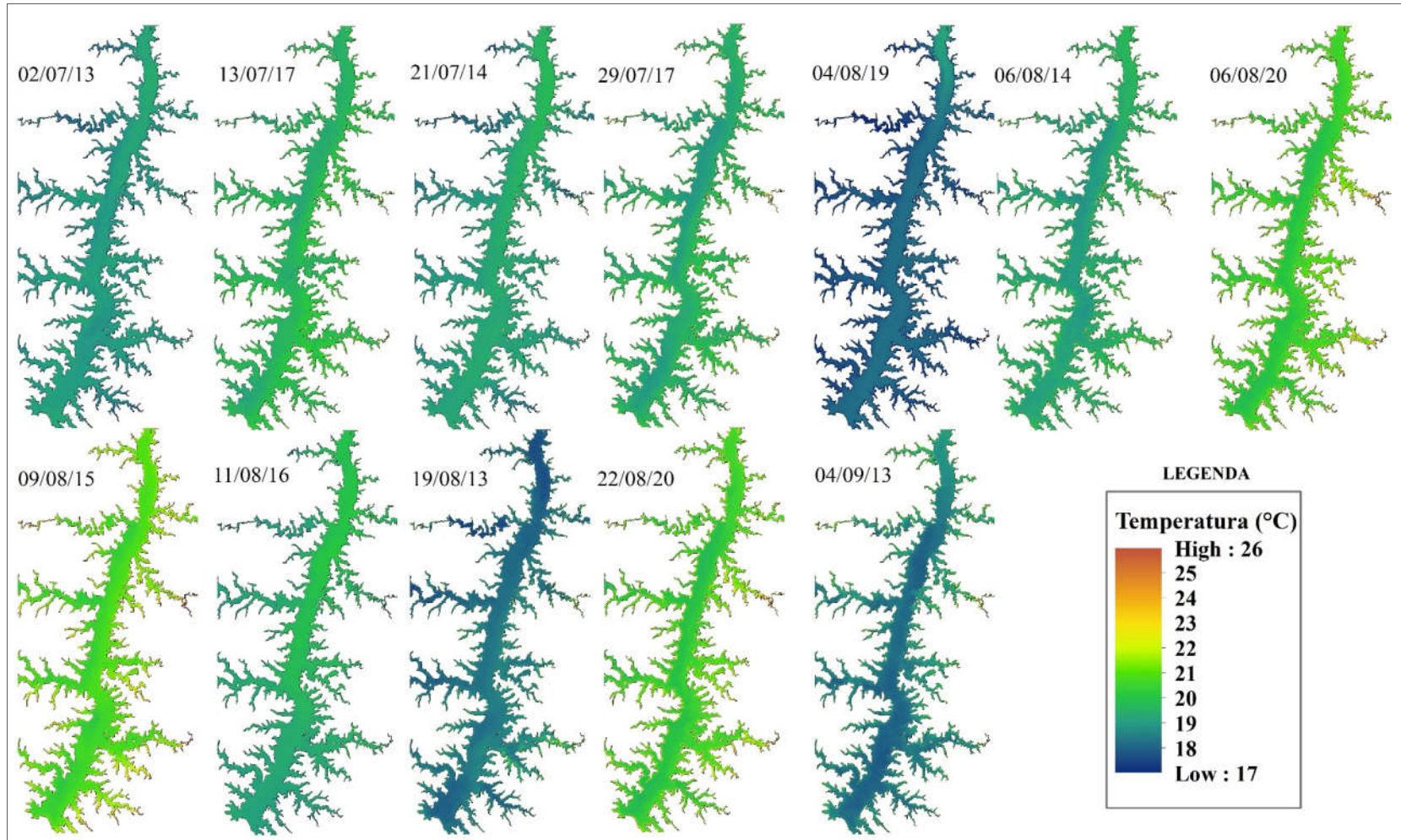
Figura 23 – Variação temporal das médias da TSAe na área central do reservatório de Itaipu, período de Inverno, 2013-2020



A variabilidade térmica das águas da área central do reservatório de Itaipu foi inferior a 2°C para o período analisado. Não foram identificadas amplitudes térmicas expressivas e relacionadas a ocorrência de plumas termais. Notou-se, no entanto, alguns períodos com diferenças na temperatura de superfície da água entre o setor montante e jusante do curso principal do reservatório e no deságue de compartimentos aquáticos, a saber: 04/08/2019, com temperaturas mínima 17,93°C, máxima 19,28°C, logo, amplitude térmica de 1,35°C; 11/08/2016, com temperaturas mínima 18,94°C, máxima 20,21°C, logo, amplitude térmica 1,27°C; 04/09/2013, com temperaturas mínima 17,76°C, máxima 19,03°C, logo, amplitude térmica de 1,27°C; e, 19/08/2013, com temperaturas mínima 17,59°C, máxima 18,77°C, logo,

amplitude térmica $1,18^{\circ}\text{C}$. Sobretudo, identificou-se em média uma amplitude térmica geral de $1,02^{\circ}\text{C}$ ao longo da área lacustre do reservatório de Itaipu (Figura 24).

Figura 24 – Variação espacial da TSAe na área do leito principal do reservatório de Itaipu, período de Inverno, 2013-2020



4.2.3 Período de Primavera

A partir do Quadro 11 é possível verificar que as estimativas médias da temperatura de superfície da água no período de primavera (2013-2020) apresentaram variação entre 19 e 28°C em 09 imagens de satélite analisadas. Na média geral da temperatura mínima os compartimentos aquáticos Ocoí e São Francisco Verdadeiro apresentaram valores médios aproximados (22,63°C e 22,10°C, respectivamente). O leito principal do reservatório de Itaipu apresentou a menor média mínima das temperaturas estimadas (21,91°C), com a menor temperatura da água registrada no dia 21/09/2019 (19,96°C).

O compartimento aquático Ocoí apresentou a maior estimativa média geral da temperatura máxima de superfície da água (25,10°C), atingindo temperaturas elevadas, por exemplo, em 28/09/2016 (27,64°C) e 10/11/2014 (27,98°C). Já no reservatório de Itaipu foi registrada a menor média geral da temperatura máxima, 23,35°C. Em relação a temperatura média de superfície da água para as datas analisadas conclui-se que o compartimento aquático Ocoí apresentou valor da média máxima superior a 1°C considerando os demais setores analisados. Na média geral da temperatura média de superfície da água destacam-se os compartimentos aquáticos Ocoí e SFV com as maiores médias (23,38°C e 23,07, respectivamente), seguido do leito principal do reservatório de Itaipu (22,70°C).

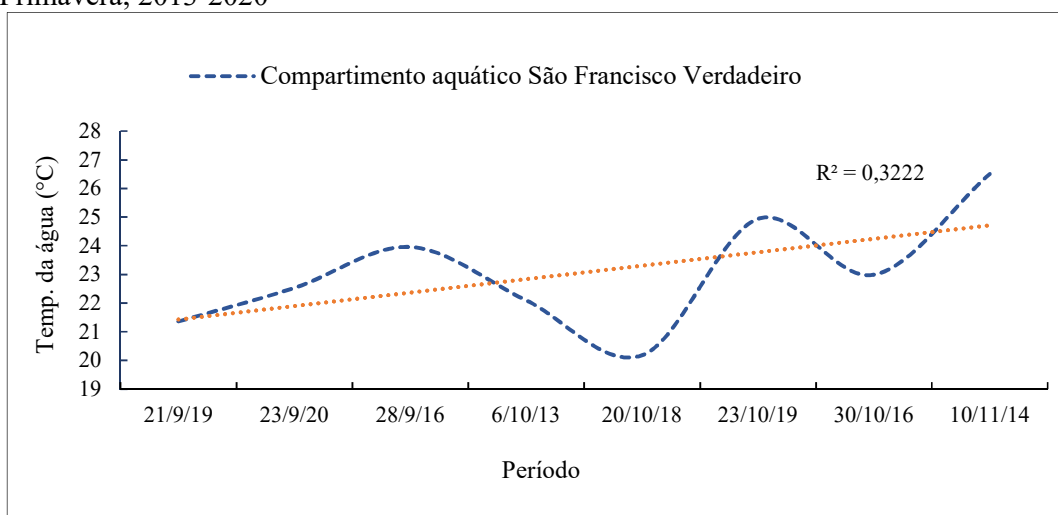
Em relação ao desvio padrão, o grau de dispersão no conjunto de valores extraídos dos transectos foi maior na data de 30/10/2016 no compartimento SFV, com valores da temperatura de superfície da água distantes da média até 0,53°C. Na média geral do desvio padrão o compartimento SFV se destacou com 0,37°C, Ocoí com 0,34°C e o reservatório de Itaipu com 0,29°C. Notou-se, desse modo, que os valores médios de desvio padrão registrados nas áreas de estudo foram relativamente baixos e demonstraram atenuada variabilidade térmica. Tal estabilidade é observada para a maioria dos meses de primavera (Quadro 11).

Quadro 11 – Estimativas da temperatura da água no período de Primavera a partir de imagens Landsat, sensor TIR, banda 10, 2013-2020

Data	Compartimento aquático SFV					Compartimento aquático Ocoí					Reservatório de Itaipu				
	Mín. (°C)	Máx. (°C)	Ampl. (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Mín. (°C)	Máx. (°C)	Ampl. (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Mín. (°C)	Máx. (°C)	Ampl. (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)
21/09/2019	20,72	22,07	1,35	21,36	0,30	20,21	21,47	1,26	20,59	0,19	19,96	21,13	1,17	20,44	0,23
23/09/2020	22,15	23,6	1,45	22,53	0,24	21,80	24,10	2,30	22,54	0,38	20,89	22,24	1,35	21,59	0,27
28/09/2016	22,9	25,1	2,20	23,96	0,36	22,1	27,64	5,54	22,9	0,44	21,49	22,8	1,31	22,27	0,22
06/10/2013	21,31	23,09	1,78	22,10	0,34	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
20/10/2018	19,03	21,05	2,02	20,18	0,40	21,39	24,55	3,16	22,16	0,35	*	*	*	*	*
23/10/2019	24,10	25,54	1,44	24,94	0,32	23,09	24,62	1,53	23,96	0,35	22,92	24,27	1,35	23,63	0,30
25/10/2020	*	*	*	*	*	24,70	26,81	2,11	25,49	0,37	*	*	*	*	*
30/10/2016	21,22	24,19	2,97	22,99	0,53	22,58	23,59	1,01	23,12	0,21	21,90	23,25	1,35	22,71	0,25
10/11/2014	25,40	27,91	2,51	26,51	0,44	25,20	27,98	2,78	26,28	0,46	24,30	26,41	2,11	25,56	0,47
Máxima	25,40	27,91	2,97	26,51	0,53	25,20	27,98	5,54	26,28	0,46	24,30	26,41	2,11	25,56	0,47
Mínima	19,03	21,05	1,35	20,18	0,24	20,21	21,47	1,01	20,59	0,19	19,96	21,13	1,17	20,44	0,22
Média geral	22,10	24,07	1,97	23,07	0,37	22,63	25,10	2,46	23,38	0,34	21,91	23,35	1,44	22,70	0,29

Com base ainda nos dados apresentados no Quadro 11 é possível observar que a variação temporal (2013-2020, Figura 25) da temperatura de superfície da água no SFV estimada pelo satélite (TSAe) apresentou oscilações em 8 imagens ao longo do período. Assim, as médias da TSAe apresentaram variações com $r^2=0,32$.

Figura 25 – Variação temporal das médias TSAe no compartimento aquático SFV, período de Primavera, 2013-2020



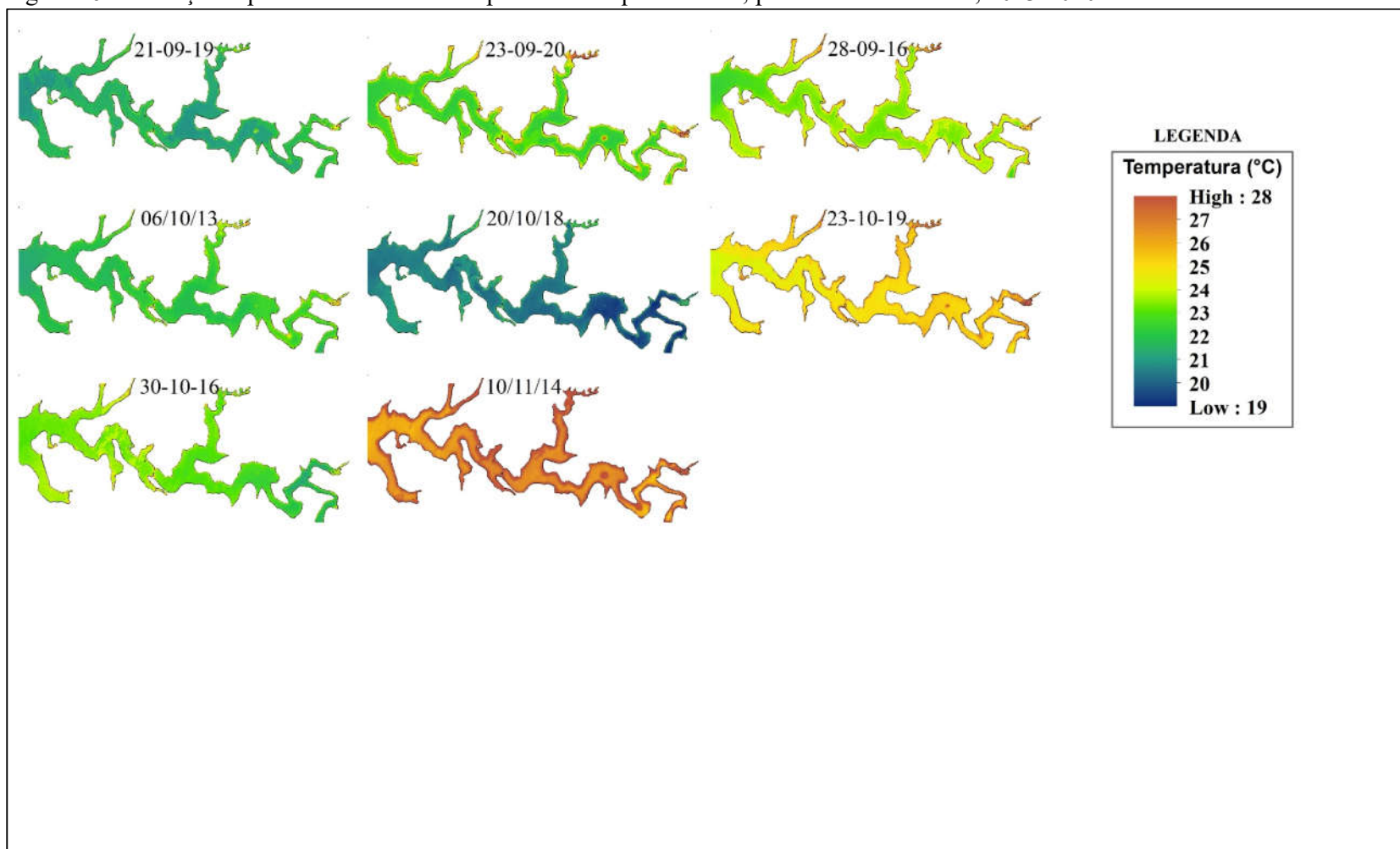
Observou-se que a variabilidade térmica das águas no compartimento ocorreu de forma mais expressiva para as datas: 28/09/2016, com amplitude térmica de 2,20°C, 20/10/2018, com amplitude térmica de 2,02°C, 30/10/2016, com amplitude térmica de 2,97°C e 10/11/2014, com amplitude térmica de 2,51°C. Nesse sentido, a amplitude térmica da temperatura superficial das águas registradas para as datas supracitadas, em média 2,43°C, não está relacionada com a ocorrência de plumas termais e representa diferenças térmicas entre o setor montante e jusante do compartimento aquático (Quadro 11).

Ainda, observou-se variações espaciais expressivas na temperatura de superfície da água do compartimento aquático e na maior parte das imagens analisadas. Tal constatação pode ser verificada com mais ênfase em algumas datas, a citar: 21/09/2019, com temperaturas mínima 20,72°C, máxima 22,07°C, logo, amplitude térmica de 1,35°C; 28/09/2016, com temperaturas mínima 22,9°C, máxima 25,1°C, logo, amplitude térmica de 2,20°C; 06/10/2013, com temperaturas mínima 21,31°C, máxima 23,09°C, logo, amplitude térmica 1,78°C; 20/10/2018, com temperaturas mínima 19,03°C, máxima 21,05°C, logo, amplitude térmica 2,02°C;

30/10/2016, com temperaturas mínima 21,22°C, máxima 24,19°C, logo, amplitude térmica 2,97°C; e 10/11/2014, com temperaturas mínima 25,40°C, máxima 27,91°C, logo, amplitude térmica 2,51°C (Quadro 11 e Figura 26).

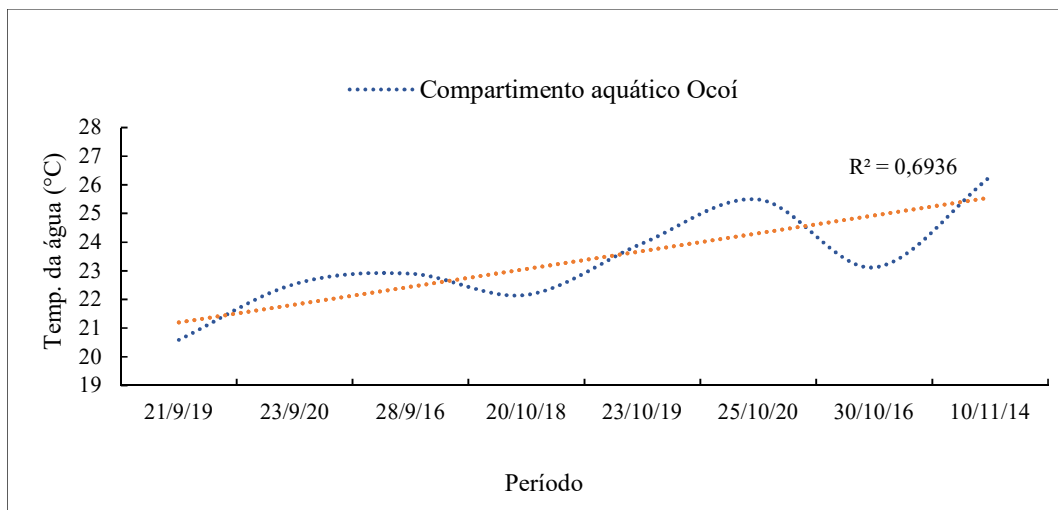
O período da primavera apresenta, no geral, episódios de rajadas de vento mais intensas nesta época do ano (de acordo com dados coletados pela equipe do Parque Tecnológico da Itaipu), o que favorece a ressurgência de águas subsuperficiais com diferentes temperaturas e resulta em amplitudes térmicas mais expressivas no compartimento. Sobretudo, 50% dos períodos analisados apresentaram variabilidade térmica inferior a 2°C no compartimento aquático SFV (Figura 26).

Figura 26 – Variação espacial da TSAe no compartimento aquático SFV, período de Primavera, 2013-2020



Em análise semelhante é possível observar que a variação temporal da temperatura de superfície da água estimada pelo satélite (TSAe) de 2013 a 2020 no Ocoí, em 8 imagens de satélite analisadas, apresentou oscilações (Figura 27). No geral, menor aquecimento das águas em setembro e, gradativamente, águas mais aquecidas a partir de outubro para a maioria das imagens analisadas. Assim, as médias da TSAe apresentaram variações significativas, já que o valor crítico de referência foi de $r^2=0,69$. Portanto, observa-se tendência de aumento da TSAe neste período do ano. Devido à presença de nuvens na área do compartimento para a data 06/10/2013, os valores de TSAe foram desconsiderados na análise.

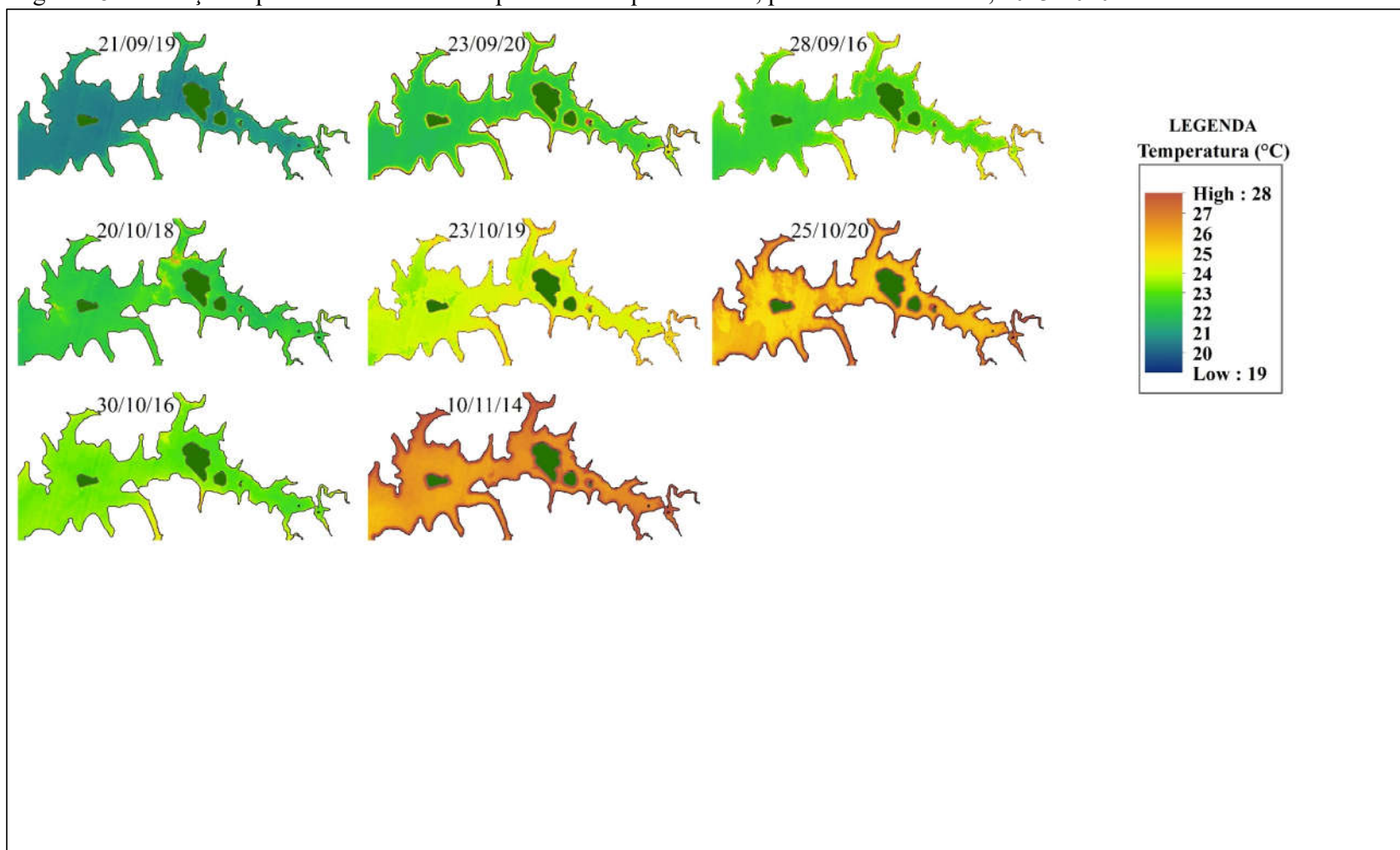
Figura 27 –Variação temporal das médias da TSAe no compartimento aquático Ocoí, período de Primavera, 2013-2020



A variabilidade termal das águas do compartimento aquático Ocoí ocorreu de forma mais expressiva para as datas: 28/09/2016, com amplitude térmica de 5,54°C e 20/10/2018, com amplitude térmica de 3,16°C. A verificação dessas amplitudes expressivas, em média 4,35°C, evidenciou novamente a ocorrência de plumas termais isoladas relacionadas a processos metabólicos desse ambiente aquático e, conseqüentemente, a variabilidade termal amostrada na superfície da água não representa, de forma geral, o contexto geral do curso do compartimento (Figura 28). Sobretudo, a variabilidade termal nas datas 10/11/2014 (2,78°C) e 25/10/2020 (2,11°C), a exemplos, corresponde a ressurgência de águas subsuperficiais com diferenças nas temperaturas causadas pelas rajadas de vento comuns neste período de

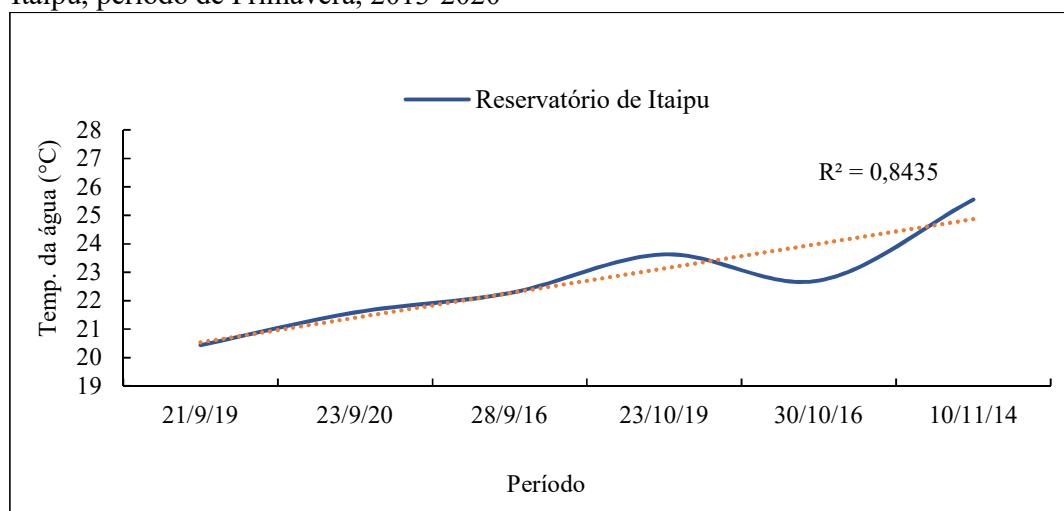
primavera. Sobretudo, 25% da variabilidade termal constatada no compartimento aquático Ocoí foi superior a 3,16°C e decorrente, principalmente, da presença de episódios de floração de algas.

Figura 28 – Variação espacial da TSAe no compartimento aquático Ocoí, período de Primavera, 2013-2020



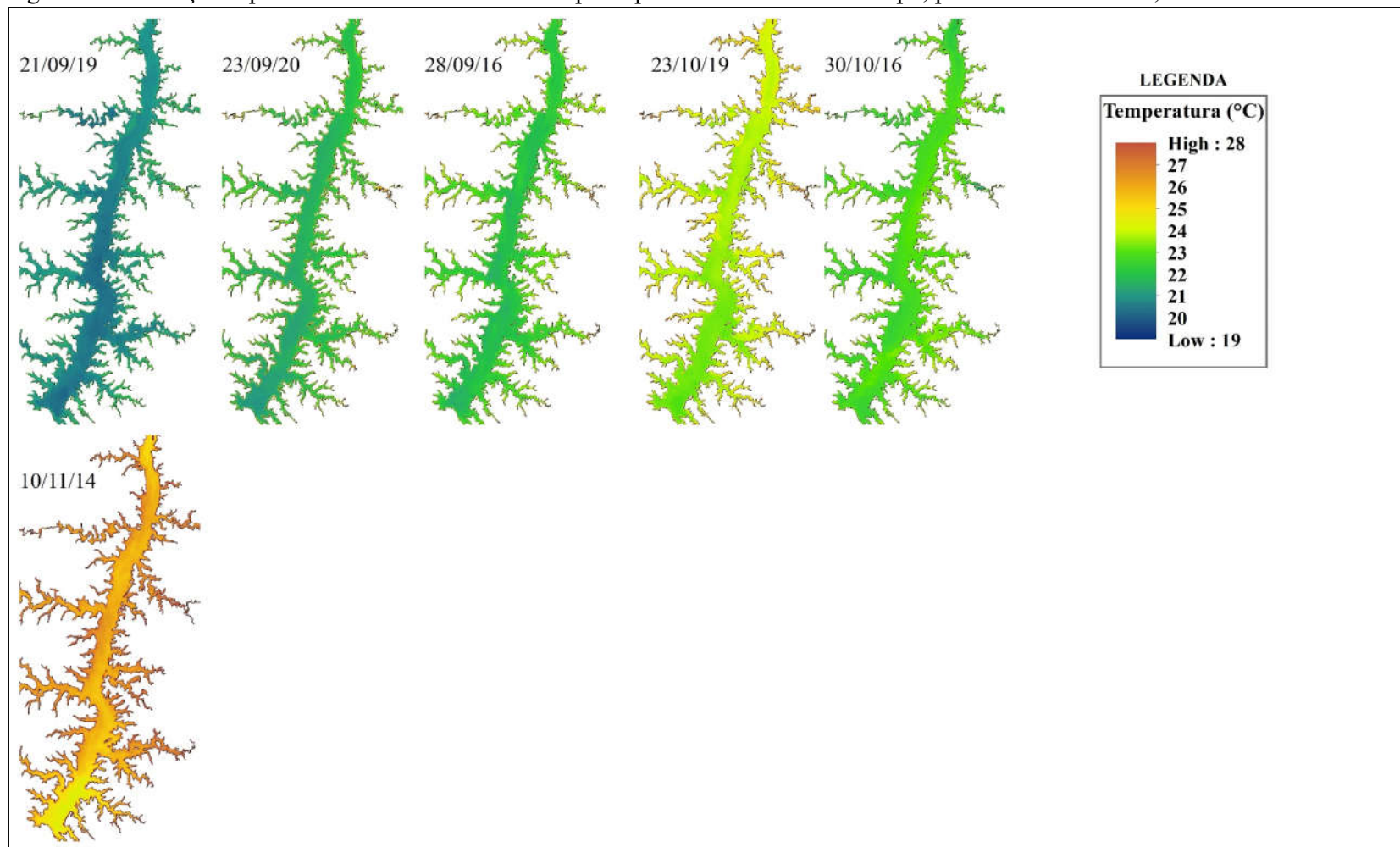
Na área central do reservatório de Itaipu é possível observar que a variação temporal da TSAe entre 2013 e 2020 apresentou menor aquecimento das águas em setembro, aumentando suas temperaturas gradativamente a partir do mês de outubro, destacando temperaturas da superfície maiores para o mês de dezembro (Figura 29). Nesse sentido, as médias da TSAe apresentaram variações significativas com $r^2=0,84$. Portanto, observou-se tendência de aumento da TSA neste período. Somaram-se apenas 5 imagens de satélite adequadas à análise. Demais imagens, a presença de nuvens na área do reservatório comprometeu a qualidade do dado. Desse modo, os valores de TSAe presente nas imagens de satélite das datas 06/10/2013, 20/10/2018 e 25/10/2020 foram descartados da interpretação.

Figura 29 – Variação temporal das médias da TSAe na área central do reservatório de Itaipu, período de Primavera, 2013-2020



As águas da área central do reservatório de Itaipu apresentaram, no geral, variabilidade térmica inferior a 2°C para o período analisado. Não foram observadas amplitudes térmicas expressivas e relacionadas a ocorrência de plumas termais. Observou-se, no entanto, diferenças na temperatura de superfície da água entre o setor montante e jusante do curso principal do reservatório e no deságue de compartimentos aquáticos para a maioria dos períodos analisadas. Sobretudo, identificou-se uma amplitude térmica média de 1,44°C ao longo do leito principal do reservatório de Itaipu (Figura 30).

Figura 30 – Variação espacial da TSAe na área do leito principal do reservatório de Itaipu, período de Primavera, 2013-2020



4.2.4 Período de verão

Com base no Quadro 12 é possível observar que as estimativas médias da temperatura de superfície da água no período de verão (2013-2020) apresentaram variação entre 22 e 34°C em 9 imagens de satélite analisadas. Na média geral da temperatura mínima os compartimentos aquáticos Ocoí e São Francisco Verdadeiro apresentaram os maiores valores médios e aproximados (24,53°C e 24,13°C, respectivamente). A área central do reservatório de Itaipu apresentou a menor média mínima das temperaturas estimadas (23,70°C), com a menor temperatura da água registrada no dia 20/03/2016 (22,40°C).

O compartimento aquático Ocoí apresentou a maior estimativa média geral da temperatura máxima de superfície da água (33,24°C), atingindo temperaturas elevadas, por exemplo, em 09/02/2019 (33,24°C) e 26/12/2019 (32, 57°C). Já no reservatório de Itaipu foi registrada a menor média geral da temperatura máxima, 26,11°C. Em relação a temperatura média de superfície da água para as datas analisadas conclui-se que os valores das médias máximas são semelhantes entre os compartimentos aquáticos e distintas do leito principal do reservatório (26,59-SFV, 26,74-Ocoí e 25,44-reservatório). Na média geral da temperatura média de superfície da água destacam-se os compartimentos aquáticos Ocoí e SFV com as maiores médias (25,13°C e 25,01, respectivamente), seguido do leito principal do reservatório da Itaipu (24,32°C).

Em relação ao desvio padrão, o maior grau de dispersão no conjunto de valores extraídos dos transectos foi registrado no dia 09/02/2019, compartimento aquático Ocoí, com valores da temperatura de superfície da água distantes da média até 0,80°C. Na média geral do desvio padrão o compartimento Ocoí se destacou também com 0,37°C, SFV com 0,32 e o reservatório de Itaipu com apenas 0,27°C. Notou-se, desse modo, que os valores médios de desvio padrão registrados nas áreas de estudo são relativamente baixos e demonstram atenuada variabilidade térmica (Quadro 12).

Quadro 12 - Estimativas da temperatura da água no período de Verão a partir de imagens Landsat, sensor TIR, banda 10, 2013-2020

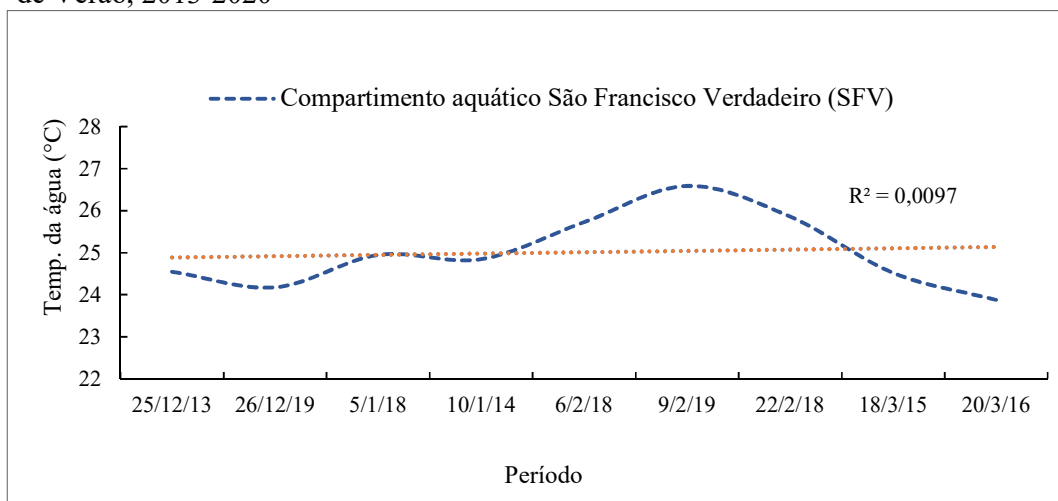
Data	Compartimento aquático SFV					Compartimento aquático Ocoí					Reservatório de Itaipu				
	Mín. (°C)	Máx. (°C)	Ampl. (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Mín. (°C)	Máx. (°C)	Ampl. (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Mín. (°C)	Máx. (°C)	Ampl. (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)
25/12/2013	24,00	26,22	2,22	24,55	0,41	vento	vento	vento	vento	vento	*/**	*/**	*/**	*/**	*/**
26/12/2019	22,2	25,2	3,00	24,18	0,57	24,2	31,57	7,37	25,08	0,68	*	*	*	*	*
05/01/2018	23,70	25,60	1,90	24,95	0,34	25,00	26,42	1,42	25,41	0,25	23,8	25,3	1,5	24,57	0,37
10/01/2014	24,00	25,62	1,62	24,85	0,25	23,90	25,70	1,80	24,32	0,28	*	*	*	*	*
06/02/2018	25,40	26,41	1,01	25,73	0,16	24,90	26,62	1,72	25,67	0,29	*	*	*	*	*
09/02/2019	26,01	31,79	5,78	26,59	0,42	25,90	33,24	7,34	26,74	0,80	*	*	*	*	*
22/02/2018	24,10	26,51	2,41	25,86	0,43	25,10	26,01	0,91	25,55	0,16	24,9	26,11	1,21	25,44	0,21
18/03/2015	24,20	25,10	0,90	24,52	0,15	*	*	*	*	*	23,7	24,5	0,8	24,13	0,15
20/03/2016	23,60	24,30	0,70	23,88	0,11	22,70	23,70	1,00	23,14	0,16	22,4	23,8	1,4	23,15	0,34
Máxima	26,01	31,79	5,78	26,59	0,57	25,90	33,24	7,37	26,74	0,80	24,90	26,11	1,50	25,44	0,37
Mínima	22,20	24,30	0,70	23,88	0,11	22,70	23,70	0,91	23,14	0,16	22,40	23,80	0,80	23,15	0,15
Média geral	24,13	26,31	2,17	25,01	0,32	24,53	27,61	3,08	25,13	0,37	23,70	24,93	1,23	24,32	0,27

*Presença de nuvens na imagem de satélite

**Presença de *sunlint* na imagem de satélite

Com base ainda nos dados apresentados no Quadro 12 é possível observar que a variação temporal (2013-2020, Figura 31) e variação espacial da temperatura de superfície da água estimada pelo satélite (TSAe) no SFV apresentou oscilações, sobressaindo-se o mês de fevereiro com o maior aquecimento das águas. Assim, as médias da TSAe não apresentaram variações significativas ($r^2=0,00$). Ao todo, 9 imagens analisadas.

Figura 31 – Variação temporal das médias TSAe no compartimento aquático SFV, período de Verão, 2013-2020



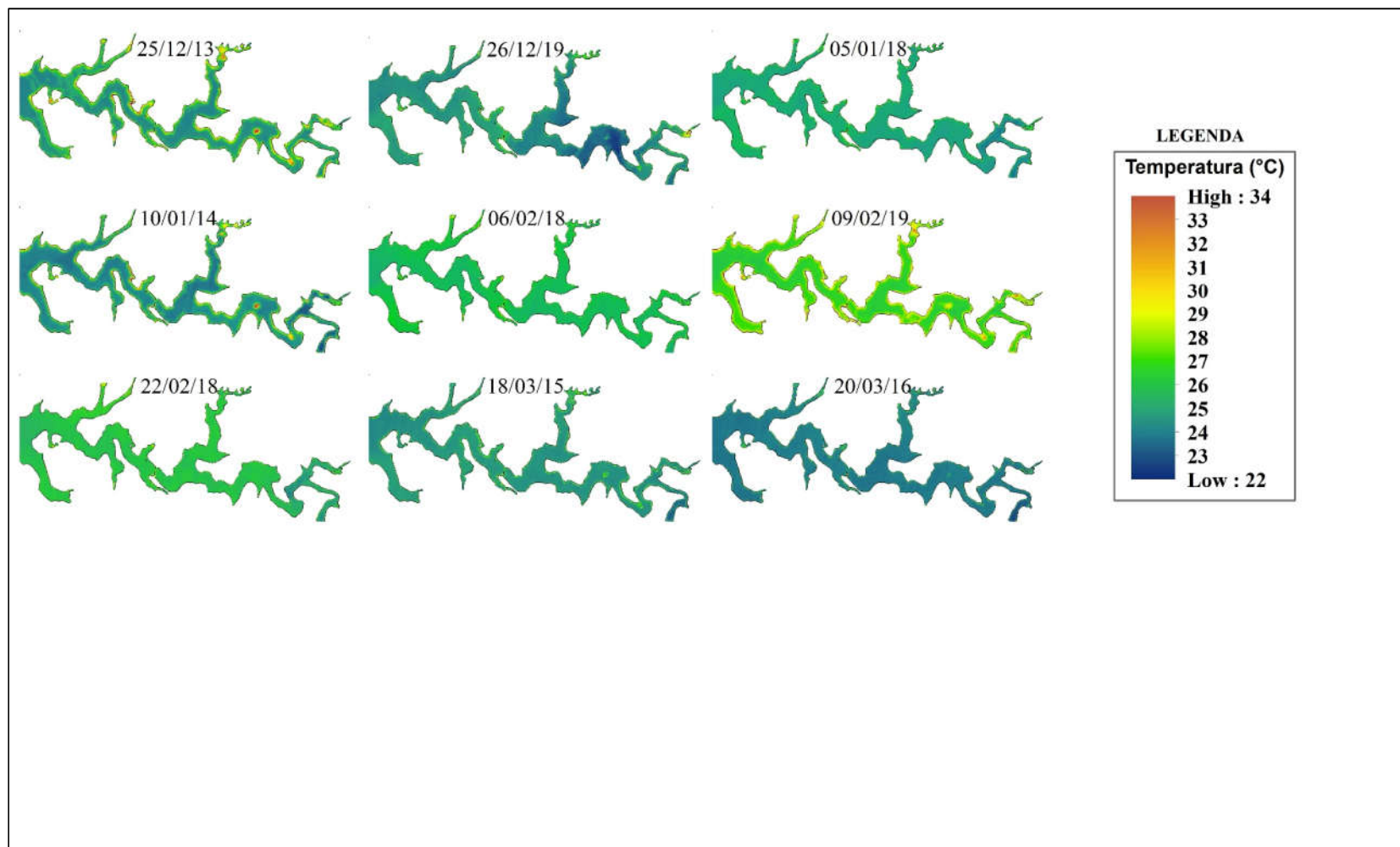
Observou-se que a variabilidade térmica das águas no compartimento ocorreu de forma mais expressiva para a data 09/02/2019, com amplitude térmica de 5,78°C. Semelhantemente aos registros encontrados no período de outono e inverno, essa variação da amplitude é explicada pelo registro de plumas termais isoladas relacionadas a processos metabólicos do compartimento, as quais são responsáveis pela elevação da temperatura, sobressaindo-se sobre a temperatura média da água registrada nessa data. Nesse sentido, a amplitude térmica da temperatura superficial das águas para a data supracitada é expressiva devido a ocorrência de plumas termais no compartimento (Quadro 12).

Ainda, observou-se no geral uma tendência no aumento da temperatura de superfície da água do setor leste para o setor oeste do compartimento aquático SFV, próximo ao leito principal do reservatório de Itaipu. Tal constatação pode ser verificada com mais ênfase em algumas datas, a citar: 22/02/2018, com temperaturas mínima 24,10°C, máxima 26,51°C, logo, amplitude térmica de 2,41°C; 26/12/2019, com temperaturas mínima 22,20°C, máxima 25,2°C,

logo, amplitude térmica de 3°C; e 05/01/2018, com temperaturas mínima 23,70°C, máxima 25,60°C, logo, amplitude térmica 1,90°C; (Quadro 12 e Figura 32).

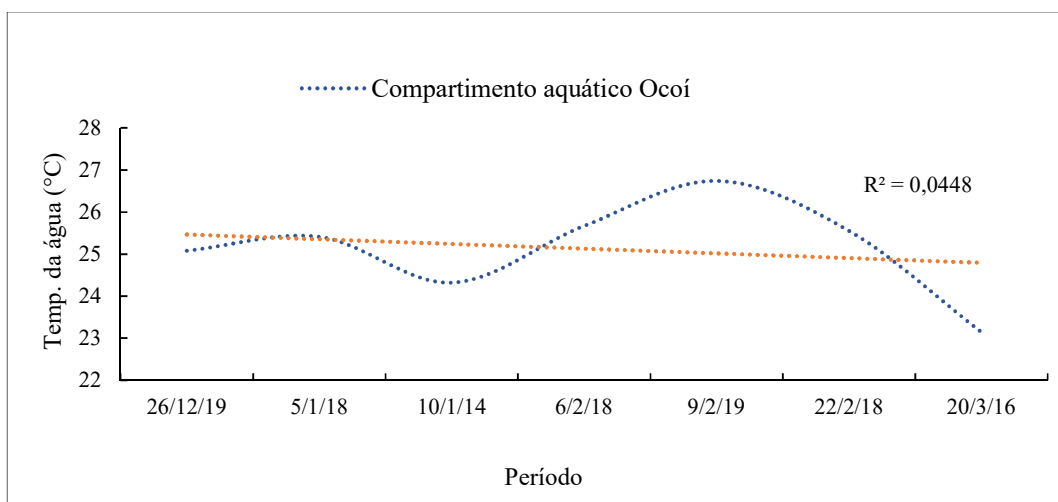
Em geral, a temperatura da superfície da água no período do verão tende a ser mais aquecida, no entanto, não foi realizado trabalho de campo no período correspondente à pesquisa e, nesse sentido, as imagens processadas não apresentam correção mediante a o modelo matemático desenvolvido. Além disso, o período do verão apresentou várias imagens comprometidas com o efeito *sunlint* ou a presença de nuvens, restando apenas nove imagens para a análise. Não obstante, processou-se tais imagens a fim de compreender o cenário térmico relativo, constatando-se que 55,5% das datas analisadas apresentaram variabilidade térmica inferior a 2°C no compartimento aquático SFV (Figura 32).

Figura 32 – Variação espacial da TSAe no compartimento aquático SFV, período de Verão, 2013-2020



Em análise semelhante no Ocoí é possível afirmar que a variação temporal da temperatura de superfície da água estimada pelo satélite (TSAe) entre 2013 e 2020, em 7 imagens de satélite analisadas, período de verão, apresentou maior aquecimento das águas em fevereiro e, gradativamente, seu menor aquecimento em março (Figura 33). Assim, as médias da TSAe não apresentaram variações expressivas ($r^2=0,04$). Devido à presença de nuvens na área do compartimento para as datas 25/12/2013 e 18/03/2015 os valores de TSAe foram desconsiderados na análise.

Figura 33 – Variação temporal das médias da TSAe no compartimento aquático Ocoí, período de Verão, 2013-2020

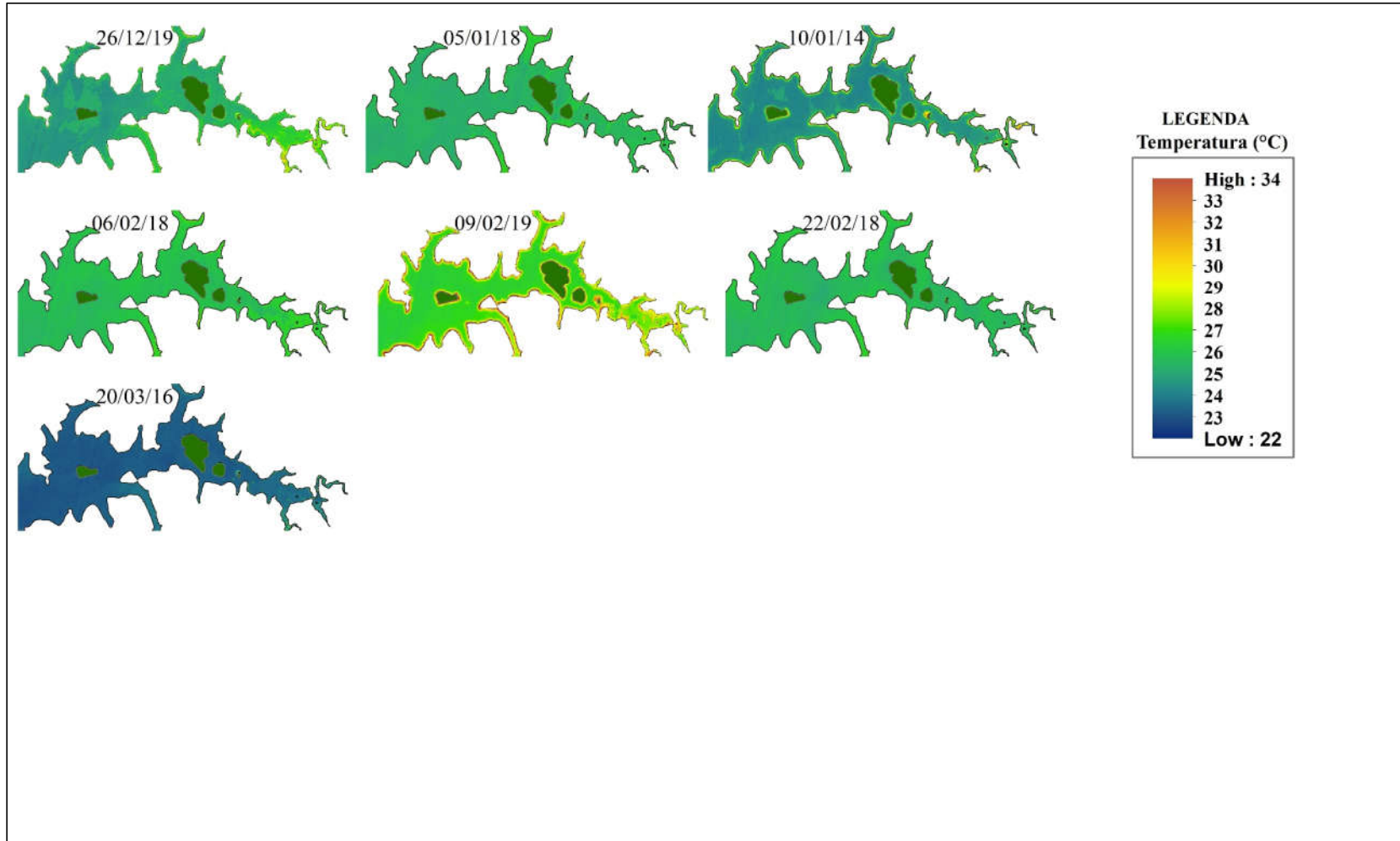


A variabilidade termal das águas do compartimento aquático Ocoí ocorreu de forma mais expressiva para as datas: 26/12/2019, com amplitude térmica de 7,37°C; e 09/02/2019, com amplitude térmica de 7,34°C. Diante dessas amplitudes expressivas, em média 7,36°C, verificou-se novamente a ocorrência de plumas termais isoladas relacionadas a processos metabólicos desse ambiente aquático (Figura 34).

Além disso, a temperatura de superfície da água mais aquecida no setor leste do compartimento aquático Ocoí coincide com os locais de ocorrência das plumas termais. Em 26/12/2019, pode-se observar temperaturas mínima 24,2°C e máxima de 31,57°C, logo, amplitude térmica de 7,37°C; em 09/02/2019 registrou-se temperaturas mínima 25,90°C e máxima 33,24°C, logo, amplitude térmica de 7,34°C (Figura 34). Semelhantemente às análises do compartimento SFV, a temperatura da superfície da água no período do verão tende a ser

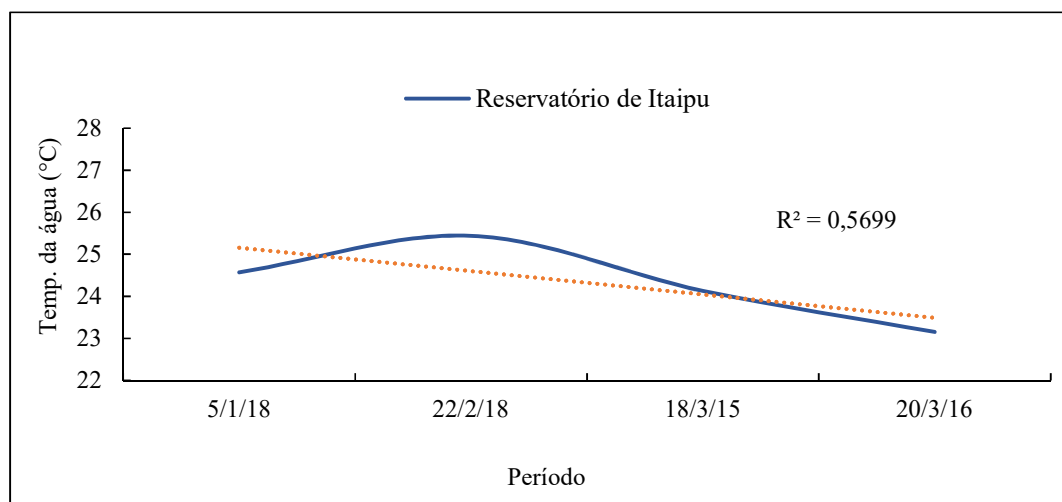
mais aquecida, mas a ausência de registros *in situ* no período correspondente à pesquisa comprometeu o desenvolvimento de um modelo que contemplasse temperaturas maiores e corrigisse tal incerteza. Além disso, a análise de apenas sete imagens de satélite deve-se ao efeito *sunlint* e a presença de nuvens constatado na maioria das cenas. Sobretudo, 71,4% dos períodos analisados apresentaram variabilidade térmica inferior a 2°C no compartimento aquático Ocoí.

Figura 34 – Variação espacial da TSAe no compartimento aquático Ocoí, período de Verão, 2013-2020



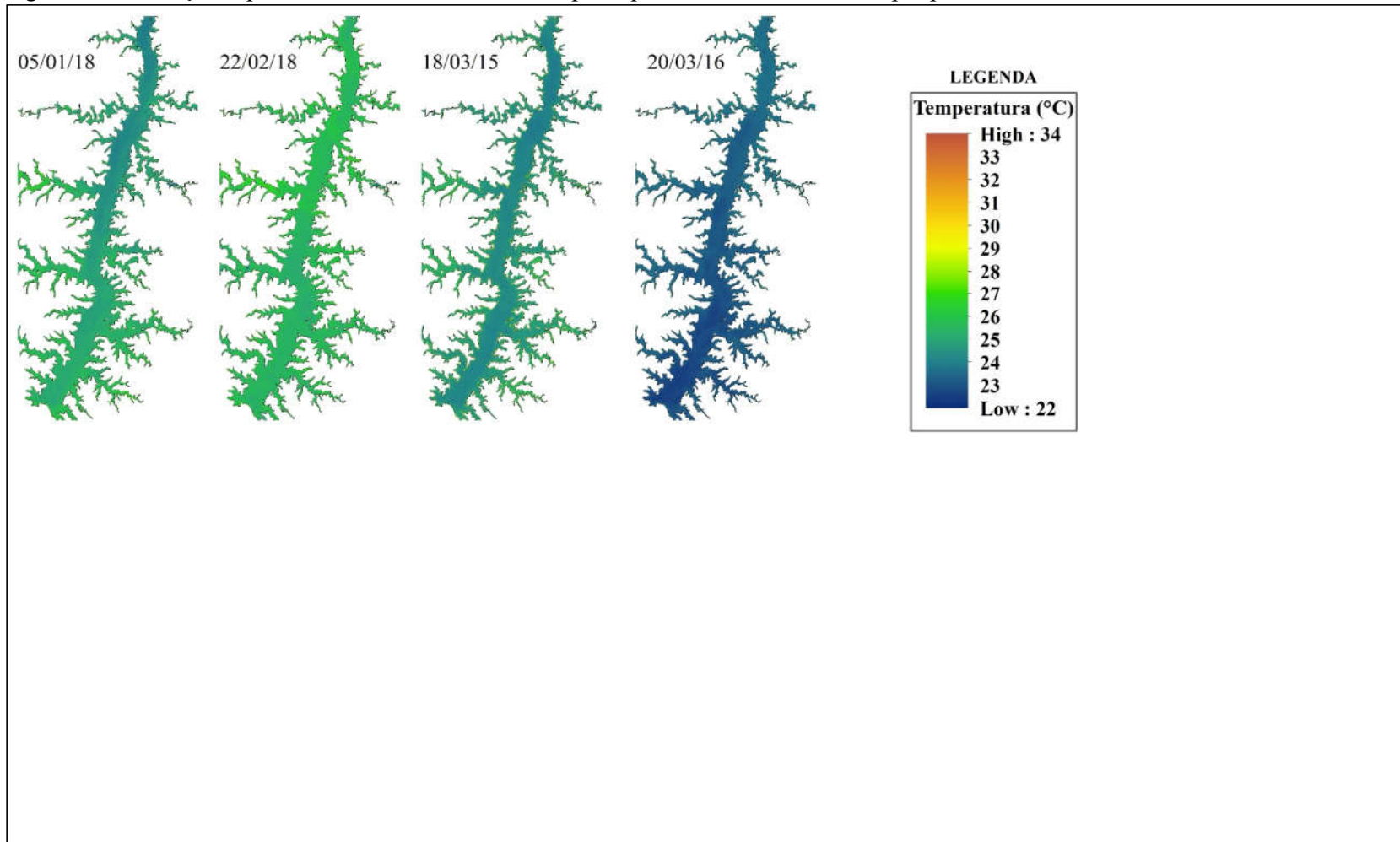
No período de verão na área central do reservatório de Itaipu observou-se que a variação temporal da TSAe (2013-2020) apresentou, no geral, maior temperatura da água em fevereiro (Figura 35). Nesse sentido, as médias da TSAe apresentaram valor crítico de referência de $r^2=0,56$. A análise de apenas 4 imagens pode ter comprometido esta análise de tendência de variação. Devido à presença de nuvens e efeito *sunlint* na água, na área do reservatório, os valores de TSAe foram desconsiderados na análise para as datas 25/12/2013, 26/12/2019, 10/01/2014, 06/02/2018 e 09/02/2019. Além disso, a implementação do modelo matemático, para melhorar a TSAe, também não foi aplicado devido o intervalo das temperaturas e ausência de trabalhos de campo naquele período.

Figura 35 – Variação temporal das médias da TSAe na área central do reservatório de Itaipu, período de Verão, 2013-2020



A variabilidade térmica das águas no leito principal do reservatório de Itaipu foi inferior a 1,5 °C para o período analisado. Não foram constatadas amplitudes térmicas expressivas e relacionadas a ocorrência de plumas termais. Notou-se, no entanto, alguns períodos com diferenças na temperatura de superfície da água entre o setor montante e jusante do curso principal do reservatório e no deságue de compartimentos aquáticos, a saber: 05/01/2018, com temperaturas mínima 23,8°C, máxima 25,3°C, logo, amplitude térmica de 1,5°C e 22/02/2018, com temperaturas mínima 24,9°C, máxima 26,11°C, logo, amplitude térmica 1,21°C. Sobretudo, identificou-se em média uma amplitude térmica geral de 1,23°C ao longo da área do reservatório de Itaipu (Figura 36).

Figura 36 – Variação espacial da TSAe na área no leito principal do reservatório de Itaipu, período de Verão, 2013-2020



4.3 EFEITO DA TSA NO RESERVATÓRIO DE ITAIPU

4.3.1 Período de Outono

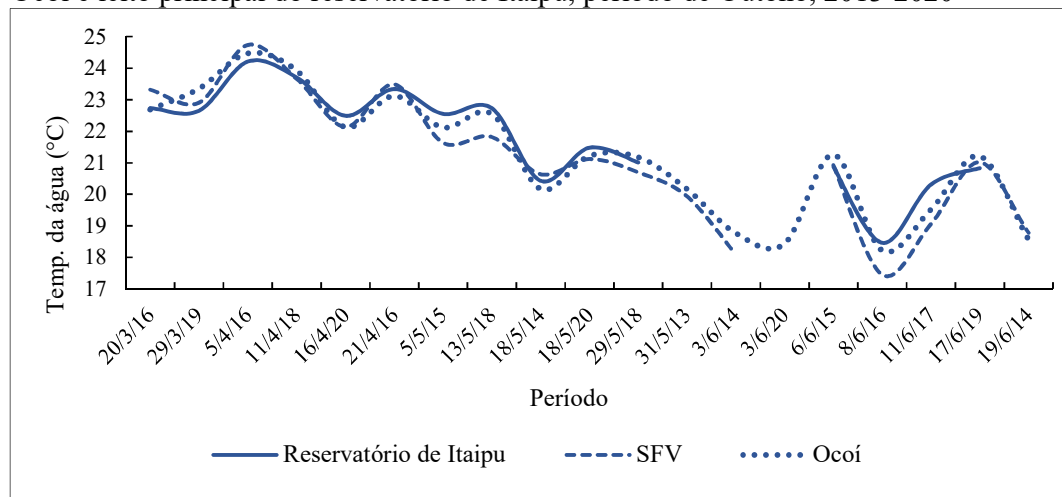
Diante da análise apresentada em detalhes anteriormente, esta seção destina-se a avaliação integrada das informações da TSAe abordadas nas áreas de estudo. Nesse sentido, observou-se que a variabilidade térmica da TSAe apresentou um padrão semelhante entre os três setores analisados, ou seja, maior aquecimento das águas entre os meses de março e abril e seu resfriamento gradativo a partir do mês de maio, com menores temperaturas de superfície registradas em junho. Ainda, é possível notar que as águas no reservatório de Itaipu sobressaem-se mais aquecidas em média 0,5°C, com uma média geral de 21,70°C. Os compartimentos SFV e Ocoí apresentaram médias próximas, 21,19°C e 21,21°C, respectivamente (Quadro 13, Figura 37).

Quadro 13 – Médias da TSAe, período de Outono, 2013-2020

Ordem	Data	SFV	Ocoí	Reservatório
1	20/3/16	23,32	22,69	22,73
2	29/3/19	22,91	23,35	22,65
3	05/4/16	24,74	24,47	24,21
4	11/4/18	23,67	23,93	23,71
5	16/4/20	22,14	22,13	22,49
6	21/4/16	23,49	23,12	23,34
7	05/5/15	21,64	22,12	22,55
8	13/5/18	21,82	22,55	22,73
9	18/5/14	20,64	20,17	20,43
10	18/05/20	21,12	21,22	21,48
11	29/5/18	20,70	21,18	21,01
12	31/5/13	19,94	20,17	*
13	03/6/14	18,09	18,77	19,39
14	03/06/20	*	18,44	*
15	06/6/15	20,93	21,26	20,87
16	08/6/16	17,45	18,22	18,46
17	11/6/17	19,06	19,52	20,31
18	17/6/19	21,02	21,21	20,83
19	19/6/14	18,78	18,56	*
Máxima		24,74	24,47	24,21
Mínima		17,45	18,22	18,46
Média Geral		21,19	21,21	21,70

*Datas com presença de nuvens na área do reservatório

Figura 37 – Variação temporal das médias da TSAe nos compartimentos aquáticos SFV, Ocoí e leito principal do reservatório de Itaipu, período de Outono, 2013-2020



Com base no Quadro 14 é possível observar a amplitude térmica entre as TSAe máxima e média registradas em cada data das imagens analisadas. A partir dessa diferença identificou-se os valores da temperatura da água que destoaram da média geral de cada setor analisado, evidenciando a presença de plumas termais. Assim, destacou-se com maiores amplitudes o compartimento aquático Ocoí nas datas 29/03/2019 (4,65°C), 16/04/2020 (2,66°C), 31/05/2013 (4,30°C), 06/06/2015 (4,34°C), 08/06/2016 (3,34°C), 11/06/2017 (3,88°C) e 17/06/2019 (4,45°C). Subsequentemente, o compartimento aquático SFV destacou-se com maiores amplitudes para as datas 05/05/2015 (3,59°C), 18/05/2014 (4,75°C), 18/05/2020 (4,08°C), 31/05/2013 (4,52°C), 03/06/2014 (2,44°C) e 17/06/2019 (4,25°C). A área do leito principal do reservatório não apresentou amplitudes da TSAe expressivas, conseqüentemente, também não registrou-se a ocorrência de plumas termais.

Quadro 14 – Amplitude térmica entre a TSAe máxima e média nos compartimentos aquáticos SFV, Ocoí e área central do reservatório de Itaipu, período de Outono, 2013-2020

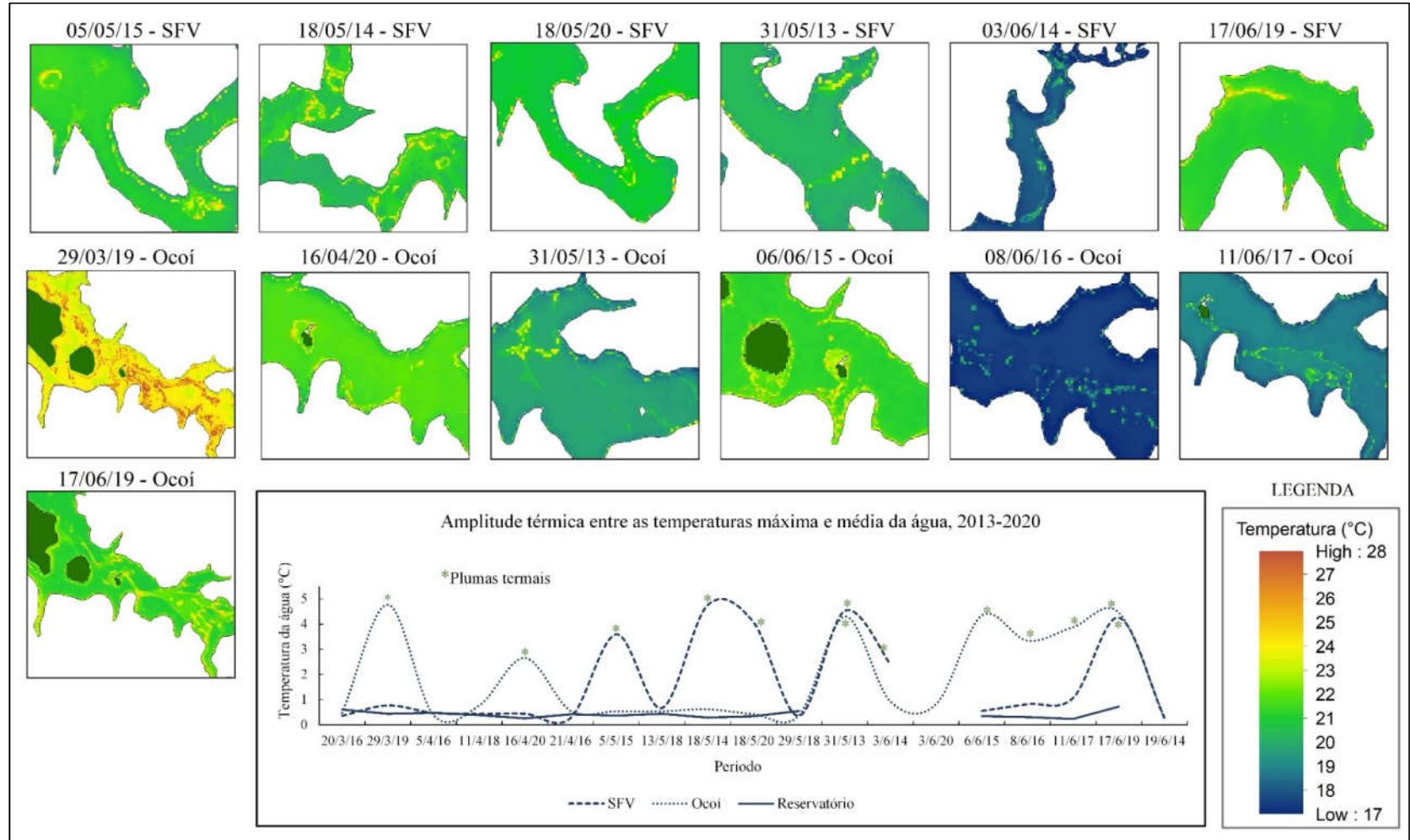
Ordem	Data	SFV	Ocoí	Reservatório
1	20/3/16	0,36	0,48	0,61
2	29/3/19	0,77	4,77	0,44
3	05/4/16	0,47	0,39	0,48
4	11/4/18	0,43	0,77	0,39
5	16/4/20	0,44	2,66	0,26
6	21/4/16	0,27	0,56	0,42

7	05/5/15	3,59	0,54	0,37
8	13/5/18	0,67	0,54	0,44
9	18/5/14	4,75	0,62	0,29
10	18/5/20	4,08	0,43	*
11	29/5/18	0,36	0,38	0,55
12	31/5/13	4,52	4,3	0,39
13	03/6/14	2,4	0,93	0,65
14	06/6/20	*	0,82	*
15	06/6/15	0,55	4,34	0,35
16	08/6/16	0,82	3,34	0,31
17	11/6/17	1,07	3,88	0,24
18	17/6/19	4,25	4,45	0,73
19	19/6/14	0,25	0,3	0,43
Máxima		4,75	4,65	0,73
Mínima		0,25	0,30	0,24
Média geral		1,67	1,81	0,43

*Datas com presença de nuvens na área do reservatório

Ainda, verificou-se a ocorrência de plumas termais em todo o período do outono, com maior recorrência para os meses de junho e, sequencialmente, maio, principalmente no compartimento aquático Ocoí. Pode-se afirmar, portanto, que o compartimento aquático Ocoí mostrou tendência na ocorrência de plumas termais principalmente para o mês de junho, enquanto o compartimento SFV para o mês de maio, com uma média de 4°C de amplitude entre as TSAe do compartimento aquático e os locais de ocorrência das plumas termais. Em 29/03/2019 o compartimento Ocoí registrou a maior amplitude térmica, 4,65°C. Já o compartimento aquático SFV apresentou a maior amplitude térmica em 18/05/2014 com 4,75°C. Destaca-se também que as datas 31/05/2013 e 17/06/2019 apresentaram para ambos os compartimentos a presença dessas plumas termais (Figura 38).

Figura 38 – Espacialização temporal de plumas termais nos compartimentos aquáticos SFV e Ocoí, 2013-2020



4.3.2 Período de Inverno

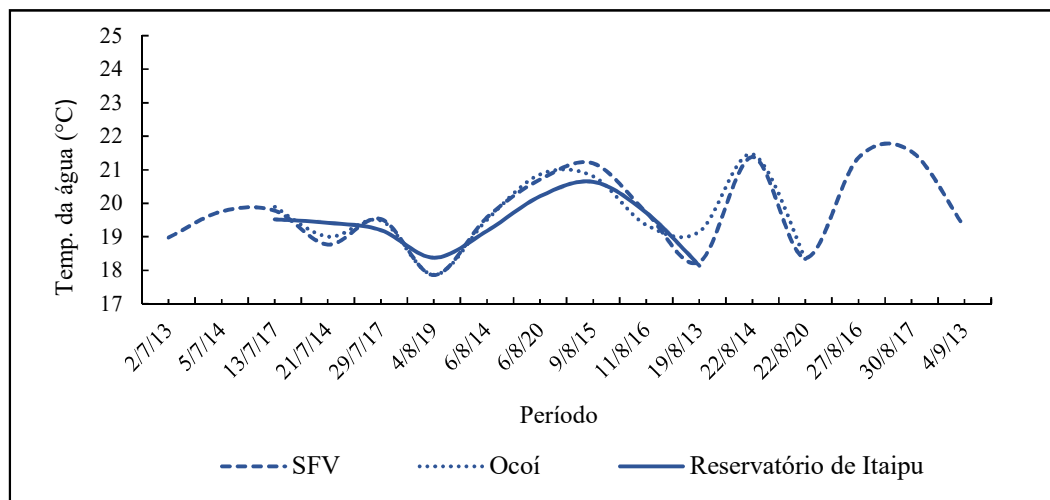
Observou-se que a variabilidade térmica da TSAe apresentou um padrão semelhante entre os três setores analisados, ou seja, variações amenas para o mês de julho e oscilações mais expressivas entre os meses de agosto e setembro. Ainda, é possível notar que as águas no reservatório de Itaipu apresentam temperaturas mais frias em média 0,55 °C se comparadas aos demais setores analisados. Os compartimentos SFV e Ocoí apresentaram médias próximas, 19,91°C e 19,65°C, respectivamente (Quadro 15, Figura 39).

Quadro 15– Médias da TSAe, período de Inverno, 2013-2020

Ordem	Data	SFV	Ocoí	Reservatório
1	2/7/13	18,98	18,98	19,06
2	5/7/14	19,76	*	*
3	13/7/17	19,78	19,89	19,52
4	21/7/14	18,77	19,00	19,42
5	29/7/17	19,53	19,48	19,20
6	4/8/19	17,86	17,86	18,38
7	6/8/14	19,58	19,51	19,18
8	6/8/20	20,71	20,86	20,21
9	9/8/15	21,19	20,80	20,64
10	11/8/16	19,73	19,35	19,72
11	19/8/13	18,25	19,15	18,14
12	22/8/14	21,38	21,38	*
13	22/8/20	18,37	18,32	18,73
14	27/8/16	21,36	*	*
15	30/8/17	21,54	20,81	*
16	4/9/13	19,28	*	18,20
Máxima		21,54	21,46	20,64
Mínima		17,86	17,86	18,14
Média Geral		19,91	19,65	19,32

*Dadas com presença de nuvens na área de estudo

Figura 39 – Variação temporal das médias da TSAe nos compartimentos aquáticos SFV, Ocoí e área do leito principal do reservatório de Itaipu, período de Inverno, 2013-2020



Ao analisar o Quadro 16 é possível observar a amplitude térmica entre as TSAe máxima e média registradas em cada data das imagens de satélite analisadas. A partir dessa diferença identificou-se os valores da temperatura da água que destoaram da média geral de cada setor analisado, evidenciando a presença de plumas termais. Assim, destacou-se com maiores amplitudes o compartimento aquático Ocoí nas datas 13/07/2017 (3,05°C), 29/07/2017 (3,95°C), 06/08/2020 (4,80°C), 11/08/2016 (3,35°C), 19/08/2013 (5,42°C), 22/08/2014 (5,22°C), 22/08/2020 (3,66°C) e 30/08/2017 (3,45°C). Subsequentemente, o compartimento aquático SFV destacou-se com maiores amplitudes para as datas 04/08/2019 (4,14°C) e 22/08/2020 (4,11°C). A área do leito principal do reservatório não apresentou amplitudes da TSAe expressivas, consequentemente, também não foi observado a ocorrência de plumas termais.

Quadro 16 – Amplitude térmica entre a TSAe máxima e média nos compartimentos aquáticos SFV, Ocoí e área do leito principal do reservatório de Itaipu, período de Inverno, 2013-2020

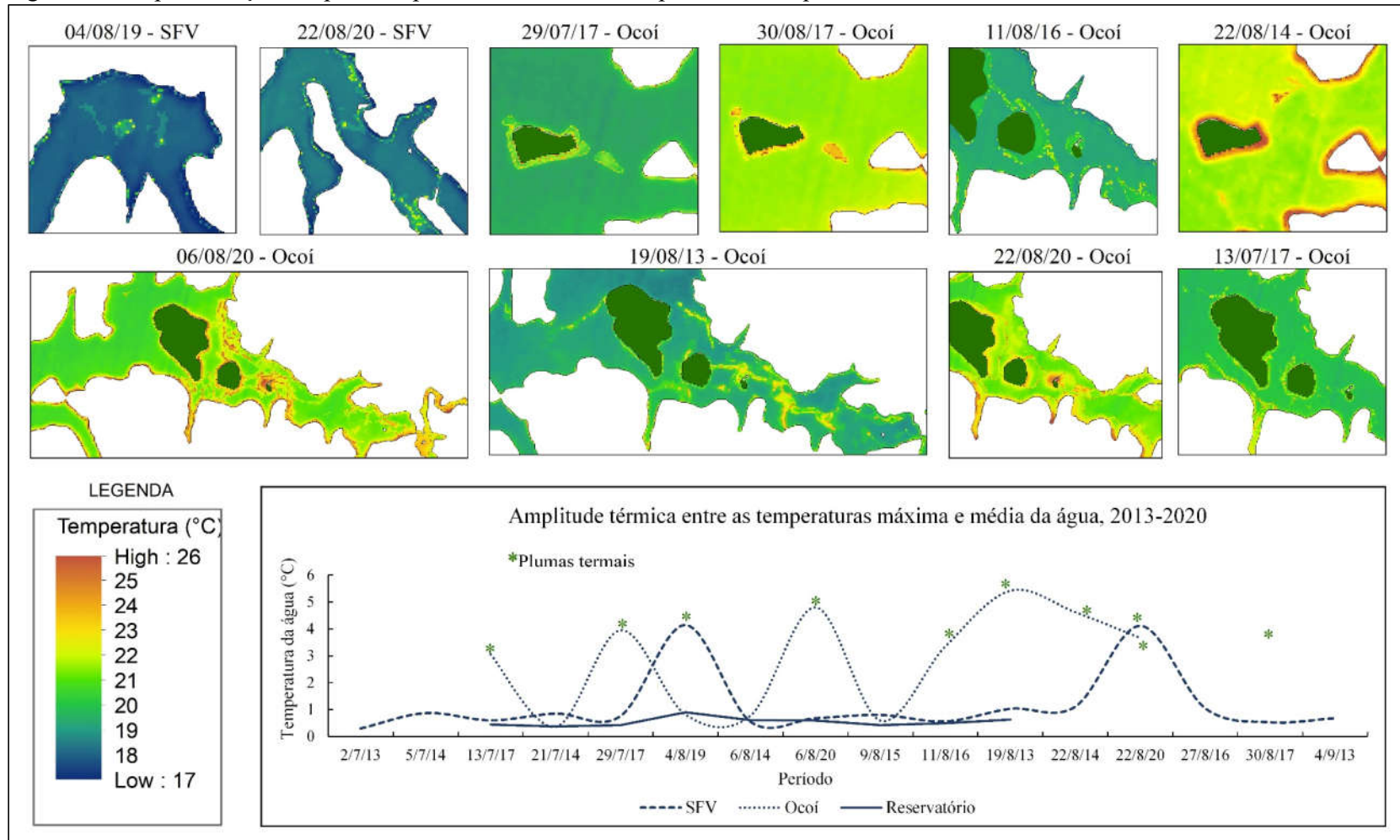
Ordem	Data	SFV	Ocoí	Reservatório
1	2/7/13	0,30	0,22	0,39
2	5/7/14	0,87	*	*
3	13/7/17	0,60	3,05	0,44
4	21/7/14	0,85	0,36	0,37
5	29/7/17	0,76	3,95	0,42
6	4/8/19	4,14	0,81	0,90
7	6/8/14	0,55	0,78	0,61
8	6/8/20	0,68	4,80	0,59

9	9/8/15	0,80	0,59	0,42
10	11/8/16	0,56	3,35	0,49
11	19/8/13	1,03	5,42	0,63
12	22/8/14	1,11	4,62	*
13	22/8/20	4,11	3,66	0,78
14	27/8/16	1,05	*	*
15	30/8/17	0,53	3,45	*
16	4/9/13	0,68	*	0,83
Máxima		4,14	5,42	0,90
Mínima		0,30	0,22	0,37
Média Geral		1,16	2,70	0,57

*Datas com presença de nuvens na área de estudo

Com base na Figura 40 é possível observar a ocorrência de plumas termais em todo o período do inverno, porém, com maior recorrência para o mês de agosto, principalmente no compartimento aquático Ocoí. As plumas termais registradas nas imagens 29/07/2017 e 30/08/2017 consistem em bancos de macrófitas aquáticas, com padrão espacial distinto das florações de algas. Ainda, a imagem do dia 11/08/2016 apresenta bancos de macrófitas aquáticas e florações de algas. Pode-se afirmar, portanto, que o compartimento aquático Ocoí mostrou tendência na ocorrência de plumas termais principalmente para o mês de agosto, com uma média de 4°C de amplitude entre as TSAe do compartimento aquático e os locais de ocorrência das plumas termais. Em 19/08/2013 o compartimento Ocoí registrou a maior amplitude térmica, 5,42°C. Já o compartimento aquático SFV apresentou a maior amplitude térmica em 04/08/2019 com 4,14°C. Destaca-se também que na data 22/08/2020 ambos os compartimentos apresentaram plumas termais.

Figura 40 – Espacialização temporal de plumas termais nos compartimentos aquáticos SFV e Ocoí, 2013-2020



4.3.3 Período de Primavera

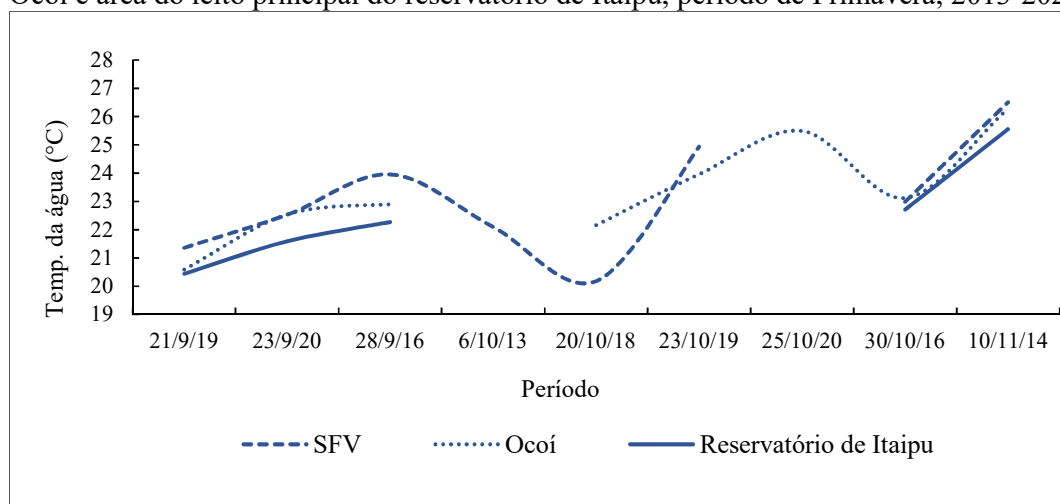
Neste período observou-se que a variabilidade térmica da TSAe apresentou, no geral, um padrão semelhante entre os três setores analisados, com variações mais frias para o mês de setembro, aumentando gradativamente a partir de outubro. Já as águas no reservatório de Itaipu apresentaram temperaturas mais frias em média 0,53 °C se comparadas aos demais setores analisados. Os compartimentos SFV e Ocoí apresentaram médias próximas, 23,07°C e 23,38°C, respectivamente (Quadro 17, Figura 41).

Quadro 17 – Médias da TSAe, período de Primavera, 2013-2020

Ordem	Data	SFV	Ocoí	Reservatório
1	21/9/19	21,36	20,59	20,44
2	23/9/20	22,53	22,54	21,59
3	28/9/16	23,96	22,9	22,27
4	6/10/13	22,10	*	*
5	20/10/18	20,18	22,16	*
6	23/10/19	24,94	23,96	23,63
7	25/10/20	*	25,49	*
8	30/10/16	22,99	23,12	22,71
9	10/11/14	26,51	26,28	25,56
Máxima		26,51	26,28	25,56
Mínima		20,18	20,59	20,44
Média geral		23,07	23,38	22,70

*Datas com presença de nuvens na área de estudo

Figura 41 – Variação temporal das médias da TSAe nos compartimentos aquáticos SFV, Ocoí e área do leito principal do reservatório de Itaipu, período de Primavera, 2013-2020



Com base no Quadro 18 é possível observar a amplitude térmica entre as TSAe máxima e média registradas em cada data das imagens de satélite analisadas. A partir dessa diferença identificou-se os valores da temperatura da água que destoaram da média geral da TSAe de cada setor analisado, evidenciando a presença de plumas termais no compartimento aquático Ocoí (datas 28/09/2016 com 4,74°C e 20/10/2018 com 20,39°C de diferença). O compartimento aquático SFV e a área do leito principal do reservatório não apresentaram amplitudes da TSAe expressivas, conseqüentemente, também não foi observado a ocorrência de plumas termais.

Quadro 18 – Amplitude térmica (°C) entre a TSAe máxima e média nos compartimentos aquáticos SFV, Ocoí e área do leito principal do reservatório de Itaipu, período de Primavera, 2013-2020

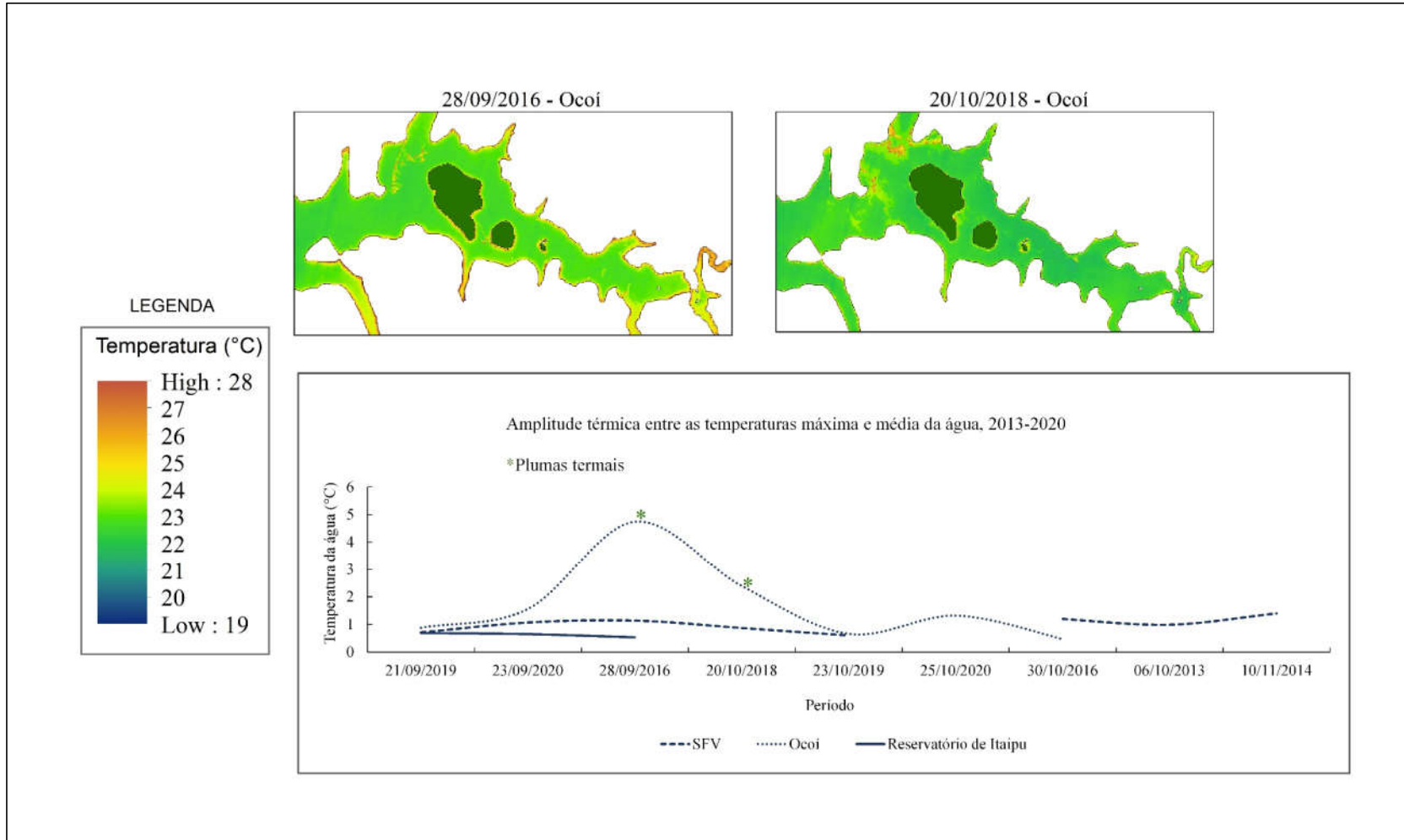
Ordem	Data	SFV	Ocoí	Reservatório
1	21/9/19	0,71	0,88	0,69
2	23/9/20	1,07	1,56	0,65
3	28/9/16	1,14	4,74	0,53
4	6/10/13	0,99	*	*
5	20/10/18	0,87	2,39	*
6	23/10/19	0,60	0,66	0,64
7	25/10/20	*	1,32	*
8	30/10/16	1,20	0,47	0,54
9	10/11/14	1,40	1,70	0,85
Máxima		1,40	4,74	0,85

Mínima	0,60	0,47	0,53
Média geral	1,00	1,72	0,65

*Datas com presença de nuvens na área de estudo

Com base na Figura 42 é possível observar a ocorrência de plumas termais nos meses de setembro e outubro no compartimento aquático Ocoí. Apesar do número limitado de imagens de satélite analisadas neste período de primavera, pode-se afirmar que o compartimento aquático Ocoí mostrou tendência na ocorrência de plumas termais com uma média de 3,57°C de amplitude entre as TSAe do compartimento aquático e os locais de ocorrência das plumas termais. A maior amplitude térmica foi registrada em 28/09/2016, com 4,74°C.

Figura 42 – Espacialização temporal de plumas termais no compartimento aquático Ocoí, 2013-2020



4.3.4 Período de verão

Observou-se que a variabilidade térmica da TSAe apresentou um padrão semelhante entre os três setores analisados, ou seja, variações mais expressivas para o mês de fevereiro, com temperaturas maiores. Ainda, é possível notar que as águas no reservatório de Itaipu apresentam temperaturas mais frias em média 0,75°C se comparadas aos demais setores analisados. Os compartimentos SFV e Ocoí apresentaram médias próximas, 25,01°C e 25,13°C, respectivamente (Quadro 19, Figura 43).

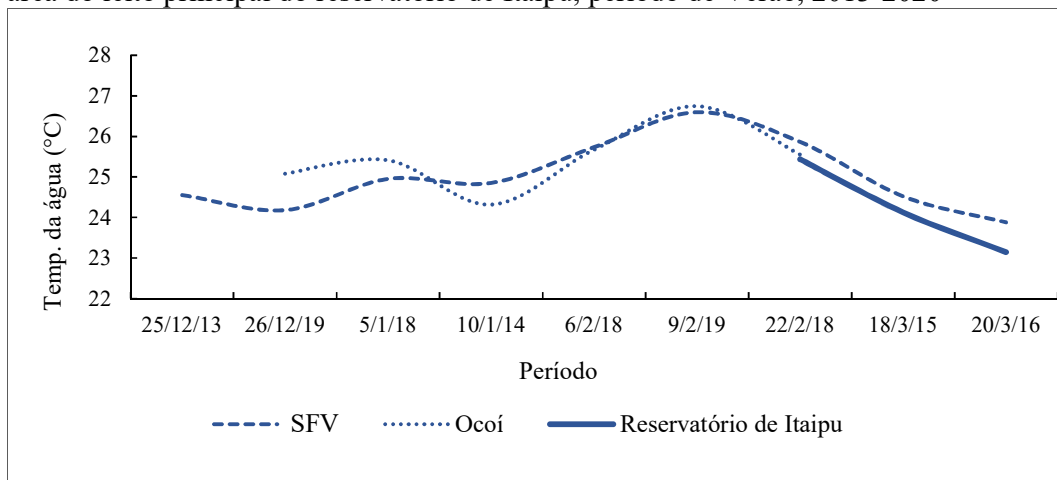
Quadro 19 – Médias da TSAe, período de Verão, 2013-2020

Ordem	Data	SFV	Ocoí	Reservatório
1	25/12/2013	24,55	**	*/**
2	26/12/2019	24,18	25,08	*
3	05/01/2018	24,95	25,41	24,57
4	10/01/2014	24,85	24,32	*
5	06/02/2018	25,73	25,67	*
6	09/02/2019	26,59	26,74	*
7	22/02/2018	25,86	25,55	25,44
8	18/03/2015	24,52	*	24,13
9	20/03/2016	23,88	23,14	23,15
Máxima		26,59	26,74	25,44
Mínima		23,88	23,14	23,15
Média Geral		25,01	25,13	24,32

*Dadas com a presença de nuvens na área de estudo

**Dadas com a presença do efeito *sunlint* na imagem de satélite

Figura 43 – Variação temporal das médias da TSAe nos compartimentos aquáticos SFV, Ocoí e área do leito principal do reservatório de Itaipu, período de Verão, 2013-2020



No Quadro 20 é possível observar a amplitude térmica entre as TSAe máxima e média registradas em cada data das imagens de satélite analisadas. A partir dessa diferença identificou-se os valores da temperatura da água que destoaram da média geral de cada setor analisado, evidenciando a presença de plumas termais em alguns compartimentos. Desse modo, destacou-se com maiores amplitudes o compartimento aquático Ocoí nas datas 26/12/2019 (6,49°C) e 09/02/2019 (3,45°C). Subsequentemente, o compartimento aquático SFV também destacou-se com maior amplitude térmica na data 09/02/2019 (5,20°C). A área do leito principal do reservatório não apresentou amplitudes da TSAe expressivas, conseqüentemente, também não foi observado a ocorrência de plumas termais.

Quadro 20 – Amplitude térmica entre a TSAe máxima e média nos compartimentos aquáticos SFV, Ocoí e área do leito principal do reservatório de Itaipu, período de Verão, 2013-2020

Ordem	Data	SFV	Ocoí	Reservatório
1	25/12/2013	1,67	**	*/**
2	26/12/2019	1,02	6,49	*
3	05/01/2018	0,65	1,01	0,73
4	10/01/2014	0,77	1,38	*
5	06/02/2018	0,68	0,95	*
6	09/02/2019	5,20	6,5	*
7	22/02/2018	0,65	0,46	0,67
8	18/03/2015	0,58	*	0,37
9	20/03/2016	0,42	0,56	0,65
Máxima		5,20	6,50	0,73

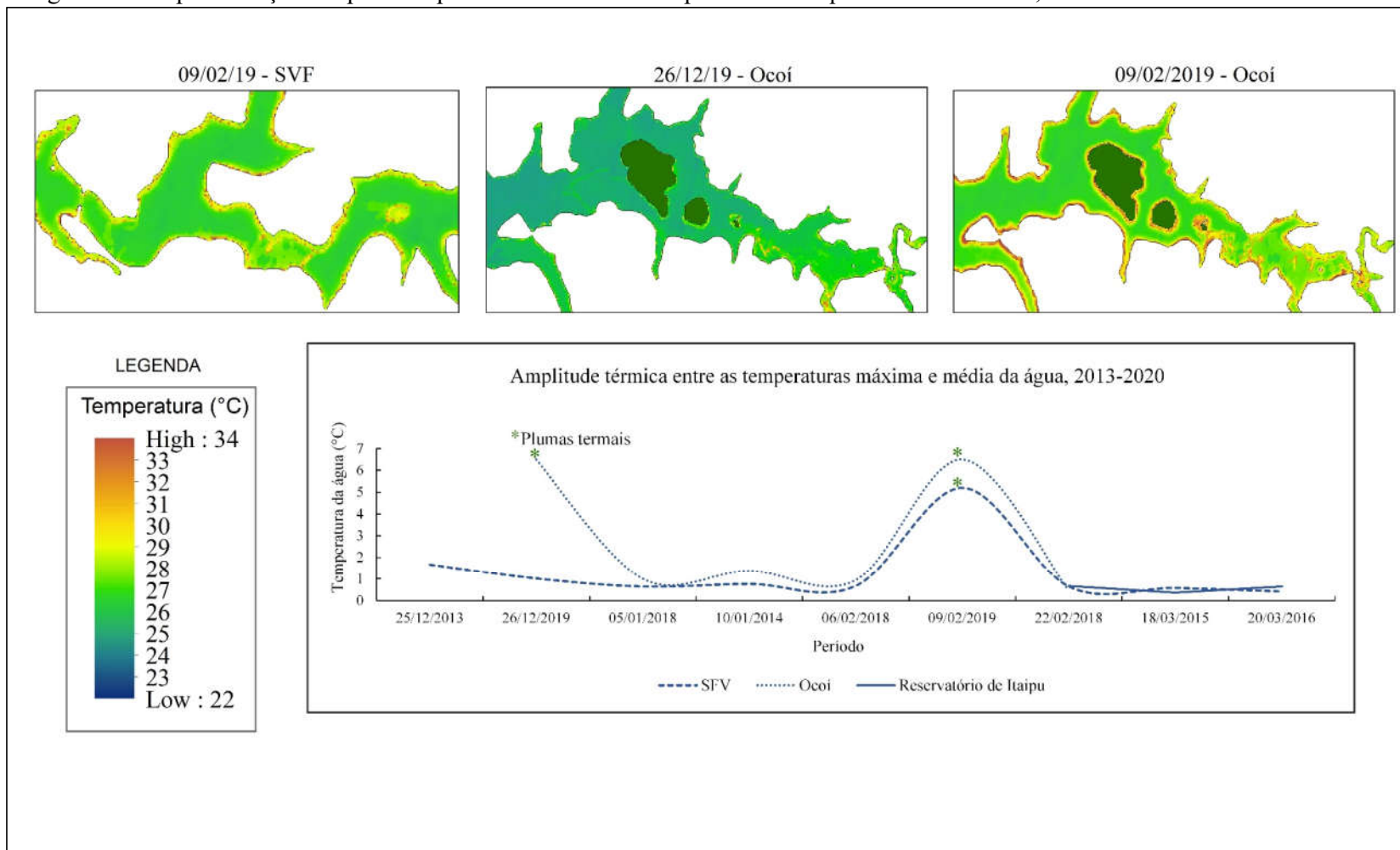
Mínima	0,42	0,46	0,37
Média Geral	1,29	2,48	0,61

*Datas com a presença de nuvens na área de estudo

**Datas com a presença do efeito *sunglint* na imagem de satélite

Com base na Figura 44 é possível observar a ocorrência de plumas termais para os meses de dezembro e fevereiro no compartimento aquático Ocoí. No compartimento SFV, apenas em fevereiro. Desse modo, não se pode-se afirmar tendências nas ocorrências de plumas termais com o número limitado de imagens de satélite analisadas, porém, sabe-se que o compartimento aquático Ocoí mostrou uma média de 2,48°C de amplitude entre as TSAe do compartimento aquático e os locais de ocorrência das plumas termais observadas. Ainda, em 09/02/2019 o compartimento Ocoí registrou a maior amplitude térmica, 6,50°C. Ademais, ambos os compartimentos, SFV e Ocoí, apresentaram plumas termais em 09/02/2019.

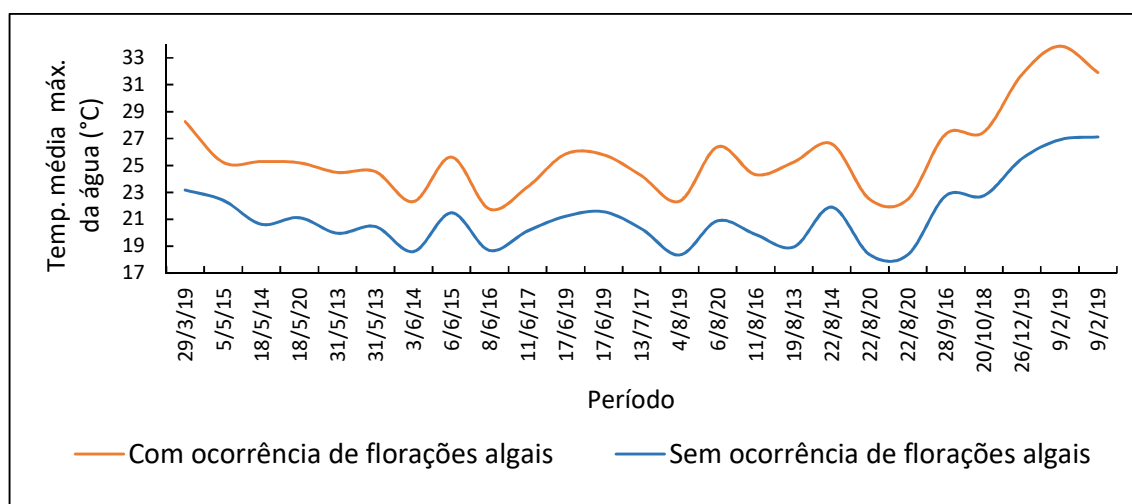
Figura 44 – Espacialização temporal de plumas termais nos compartimentos aquáticos SFV e Ocoí, 2013-2020



4.3.5 Considerações sobre o efeito da TSA no reservatório de Itaipu

A presença das plumas termais em locais de florações de algas, dado o período analisado nas áreas de estudo, tem promovido impactos ainda maiores na amplitude térmica média da TSA. O teste-*t* pareado indicou a média das diferenças maior que zero (4,51°C) a um nível de confiança de 95% e a correlação de *Pearson* estatisticamente significativa com $r=0,97$, (Figura 45).

Figura 45 – Impacto na temperatura de superfície da água



Fonte: Organizado pela autora a partir de dados de TSA extraídos nas imagens de satélite Landsat 8

Além disso, o impacto termal decorrente da presença de plumas termais observado nos compartimentos aquáticos é muito maior que na área do reservatório, onde nenhum episódio de florações de algas foi identificado. O compartimento aquático Ocoí apresentou maior tendência na recorrência das plumas termais em junho e agosto e o compartimento SFV em maio. No geral, o outono é o período mais propício para o desenvolvimento das florações, dada as variações significativas na TSAe. Embora o período de primavera não tenha se destacado com florações, principalmente pela restrição de imagens com boa qualidade para a análise, certamente tem um cenário semelhante ao outono em relação a ocorrência dos eventos de florações.

5. INTEGRAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 SENSORIAMENTO REMOTO DA TSA A PARTIR DA GERAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE REGRESSÃO

O sensoriamento remoto da temperatura superficial da água a partir de medições da radiação TIR, já bem estabelecidas na literatura com diversos métodos, diferentes sensores e resoluções aplicadas em contextos morfológicos variados, podem apresentar estimativas a partir de modelos de regressão com REMQ entre 0,5°C e 2°C (SCHNEIDER e MAUSER, 1996; WLOCZYK et al., 2006; HANDCOCK et al., 2006; WAWRZYNIAK, PIE'GAY e POIRE, 2011; FRICKE e BASCHEK, 2013; LAMARO et al., 2013; SIMON, TORMOS e DANIS, 2014; LOPES et al., 2014; ALLAN et al., 2016; PICCOLROAZ et al., 2016; LING et al., 2017; PRATS et al., 2018; SCHAEFFER et al., 2018; TAVARES, 2019; SHARAF et al, 2019). Neste estudo, no reservatório de Itaipu, a TSAe apresentou um REMQ de 0,8°C concordante com o intervalo de erros relatados nesta literatura e, nesse sentido, pode ser considerado satisfatório. A maior parte das amostras dos resíduos, 72,72%, apresentaram valores da TSA menores ou iguais a 0,8°C.

Adicionalmente à esta análise, a relação entre as amostras pareadas (dados da TSAi e TSAs) apresentou forte coeficiente de correlação ($r=0,95$) e coeficiente de determinação ($r^2=0,90$) semelhante a outras abordagens consultadas na literatura. A exemplos: a) a avaliação dos valores estimados e observados das temperaturas superficiais da água em imagens Landsat 7 ETM + no reservatório de *Embalse del RíoTercero*, em Córdoba, na Argentina, desenvolvido por Lamaro et al (2013) revelou coeficientes de determinação de 0,94 e 0,95 e erro padrão de 1,22°C e 1,04°C, respectivamente; b) o estudo de recuperação e validação da TSA em imagens Landsat para dois reservatórios de água doce na França desenvolvido por Simon, Tormos e Danis (2014) mostrou valores de coeficientes de determinação acima de 0,90 e REMQ de 1 a 2°C entre a TSAi e TSAe; c) estudo de estimativas da TSA de campo a partir da banda térmica do Landsat 7 ETM + no rio Qingjiang, afluente de primeira ordem do rio Yangtze a jusante do reservatório das Três Gargantas na província de Hubei, China Central, desenvolvido por Ling et al (2017) apresentou coeficiente de determinação de 0,92 e REMQ de 1,07°C; e d) Sharaf et al (2019) testaram diversos métodos de correção e recuperação de valores da TSA em imagens Landsat no reservatório Karaoun, no Líbano e constataram na validação dos dados coeficientes

de correlação na ordem de 0,95, 0,97, 0,96, 0,92 e REMQ 0,94, 0,73, 0,89, 1,23, respectivamente.

Em relação a concordância e precisão do modelo gerado o resultado evidenciou um bom desempenho da TSAe, dado o Índice de Willmott (d)=0,97 (acima de 0,75 é considerado satisfatório, WILLMOTT et al (1985)) e o coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NSE)= 0,89 (precisão perfeita próxima a 1, NASH e SUTCLIFFE (1970)). Durante a realização da pesquisa de literatura encontrou-se abordagens com resultados semelhantes. Estudo de caracterização da qualidade das águas no reservatório Orós no Ceará a partir da geração de modelos, desenvolvido por Lopes et al (2014), revelou Índices de *Willmott* (d) = 0,79, 0,89, 0,68 e 0,53; e Coeficientes de *Nash e Sutcliffe* (NSE) = 0,42, 0,81, 0,44 e 0,76. Piccolroaz et al (2016) durante investigação com modelos que simularam a temperatura da água, em diferentes regimes hidrológicos e escalas de tempo, revelaram valores médios de NSE e REMQ de 0,49°C e 0,84°C, respectivamente.

Este nível de concordância verificado entre os dados obtidos e aqueles evidenciados na literatura pesquisada mostra que o modelo de regressão gerado apresentou desempenho aceitável mediante os índices aplicados (para a TSA em um intervalo de 15C° a 25C°), ainda que com algumas limitações de abordagem na área de estudo. Na prática, a precisão da TSAe e melhor ajuste do modelo podem ter sido afetados: a) pela resolução espacial das imagens; b) frequência amostral dos dados; c) sazonalidade dos dados; e d) métodos de correção e recuperação da TSAe, detalhadamente discutidos a seguir.

a) Sabe-se que a composição dos pixels da água podem ter influência de banco de materiais, por contaminação do pixel por efeito de borba, principalmente do entorno terrestre da planície de inundação do reservatório e, nesse sentido, é importante que a recuperação e análise da TSA seja realizada em imagens de satélite com, no mínimo, três pixels puros (HANDCOCK, 2006 e WAWRZYNIAK, PIEGAY e POIREL, 2011). Dada a resolução espacial de 30 m nas imagens termais utilizadas, a área de estudo desta abordagem apresentou, de fato, larguras mínimas que satisfazem tal recomendação, a saber: a) 2km (aprox.) para a área do reservatório (verificada a seu alto curso) e b) 250 m (aprox.) para as áreas dos compartimentos aquáticos SFV e Ocoí. Ainda assim, esforços para a integração de dados derivados de outros sensores com melhor resolução espacial, a exemplo de sistemas TIRS a partir de drones, apresentam uma alternativa potencialmente promissora (DEMARIO et al, 2017; DUGDALE et al, 2019) e podem proporcionar medidas da TSAe mais precisas e um modelo de regressão melhor ajustado.

b) Um grande número de observações da TSAi pode favorecer substancialmente a validação de modelos de regressão. Todavia, medidores de TSAi ao longo das massas d'água são, na prática, frequentemente escassos (LING et al., 2017). Somada a esta limitação, a pesquisa em questão apresentou frequência amostral reduzida em cada missão decorrente do intervalo de tempo adotado para a seleção da TSAi, compreendido entre 08h58min e 11h00min. Tal critério de seleção é justificado pelo fato de que após esse intervalo de tempo, processos de troca de energia entre a água e a atmosfera podem ocasionar diferenças maiores entre as temperaturas de superfície (chamada de temperatura da pele - *skin temperature*, próximo dos 100 m superiores) e a temperatura total da água. Tal constatação foi confirmada por Schneider e Mauser (1996) em um estudo no Lago Constança, na Europa Central, com medições diárias, a cada 10 minutos, entre os meses de maio e novembro de 1989. Esses autores demonstraram que a diferença entre as temperaturas da superfície (*skin temperature*) e de profundidade (próximo de 0,5 m de profundidade) são mínimas entre o intervalo das 09h:00min e 11h:00min. Além disso, o intervalo de tempo selecionado para a coleta da TSAi (08h:58min e 11h:00min) é próximo do horário de aquisição de imagens pelo Landsat 8 na área deste estudo (10h35min). Diante destes critérios para a seleção das amostras, restaram 37 registros da TSAi de distribuição normal para a geração do modelo, constituídas em 8 missões representativas no tempo. Os grupos das amostras da TSAi adquiridas após às 11h00min não cumpriram a suposição de normalidade ($p\text{-valor} < 0,05$) e, assim, não seriam indicados para gerar estimativas e testes de hipóteses paramétricos. Nesses termos, a realização dos registros da TSAi em horários próximo da passagem do satélite e que represente todo o setor do compartimento aquático pode proporcionar maior confiabilidade do modelo de regressão.

c) A amostragem da TSAi não ocorreu para o período do verão, pois a logística dos trabalhos de campo concentrou a maioria das coletas de dados no outono e inverno, (6 dos 8 campos realizados). Condições climáticas desfavoráveis (presença de nuvens e vento) também contribuíram para a restrição da coleta de dados da TSAi nas demais estações do ano. Normalmente, tais períodos apresentam intensidade de vento suficiente para ocasionar a instabilidade do barco e o efeito *sun glint* na água, comprometendo a qualidade da imagem de satélite (informações da Fundação Parque Tecnológico da Itaipu, FPTI-BR, 2020). O *glint*, ocasionado pela reflexão da radiação solar direta (*sun glint*) na água, é condicionado diretamente à turbulência da superfície da água e a agitação da superfície do corpo d'água está ligada à velocidade do vento, logo, assume-se que o *glint* está ligado à velocidade do vento. Por fim, o efeito *sun glint* na água influencia diretamente no espalhamento especular medido pelo sensor do satélite. De forma semelhante, tem-se o efeito *sky glint* (ou luz difusa do céu) que pode

proporcionar a radiação especular na superfície da água e interferir na qualidade dos dados (BARBOSA, NOVO e MARTINS, 2019). Dadas tais restrições de logística e condições climáticas, a sazonalidade dos dados da TSAi não contemplou registros no período de verão e o modelo de regressão gerado apresentou intervalo de 15° a 25°C. Portanto, imagens de satélite da área de estudo com estimativas da TSA superiores a este intervalo, normalmente encontradas no período de verão, não são indicadas para a implementação desse modelo.

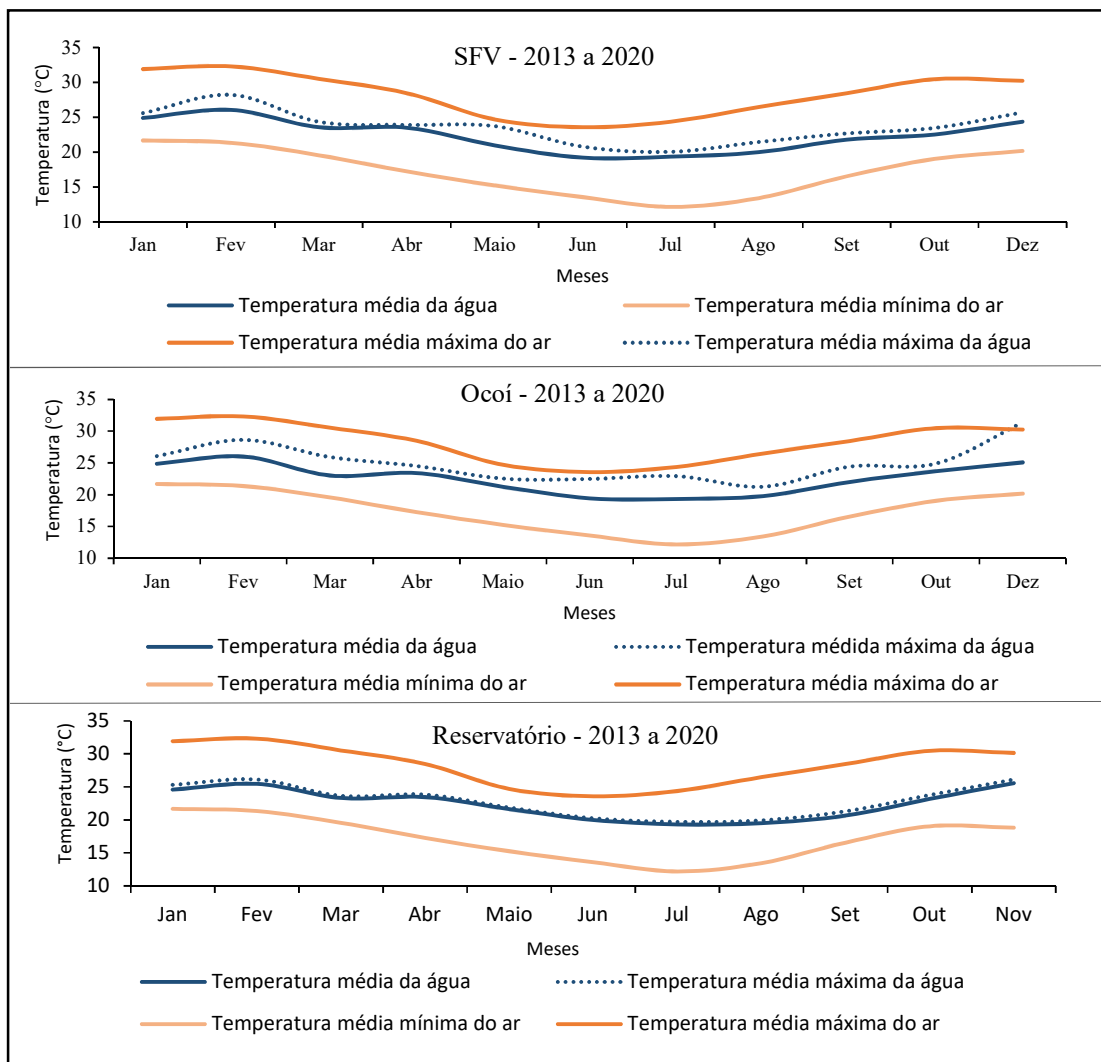
d) A recuperação mais precisa de dados da TSAe envolve a correção de dois parâmetros muito importantes nas imagens termais: a emissividade e os efeitos atmosféricos. No caso da água, a emissividade se aproxima de um corpo negro nos comprimentos de onda de 10–12 μm , mas pode variar conforme a temperatura, a salinidade, a turbidez e a concentração de ácido húmico (HANDCOCK et al., 2012) e, por isso, importante corrigi-las nas imagens. Da mesma forma, a radiação emitida pela atmosfera não é a mesma que chega ao sensor, pois recebe influência, principalmente, do vapor d'água (JIMÉNEZ-MUÑOZ e SOBRINO, 2003) e, nesse sentido, a correção dos efeitos da atmosfera pode reduzir influências e, conseqüentemente, os erros presentes nas estimativas da TSA. No entanto, os algoritmos para a correção desses efeitos da atmosfera são amplamente aplicados em estudos da temperatura de superfície do mar e pouco explorados em águas interiores. Além disso, as equações de correção são sensíveis aos parâmetros de entrada, os quais nem sempre estão disponíveis ou apresentam estimativas menos precisas (TAVARES, 2019). Assim, a dificuldade de acesso aos parâmetros de entrada e com boa precisão para a remoção dos efeitos atmosféricos nas imagens termais pode proporcionar erros de até 2°C nas estimativas, conforme mostra o estudo de Kay et al. (2005). De fato, dado a diferença entre a variável resposta observada (TSAi) e a variável estimada (TSAe) neste estudo, obteve-se resíduos distribuídos aleatoriamente entre -1,18 e 1,58 e REMQ de 0,8°C.

Indubitavelmente o modelo gerado pode ser melhorado sob diversos aspectos, como já mencionados. Outra importante consideração, adicionalmente, é a análise temporal da TSAe. Afinal, obteve-se disponível e apta à análise neste estudo um pouco mais de 6 cenas durante o ano, totalizando 52 imagens entre 2013 e 2020. A cobertura de nuvens e o efeito *sunlint* foram os principais fatores que comprometem a qualidade das imagens. No dia 17/02/2016, por exemplo, a campanha de campo ocorreu, mas a presença de nuvens na área de estudo comprometeu a interpretação da imagem. No dia 21/05/2015 ocorreu a campanha de campo, mas a data não era condizente com a passagem do satélite. Nesse sentido, a inclusão de dados derivados de outros sensores ou a fusão de imagens como foco em estudos hídricos (TAVARES, 2019) podem gerar resultados com informações valiosas para melhor compreensão da magnitude da dinâmica térmica associada a reservatórios.

5.2 ESPACIALIZAÇÃO SAZONAL DA TSAe NO RESERVATÓRIO DE ITAIPU

O reservatório de Itaipu e seus compartimentos aquáticos SFV e Ocoí, situados entre 200 e 300m de altitude no Oeste do Paraná, apresentaram no geral padrão de variação sazonal de temperatura estimada de superfície da água de acordo com as características de clima subtropical definidas na classificação *Köppen-Gaiger* (ALVARES et al., 2013). Nesse sentido, os transectos centrais gerados nas imagens de satélite para o reservatório e compartimentos aquáticos entre 2013 e 2020 revelaram temperaturas médias anuais da superfície da água de 22,76°C (SFV), 22,87 °C (Ocoí) e 22,41°C (reservatório). A temperatura do ar apresentou média anual neste mesmo período de 21,98°C (estação A820 - Mal. Cândido Rondon, INMET, 2020). O coeficiente de correlação entre estas duas variáveis foi de $r=0,91$ (em média), resultado semelhante ($r=0,86$) encontrado no estudo de Jin et al. (2019), quando correlacionou a temperatura do ar e da água no rio Xiangxi, afluente do Reservatório das Três Gargantas (TGR) na China. Em detalhes na Figura 46 é possível observar temperaturas mais quentes para os meses de verão e temperaturas mais frias para os meses de inverno; os outros dois períodos de transição, outono e primavera, apresentaram variação térmica gradual de resfriamento e aquecimento, respectivamente.

Figura 46- Análise temporal das temperaturas médias máximas e mínimas do ar e das temperaturas médias e médias máximas de superfície da água



Fonte: Valores das temperaturas do ar adquiridas na estação A820 - Mal. Cândido Rondon, INMET (2020); valores das temperaturas de superfície da água estimadas em imagens de satélite Landsat 8

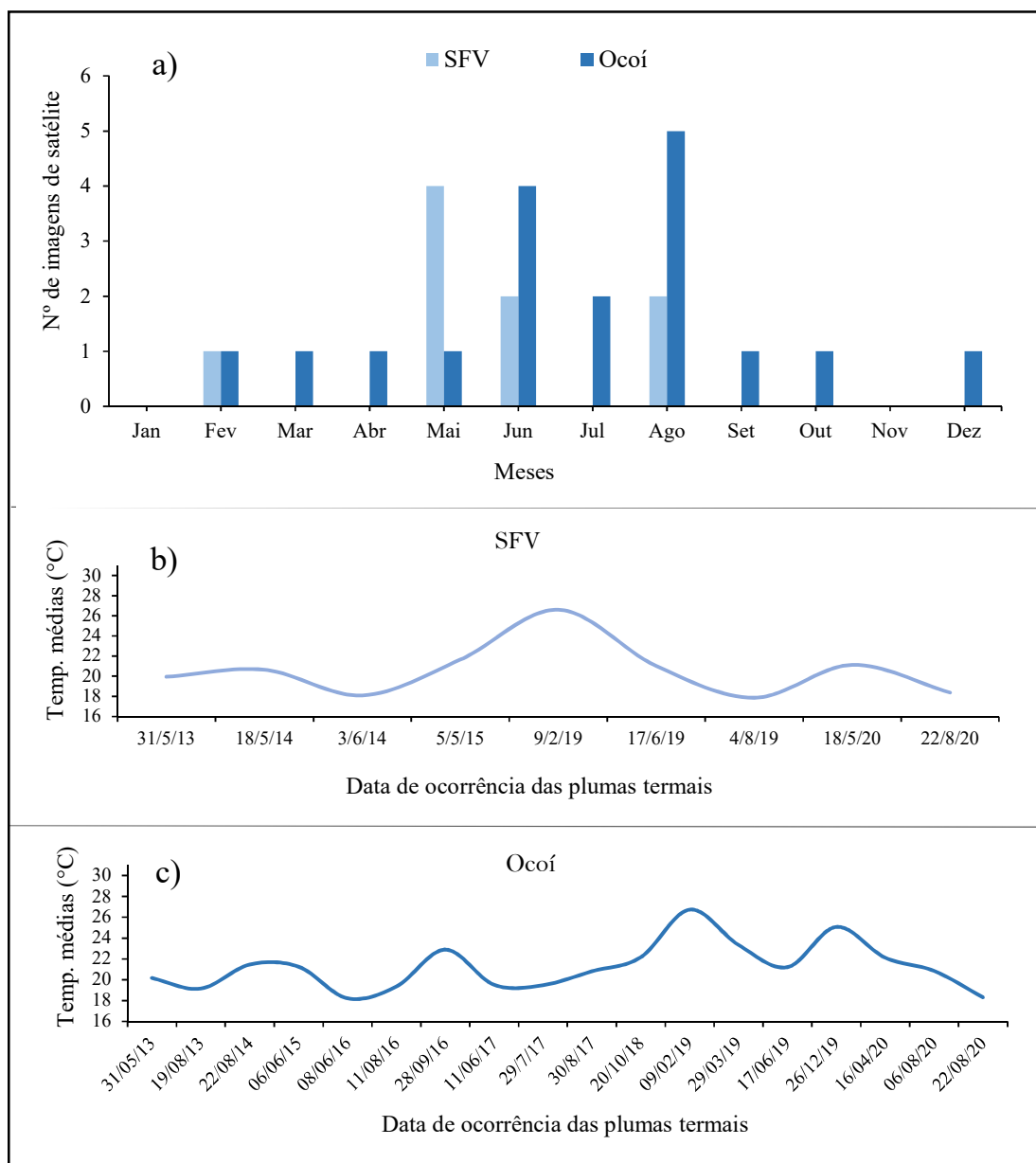
Notou-se, no entanto, mudança no padrão de variação da temperatura média máxima de superfície da água nos compartimentos aquáticos SFV e Ocoí quando combinada ao padrão de variação das temperaturas média de superfície da água e média máxima do ar. As correlações aplicadas entre TSA máxima versus TSA média, revelaram $r=0,97$ (SFV); $r=0,86$ (Ocoí) e $r=0,99$ (reservatório). Já a correlação entre TSA máxima e temperatura máxima do ar foi de $r=0,78$, em média.

Tais resultados, portanto, evidenciam maior correlação dos dados pareados para a área do reservatório. Nos compartimentos SFV e Ocoí, durante a avaliação térmica sazonal entre 2013 e 2020, identificou-se a presença de plumas termais, em sua maioria isoladas, com

temperaturas que destoaram significativamente da média geral das águas, principalmente para os períodos de outono e inverno. Já a área do reservatório não apresentou plumas termais e, portanto, as temperaturas máximas registradas no período analisado seguem o padrão de tendência das demais temperaturas apresentadas na Figura 45, justificando a correlação forte apresentada ($r=0,99$). Pode-se concluir acerca destas discordâncias no padrão de tendência da temperatura média máxima, que existem alterações anômalas nestas temperaturas superficiais das águas para os compartimentos aquáticos SFV e Ocoí.

Inserido neste contexto, foram identificadas 22 imagens de satélite com a presença de plumas termais e 26 ocorrências, em todas as estações do ano, com maior recorrência para os períodos de outono e inverno, especialmente nos meses de maio, junho e agosto. Especificadamente, foram quantificados os seguintes episódios de plumas termais: a) 13 no outono, sendo 6 no SFV e 7 no Ocoí; b) 10 no inverno, sendo 2 no SFV e 8 no Ocoí; c) 2 na primavera somente no Ocoí; e d) 3 no verão, sendo 1 no SFV e 2 no Ocoí. Sumariamente, o compartimento aquático Ocoí apresentou maior tendência na recorrência das plumas termais, ou seja, 19 episódios, principalmente em junho e agosto enquanto que no compartimento SFV identificou-se 9 episódios com maior recorrência para o mês de maio (Figura 47).

Figura 47- Recorrência sazonal dos eventos de florações de algas nos compartimentos aquáticos SFV e Ocoí (a) e a variação termal desses eventos nos períodos avaliados (b e c)

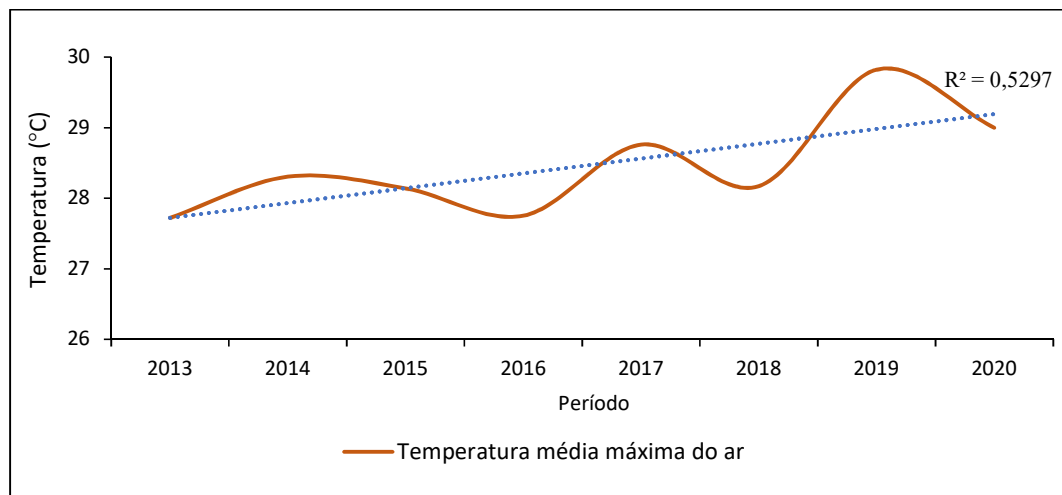


Fonte: Organização da autora de acordo com os dados de TSA extraídos nas imagens de satélite Landsat 8

Além disso, outras duas informações podem ser destacadas na Figura 47: 1) maior ocorrência de plumas termais no ano 2019 e, subsequentemente, em 2020; e 2) ocorrência de plumas termais sob temperaturas médias de superfície da água entre 18 e 27°C, aproximadamente. Sobre tais observações, destacam-se as seguintes arguições:

1) A análise temporal da temperatura do ar entre 2013 e 2020 em uma das estações próximas à região de influência do reservatório de Itaipu (Estação A820 - Mal. Cândido Rondon) evidenciou maiores temperaturas em 2019 e, subsequentemente, em 2020, com médias máximas de 29,82°C e 29°C, respectivamente (com $r^2=0,52$, Figura 48). Notadamente, esses foram os anos com maior ocorrência de plumas termais na área de estudo. Em sua maioria, essas plumas termais evidenciaram a presença anômala de florações de algas. Nesse caso, o aumento da temperatura do ar possivelmente favoreceu o aquecimento das águas e resultou na intensificação dos episódios de florações de algas nos anos 2019 a 2020. Obviamente, sob condições combinadas de disponibilidade adequada de nutrientes, luz e outros fatores de ordem ambiental e geográfica já bem esclarecidas na literatura abordada (BAYER, BURNS e SCHALLENBERG, 2013; RIGOSI et al., 2015; CLARK et al., 2017; GRIFFITH e GOBLER, 2016; TANG et al., 2016; QI et al., 2017; COSTA et al., 2018; KARKI et al., 2018; SCHAEFFER et al., 2018; BAH et al., 2019; CHENG et al., 2019; GRIFFITH e GOBLER, 2020). A frequência de ocorrência destes episódios de florações de algas, ainda que de forma isolada, em alguns períodos, mostra preocupação, pois a influência de fatores ambientais e geográficos em sua propagação anômala ainda é pouco compreendida (MANIGLIA et al., 2010; GRIFFITH e GOBLER, 2020), especialmente quando podem produzir diferentes toxinas, anteriormente já relatadas na área de estudo (MANIGLIA et al., 2010).

Figura 48– Análise temporal da temperatura média máxima do ar, entre 2013 a 2020



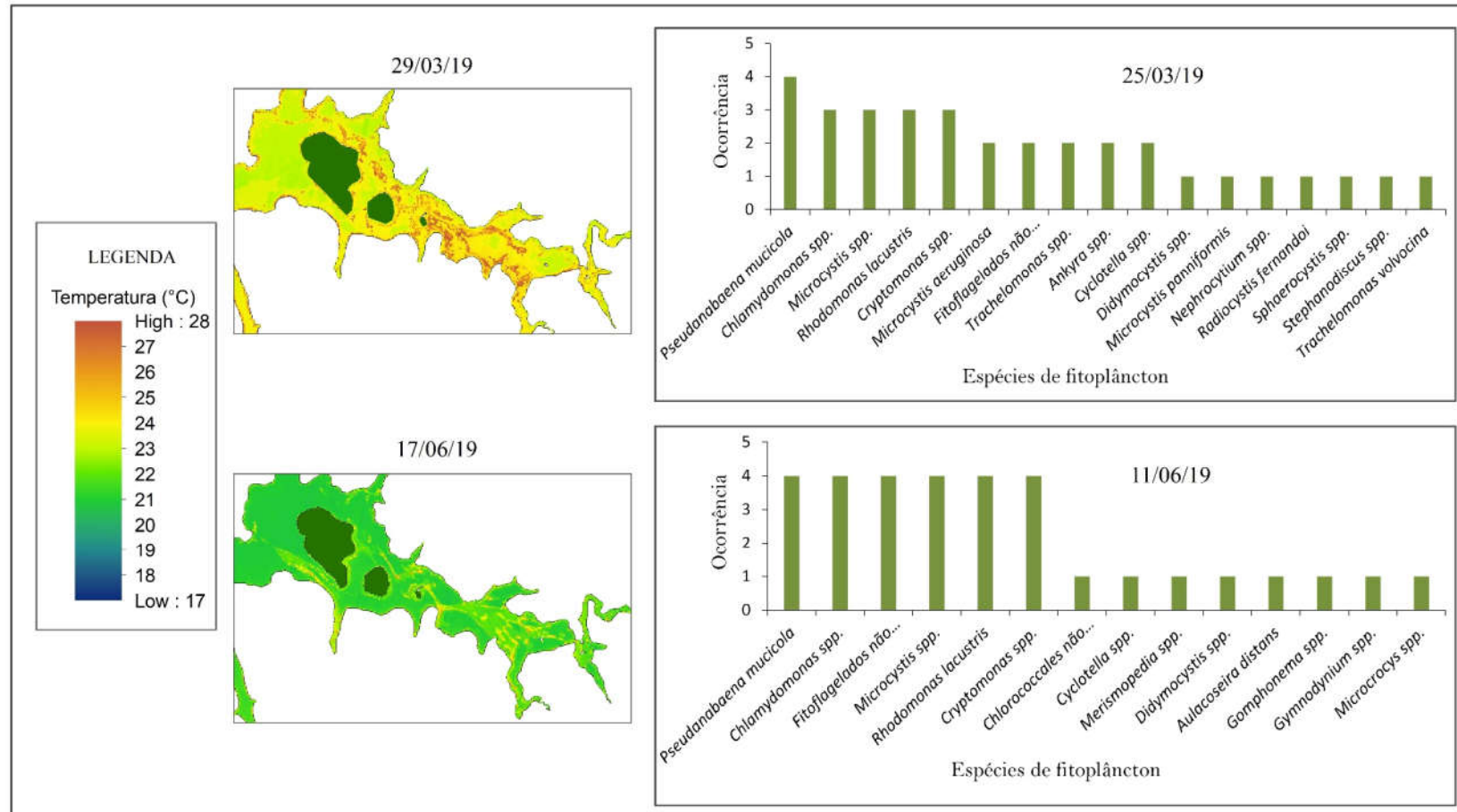
Fonte: Estação A820 - Mal. Cândido Rondon, INMET (2020)

2) Florações naturais de algas em ecossistemas de água doce tem apresentado preocupação mundial (KIM, 1998; TANG et al., 2003; PROENÇA e HALLEGRAEFF, 2017; RYAN et al., 2017; CHENG et al., 2019; HO, MICHALAK, e PAHLEVAN, 2019 e TRAINER et al., 2019), principalmente porque o crescimento desfavorável e produção de toxinas são dependentes da temperatura. Estudos já bem estabelecidos na literatura mostram que a faixa de temperaturas que favorecem a ocorrência de florações anômalas é bastante variada (KAMIYAMA et al., 2010; GRIFFITH e GOBLER, 2016; GRIFFITH e GOBLER, 2020), normalmente específicas de cada espécie, cepa, condições ambientais e distribuição geográfica (DZIALLAS e GROSSART, 2011; KIM et al., 2018 e GRIFFITH e GOBLER, 2020). Inserido neste contexto, a faixa de temperaturas médias encontradas neste estudo, nos períodos com florações, variou de 18 a 27°C, atingindo nos locais de ocorrência temperaturas médias máximas de 28°C no outono, 26°C no inverno, 27,91°C, na primavera e 31,79°C no verão. Tal cenário favorece a ocorrência de várias espécies de algas, inclusive com potencial tóxico.

5.3 EFEITO DA TSAe NOS COMPARTIMENTOS AQUÁTICOS

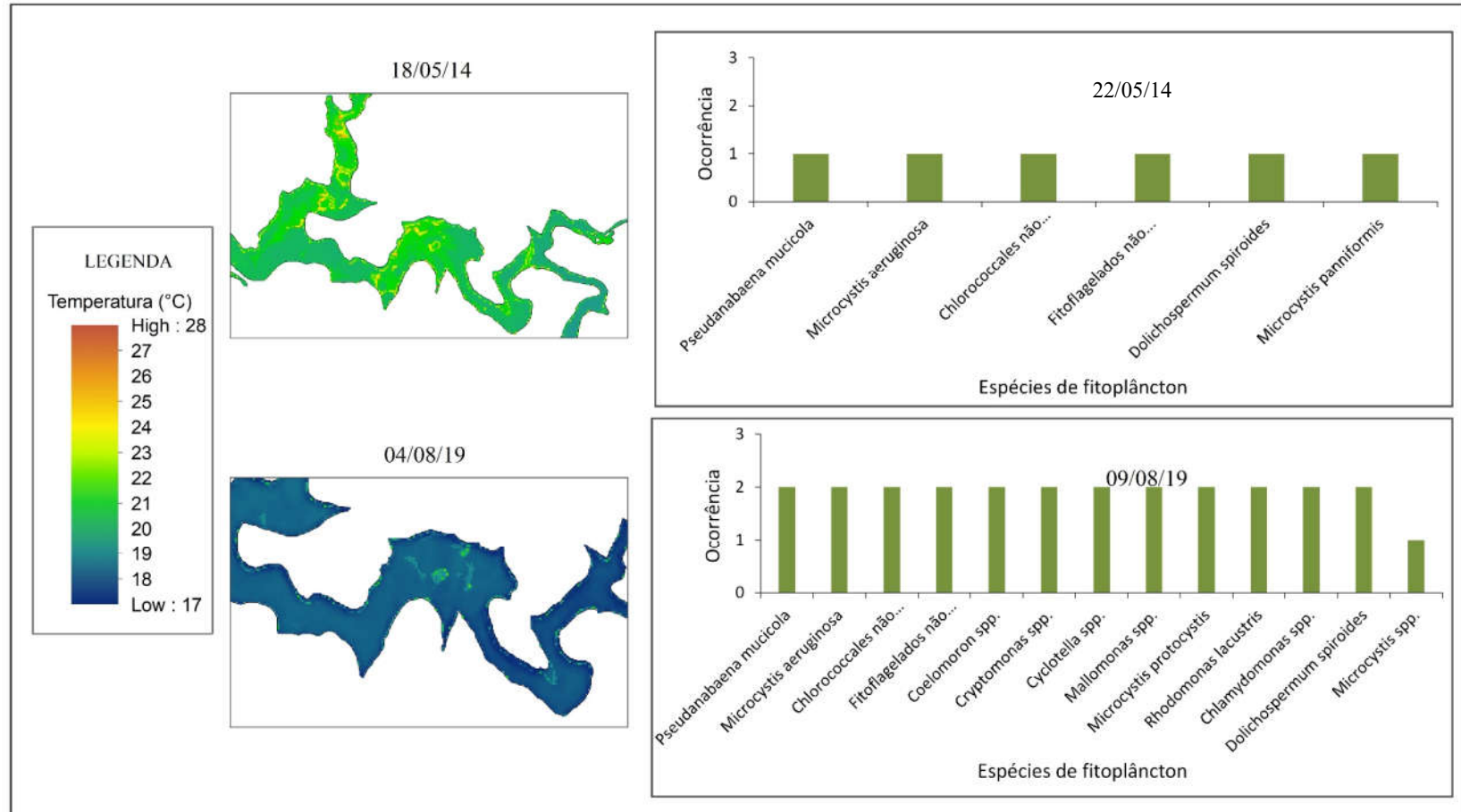
É possível evidenciar que a faixa de temperaturas que favorecem a ocorrência de florações anômalas é bastante variada a partir do resultado da análise sobre a diversidade de fitoplâncton em amostras de campo coletadas nas datas próximas às imagens de satélite 29/03/2019, 17/06/2019, 18/05/2014 e 04/08/2019. O resultado mostrou para o compartimento Ocoí a presença de 22 espécies de algas, nas datas 25/03/2019 e 11/06/2019. Para o compartimento SFV foram identificadas 14 espécies distribuídas nos períodos de 22/05/2014 e 09/08/2019 (Figuras 49 e 50). Espécies semelhantes foram encontradas a) por Domingues (2014) no reservatório Passo Real-RS, a exemplos das espécies do gênero *Dolichospermum*, *Microcystis*, com destaque para *M. aeruginosa* e *M. panniformis*; b) por Sant'anna et al. (2007) em reservatórios do alto Tietê-SP, a exemplo das espécies *Pseudanabaena mucicola*, *M. aeruginosa*, *M. panniformis* e *Microcystis protocystis*; c) por Fadel et al. (2015) no reservatório Karaoun, no Líbano, a exemplo da *M. aeruginosa*.

Figura 49- Distribuição da biodiversidade de fitoplâncton no compartimento aquático Ocoí



Fonte: Dados coletados pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAPE) e fornecidos pelo Núcleo de Inteligência Territorial do FPTI (2020)

Figura 50- Distribuição da biodiversidade de fitoplâncton no compartimento aquático SFV



Fonte: Dados coletados pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAPE) e fornecidos pelo Núcleo de Inteligência Territorial do FPTI (2020)

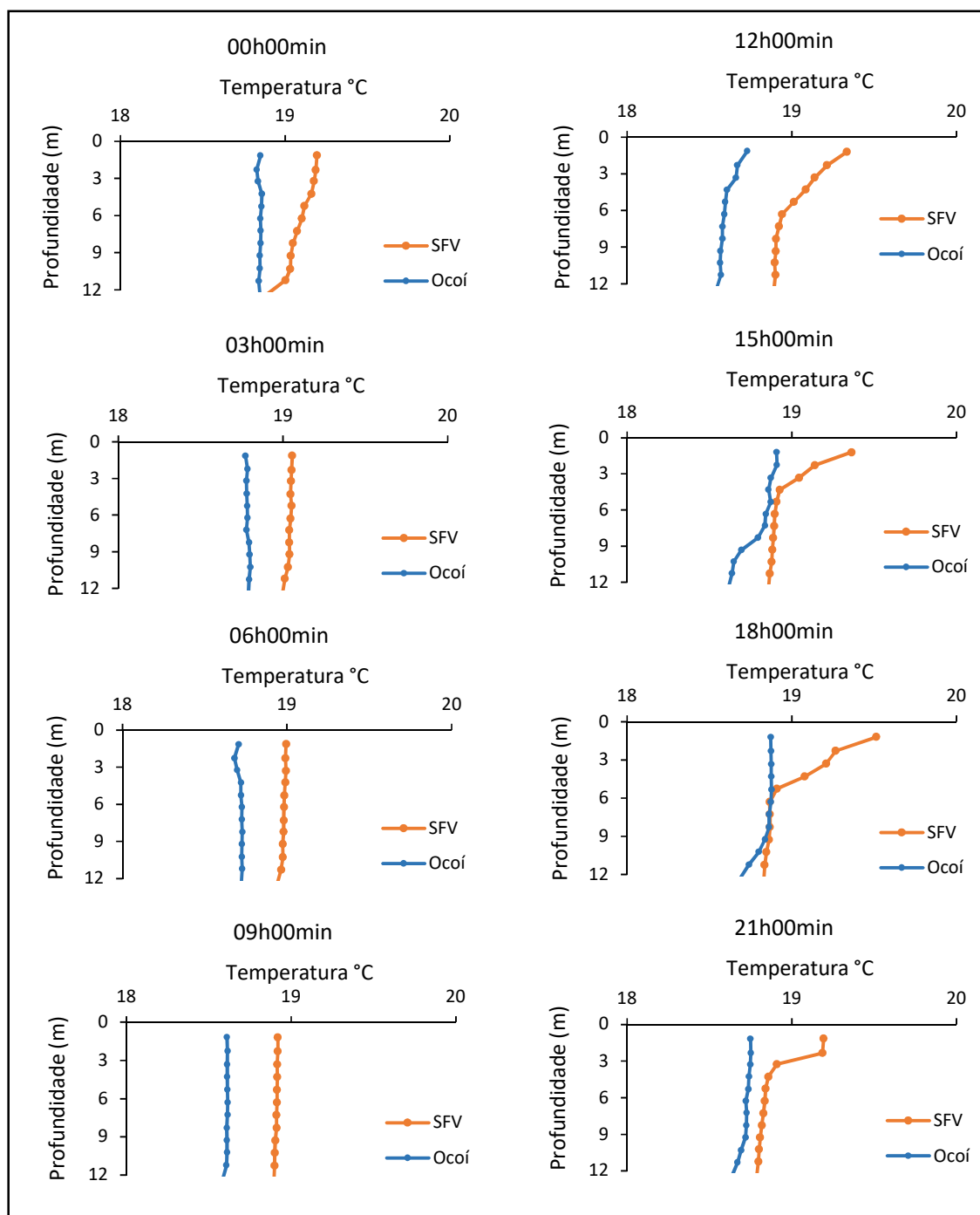
Dentre as espécies encontradas no presente estudo, a *Microcystis aeruginosa*, por exemplo, já bastante conhecida em outras regiões geográficas, requer atenção, visto que a elevação das temperaturas entre 20-25°C (KIM, PARK e HWANG, 2018) ou maiores que 26°C (DZIALLAS e GROSSART, 2011, BARROS et al., 2019, MULLIN, KIRCHHOFF e WANG, 2020) aumentaram a extensão das proliferações e presumivelmente sua toxicidade, a partir de metabólitos secundários produzidos em células cianobacterianas durante a fase exponencial de crescimento da biomassa (*Chl-a*), liberados na água após sua morte (DZIALLAS e GROSSART, 2011 e KIM et al., 2018). E dependendo da sua distribuição geográfica e condições ambientais da *Microcystis aeruginosa* a quantidade de material prejudicial produzido por unidade de biomassa pode ser maior em temperaturas menores (~15°C) (KIM et al., 2018).

Nesse sentido, as estimativas médias das temperaturas de superfície da água verificadas na área de estudo SFV e Ocoí para as datas selecionadas anteriormente, durante a análise e identificação da *Microcystis aeruginosa*, foi de 23,35°C em março, 21,21°C em junho, 20,64°C em maio e 17,86°C em agosto, atingindo temperaturas médias máximas de 28,12°C, 25,66°C, 25,39°C e 22°C, respectivamente. Em campo, a concentração da *Microcystis aeruginosa* no Ocoí atingiu 39.459,0 células/ml (em março, 2019) e para o compartimento SFV 6.424,0 células/ml (em maio, 2014) e 2.676,0 células/ml (em agosto, 2019).

Posto isso, o aquecimento das temperaturas de superfície da água, diante das evidências de maior aquecimento do ar e ocorrência de florações em iguais períodos (2019 e 2020), possivelmente tem proporcionado o início precoce (ou prolongamento) da estratificação térmica (BAYER, BURNS e SCHALLENBERG, 2013), favorecendo a intensificação de florações maciças de cianobactérias (ESTEVES, 1998; DZIALLAS e GROSSART, 2011 e MULLIN, KIRCHHOFF e WANG, 2020) e de suas vantagens competitivas em condições termais mais expressivas. Um estudo no rio Xiangxi, na China, revelou cenário semelhante, pois a temperatura do ar afetou a temperatura de superfície da água e promoveu a estratificação térmica mais pronunciada de abril a setembro, influenciando a proliferação de algas (JIN et al., 2019).

Diante destas afirmações a Figura 51 mostra a presença da termoclina nos compartimentos aquáticos SFV e Ocoí, em mesma data (04/08/2019), e evidencia a diferença térmica ocasionada, principalmente no compartimento SFV, onde registrou-se a presença de florações de algas em superfície. Notadamente, ocorreram maiores temperaturas em menor profundidade para o compartimento com floração, resultando em uma estratificação térmica mais pronunciada, geralmente incomum na área de estudo para o período de inverno.

Figura 51– Variação da temperatura na coluna da água nos compartimentos aquáticos SFV (com florações) e Ocoí (sem florações) em 04/08/19, nas estações Diatomacea e Espirogira, respectivamente



Fonte: Organizado pela autora de acordo com os dados de temperatura da coluna da água cedidos pelo Núcleo de Inteligência Territorial – NIT da Fundação Parque Tecnológico da Itaipu, FPTI-BR

Normalmente, as florações de algas se concentram em camadas mais profundas à noite em busca de nutrientes e retornam à camada superficial da água ao dia para realizar fotossíntese (WANG e TANG, 2010), ocasionando diferenças ainda maiores, como observadas nas temperaturas superficiais entres os compartimentos SFV e Ocoí. Além disso, um maior período com águas superficiais mais quentes pode aumentar o domínio das espécies de cianobactérias *Dolichospemum sp.* e *Microcystis sp.* (presentes nestes compartimentos), pois desenvolvem-se melhor nessas condições (MULLIN, KIRCHHOFF e WANG, 2020). Em síntese, a ocorrência de plumas termais caracterizadas por florações de algas, nas áreas de estudo, tem promovido alterações ainda maiores na amplitude térmica da temperatura de superfície da água, a ressaltar: a) no outono, até 4,75°C (SFV) e 4,65°C (Ocoí); b) no inverno, até 4,14°C (SFV) e 5,42 (Ocoí); c) na primavera, até 5,20 (SFV) e 6,50 (Ocoí); e c) no verão, até 4,74°C (Ocoí). Resultados semelhantes foram encontrados por Wang e Tang (2010) e Wang e Tang (2014), mencionados na abordagem da literatura nos Quadros 3 e 4. O compartimento aquático SFV não apresentou plumas termais no verão perante às imagens analisadas e, portanto, a amplitude térmica entre as TSAe máxima e média registradas nos locais de florações em cada data das imagens analisadas não ultrapassou 1,40°C.

5.4 CONSEQUÊNCIAS ECOLÓGICAS

O resultado destas alterações termais intensificadas pelas florações nos compartimentos aquáticos estudados é cada vez mais emergente, pois projeções futuras têm revelado que aquecimentos nas temperaturas superficiais das águas têm resultado em aumentos significativos na estratificação térmica, com início precoce de 2 a 4 semanas e estendendo-se de 2 a 4 semanas após período natural de ocorrência. Logo, ecossistemas aquáticos com alta estratificação térmica e um histórico de florações de cianobactérias tendem no futuro serem mais suscetíveis ao aumento da frequência e severidade dessas florações, a menos que os níveis de nutrientes não sejam suficientes para suportar seu crescimento (MULLIN, KIRCHHOFF e WANG, 2020).

Evidentemente tal cenário traz consequências para os compartimentos aquáticos e para a distribuição de nutrientes no corpo d'água, já que, em lagos estratificados, a comunicação entre camadas é limitada (BARROS et al., 2019). Como resultado, relatado anteriormente na revisão de literatura, o fitoplâncton permanece durante o dia na superfície da água para realizar fotossíntese, migrando verticalmente em águas mais profundas à noite em busca de nutrientes (WANG e TANG, 2010; CLARK et al., 2017). É o caso de espécies de cianobactérias

flutuantes, a exemplo das *Microcystis*, que se sobressaem sobre as diatomáceas na busca de nutrientes em águas mais profundas (MULLIN, KIRCHHOFF e WANG, 2020).

Estudos na Europa (RIGOSI et al., 2015), evidenciaram que o aumento da biomassa de cianobactérias em 18 lagos, durante um período de 23 anos, foi correlacionado estatisticamente com uma estratificação térmica mais longa e intensa. Os lagos Constança (Europa Central) e Washington (EUA) apresentaram aquecimento de suas águas no período de inverno (dezembro a março), função principal das mudanças climáticas. Tal efeito resultou na ocorrência precoce de episódios de florações e, na primavera (março a junho), o início mais cedo da estratificação térmica na coluna da água (BAYER, BURNS e SCHALLENBERG, 2013). No reservatório de Karaoun, no Líbano, as mudanças em sua comunidade fitoplanctônica foram consideradas o resultado da interação entre a temperatura da água, estratificação, disponibilidade de nutrientes e nível da água. A estratificação forte entre maio e agosto, reduziu o crescimento de diatomáceas, substituindo-as pelas cianobactérias em temperaturas inferiores a 22°C. Em temperaturas superiores a 25°C, no período do verão, ocorreu o florescimento da *Microcystis aeruginosa* (FADEL, 2015). Normalmente, a *Microcystis aeruginosa* apresenta vantagem fisiológica quando a temperatura da água for superior a 20 °C (BARROS et al., 2019).

Na região do hipolímnio, por exemplo, a estratificação térmica pode ser considerada a principal responsável pelo déficit de oxigênio, especialmente nos ecossistemas aquáticos mais profundos (WAWRZYNIAK, PIEGAY e POIREL, 2011; HÉBERT, 2015; LING et al, 2017). Assim, a variação atípica da temperatura das águas pode alterar a acidificação e a desoxigenação, comprometendo a demanda de oxigênio e o escopo aeróbico de organismos em zonas hipóxicas (GRIFFITH e GOBLER, 2020). Além disso, a proliferação anômala de espécies de algas potencialmente tóxicas pode produzir sabor e odor na água, aumento da turbidez, redução da vegetação aquática submersa e promover a morte de peixes e invertebrados bentônicos (GUIMARRÃES, et al. 2020). Através da cadeia alimentar, algumas toxinas podem se acumular nos peixes. Em atitudes recreativas, por meio do contato cutâneo e oral, com exposição ocasional, podem provocar irritações na pele e alergias (DÖRR et al., 2010). Em humanos, comprometimentos adversos, até a morte (CLARK et al., 2017).

Nesse sentido, é preciso aprofundar as pesquisas sobre a dinâmica da variação térmica da água associadas a biodiversidade e desenvolvimento de toxinas por comunidades fitoplanctônicas, especialmente em reservatórios. Entende-se que a utilização convergente de informações de diferentes naturezas, principalmente com a exploração de dados de imagens termais, possa apoiar a compreensão da resiliência desse ambiente aquático aos riscos

apresentados pelo aumento da temperatura da água, resultado do aquecimento global cada vez mais evidente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa objetivou identificar a variação térmica superficial da água nas áreas de estudo, sazonalmente, entre 2013 e 2020, além de relacionar o efeito dessa variação térmica na água com a ocorrência de florações algais no SFV e Ocoí. Por fim, buscou revelar tendências espaço-temporais no aquecimento da temperatura de superfície da água e, paralelamente, a recorrência das florações de algas no reservatório de Itaipu, PR, Brasil.

Diante desses objetivos e mediante às questões científicas levantadas neste trabalho, conclui-se o seguinte:

1) O reservatório de Itaipu e seus compartimentos aquáticos apresentam variações anômalas no seu regime térmico superficial que resultam plumas termais com impactos no metabolismo aquático?

Sim, nos compartimentos aquáticos avaliados (SFV e Ocoí). Diante da análise de estimativas da temperatura de superfície da água em 52 imagens de satélite, identificou-se a ocorrência de plumas termais para todas as estações do ano, com maior frequência para os períodos de outono e inverno, especialmente nos meses de maio, junho e agosto. O compartimento aquático Ocoí apresentou maior tendência na recorrência das plumas termais em junho e agosto e o compartimento SFV em maio. Em sua maioria, essas plumas termais evidenciaram a presença anômala florações de algas com maior recorrência no período de 2019 a 2020. Notadamente os anos com os maiores registros nos valores das temperaturas médias máximas do ar. Esse aumento da temperatura do ar possivelmente favoreceu o aquecimento das águas e o início precoce da estratificação térmica, resultando na intensificação dos episódios de florações de algas e amplitudes térmicas das temperaturas de superfície da água mais expressivas. Obviamente, sob condições combinadas de disponibilidade de nutrientes, luz e outros fatores de ordem ambiental e geográfica, inerentes à área de estudo.

2) Qual o impacto que a variação da temperatura de superfície da água pode ocasionar no padrão térmico sazonal do reservatório e seus compartimentos aquáticos?

A presença de plumas termais, consequência do aquecimento das águas presumido neste estudo, tem promovido impactos ainda maiores na amplitude térmica média das TSAe máxima e média registradas nos locais de ocorrência das florações de algas, dado o período analisado em cada compartimento aquático. O compartimento aquático SFV não apresentou plumas termais no verão perante às imagens analisadas e, portanto, a amplitude térmica média não

ultrapassou 1,40°C. A área do eixo central do reservatório não apresentou a presença de plumas termais em nenhum dos períodos analisados e apresentou uma amplitude térmica média de até 0,73°C no outono, 0,90°C no inverno, 0,85°C na primavera e 0,73°C no verão. Sumariamente, o impacto termal decorrente da presença de plumas termais observado nos compartimentos aquáticos foi muito maior que na área do reservatório, onde nenhum episódio de florações de algas foi identificado.

3) Como mudanças mais expressivas na temperatura de superfície água podem afetar o metabolismo do meio aquático na área de estudo e resultar em concentrações anômalas de florações de algas, potencialmente tóxicas?

Observou-se durante o desenvolvimento desta pesquisa que a faixa de temperatura que favorece a ocorrência de florações anômalas de algas é bastante variada, normalmente específicas de espécie, cepa, condições ambientais e distribuição geográfica. Diante disso, a faixa de temperaturas médias encontradas neste estudo, nos períodos com florações, variou de 18 a 27°C, atingindo nos locais de ocorrência temperaturas médias máximas de 28°C no outono, 26°C no inverno, 27,91°C, na primavera e 31,79°C no verão. Tal cenário tem favorecido a ocorrência de várias espécies de algas, inclusive com potencial tóxico. A análise da variação da temperatura na coluna da água entre os compartimentos aquáticos SFV e Ocoí durante a presença e ausência de florações de algas indicou diferenças nas amplitudes térmicas e evidenciou uma estratificação térmica mais pronunciada no compartimento sob a presença de florações. Dado esses resultados, projeções futuras verificadas na literatura têm alertado para o fato de que o aquecimento das águas tem resultado em aumentos significativos do início e duração da estratificação térmica. Logo, ecossistemas aquáticos com este cenário e um histórico de florações de cianobactérias tendem no futuro serem mais suscetíveis ao aumento da frequência e severidade dessas florações, a menos que os níveis de nutrientes não sejam suficientes para suportar seu crescimento. Assim, um maior período com águas superficiais mais quentes no futuro podem aumentar o domínio das espécies de cianobactérias, a exemplo da *Dolichospermum sp.* e da *Microcystis sp.*, presentes na área de estudo, pois desenvolvem-se melhor nessas condições. A *Microcystis aeruginosa* recorrente em ambos os compartimentos aquáticos estudados também merece atenção, pois apresenta vantagem fisiológica quando a temperatura da água é superior a 20 °C.

Inserido neste contexto, há uma necessidade urgente de compreender melhor como os ecossistemas aquáticos podem melhorar sua resiliência aos riscos apresentados pelo aumento da temperatura da água, cada vez mais evidente devido o aquecimento global. Para isso é preciso manter as pesquisas sobre a dinâmica da variação térmica da água, especialmente em reservatórios, a fim de desvendar as inúmeras influências recebidas e as consequências resultadas, no tempo e no espaço, continuamente. Só assim poder-se-á indicar soluções mais assertivas sobre as variações anômalas na temperatura da água, especialmente àquelas de superfície.

Adicionalmente, embora as alterações anômalas na temperatura da água e ocorrência de florações algais sejam problemas sérios, principalmente aos processos hidrodinâmicos e ecológicos e aos seres humanos, estas são apenas um reflexo combinado de influências geográficas de ordem multifatorial. As interferências podem variar de acordo com morfometria da bacia e do reservatório, profundidade do lago, tempo de residência das águas, velocidade do vento, fenômenos climáticos predominantes, usos e manejo das terras, enfim, são diversas as abordagens que podem estar associadas. Assim, os resultados e consequências ecológicas revelados de forma parcial nesta pesquisa são um avanço e já trazem um alerta sobre a qualidade da água do reservatório de Itaipu e seus compartimentos aquáticos. Todavia, apenas estudos ainda mais amplos a partir da interação destas interferências geográficas mencionadas serão capazes de revelar substancialmente a relação de causa-efeito destes problemas e indicar alternativas de melhorias ambientais que não representem um risco para os recursos hídricos e para a saúde humana. A Geografia cumpre com seu papel quando busca entender, de forma sistêmica, a dinâmica desta relação causa-efeito ocasionada no espaço geográfico a fim de auxiliar no planejamento das ações antrópicas sobre ele.

7. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANNEE). Sistema de Informações de Geração da ANNEE (SIGA). **Capacidade de geração do Brasil**. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/siga>>. Acesso em: 15 out. 2020.

ALLAN, M. G. et al. Spatial heterogeneity in geothermally-influenced lakes derived from atmospherically corrected Landsat thermal imagery and three-dimensional hydrodynamic modelling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, V 50, p. 106–116, 2016.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANDY, F. **Descobrimdo a estatística usando SPSS**: Tradução Lorí Viali. 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

ASSIREU, A.T. et al. Hydro-physical processes at the plunge point: an analysis using satellite and in situ data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 3689-3700, 2011.

AZEVEDO, S. M. F. O. et al. Human intoxication by microcystins during renal dialysis treatment in Caruaru—Brazil. **Toxicology**, v. 181–182, p. 441–446, dez. 2002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300483X02004912?via%3Dihub>>. Acesso em: 9 nov. 2020. DOI: 10.1016/S0300-483X(02)00491-2.

BAH, A. et al. Analysis of Surface Temperature Trends of World Major Lakes and their Relationship with Land Cover Changes, **IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, Yokohama, Japan, 2019, p. 6919-6921, 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8898337>>. Acesso em: 9 nov. 2020. DOI: 10.1109 / IGARSS.2019.8898337.

BARBOSA, C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. **Introdução ao sensoriamento remoto de sistema aquáticos**: princípios e aplicações. INPE: São José dos Campos, 2019. 178p.

BARROS, M. U. G. et al. Environmental factors associated with toxic cyanobacterial blooms across 20 drinking water reservoirs in a semi-arid region of Brazil. **Harmful Algae**, v. 86, p. 128-137, jun. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1568988319300630>>. Acesso em: 8 set. 2020. DOI: 10.1016/j.hal.2019.05.006.

BAYER, T. K.; BURNS, C. W.; SCHALLENBERG, M. Application of a numerical model to predict impacts of climate change on water temperatures in two deep, oligotrophic lakes in New Zealand. **Hydrobiologia**, v. 713, n. 1, p. 53–71, ago. 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10750-013-1492-y>>. Acesso em: 9 set. 2020. DOI: 10.1007/s10750-013-1492-y.

BBC NEWS. **Revelado mistério da morte de centenas de elefantes em Botsuana**. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-54239993>>. Acesso em: 14. jun. 2021.

BOLGRIEN, D.W.; BROOKS. Analysis of thermal features of Lake-Michigan from AVHRR satellite images. **Journal of Great Lakes Research**, 18 (2), 259–266, 1992.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005. Disponível em: < <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>. Acesso em: 11 dez. 2020.

CALLEGARI-JAQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003.

CAMARA NETO, H. F. da. A “**tragédia da hemodiálise**” 12 anos depois: poderia ela ser evitada? 2011. 171 p. Tese (Doutorado em Saúde Pública). Fundação Oswaldo Cruz, Centro de Pesquisas Aggeu Magalhães, Recife, 2011.

CASSOL, A. P. V. et al. First record of a bloom of the invasive species *Ceratium furcoides* (Levander) Langhans 1925 in Rio Grande do Sul state, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 74, n. 2, p. 515–517, maio 2014. Disponível em:<<https://www.readcube.com/articles/10.1590/1519-6984.05413>>. Acesso em: 9 set. 2020. DOI: 10.1590/1519-6984.05413.

CHENG, B. et al. Characterization and causes analysis for algae blooms in large river system. **Sustainable Cities and Society**, v. 51, p. 101707, 2019. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221067071930469X?via%3Dihub>>. Acesso em: 15 set. 2020. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101707.

CHERKAUER, K. A. et al. Assessing satellite-based thermal-infrared remote-sensing for monitoring Pacific Northwest rivertemperatures. **Journal of the American Water Resources Association**, October. 03161, 2005.

CLARK, O. M. et al. Satellite monitoring of cyanobacterial harmful algal bloom frequency in recreational waters and drinking water sources. **Ecological Indicators**, v. 80, p. 84–95, 2017. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X17302194>>. Acesso em: 15 set. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.04.046.

CORAZZA, R. **Identificação de florações de algas no Lago Guaíba com uso de imagens de satélite e espectrorradiometria de campo**. 2015. 226 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

COSTA, J. A. da. et al. Eutrophication in aquatic ecosystems: a scientometric study. **Acta Limnol. Bras.**, Rio Claro, v. 30, n. 2, Mar. 2018 Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/alb/a/S3rGPcYCNPTDb3gfMszykSv/?lang=en>>. Acesso em: 20 nov. 2020. DOI: 10.1590/s2179-975x3016.

CRISTEA, N. C.; BURGESS, S. J. Use of thermal infrared imagery to complement monitoring and modeling of spatial stream temperature. **J Hydraul Eng** 14:1080–1090, 2009.

DALY, K. et al. Recent warming of Tonle Sap Lake, Cambodia: Implications for one of the world’s most productive inland fisheries. **Lakes e Reserv.** V. 00, p. 1–10. 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/lre.12317>>. Acesso em: 15 nov. 2020. DOI: 10.1111/lre.12317.

DEMARIO, A. et al. Water Plume Temperature Measurements by an Unmanned Aerial System (UAS). **Sensors**, v. 17, 306 p. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/313461173_Water_Plume_Temperature_Measurements_by_an_Unmanned_Aerial_System_UAS>. Acesso em: 15 nov. 2020. DOI: 10.3390/s17020306.

DOMINGUES, A. L. **Padrões hidrometeorológicos e seus efeitos nas flores cianobacterianas em reservatório Passo Real, Rio Grande do Sul**. 2014. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

DOMINGUES, A. L. et al. Características espectrais de uma floração de cianobactérias no Reservatório Rodolfo Costa e Silva - RS. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais...Curitiba**, PR, Brasil: 30 maio 2011. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.28.17.24/doc/p1498.pdf>>. Acesso em: 10 maio. 2020.

DÖRR, F. A. et al. Microcystins in South American aquatic ecosystems: Occurrence, toxicity and toxicological assays. **Toxicon**, v. 56, n. 7, p. 1247–1256, dez. 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0041010110001376>>. Acesso em: 10 out. 2020. DOI 10.1016/j.toxicon.2010.03.018.

DUGDALE S. J. et al. Assessing the potential of drone- based thermal infrared imagery for quantifying river temperature heterogeneity. **Hydrological Processes**. V. 33, p. 1152–1163, 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.13395>>. Acesso em: 10 out. 2020. DOI: 10.1002/hyp.13395.

DZIALLAS, C.; GROSSART, H.-P. Increasing Oxygen Radicals and Water Temperature Select for Toxic Microcystis sp. **PLoS ONE**, v. 6, n. 9, p. e25569, 28 set. 2011. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21980492/>>. Acesso em: 10 jan. 2021. DOI: 10.1371/journal.pone.0025569.

ESTEVEES, F. A. Fundamentos de limnologia. In: ESTEVEES, F.; CALIMAN, A. **Águas continentais: Características do meio, compartimentos e suas comunidades**. Rio de Janeiro: Interciência: 2011, p. 113–118.

ESTEVEES, F. **Fundamentos de Limnologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

ESSE MUNDO É NOSSO. **Quando ir para Foz do Iguaçu: qual a melhor época para viajar?** Disponível em: <<https://www.essemundoenosso.com.br/quando-ir-pra-foz-do-iguacu>>. Acesso em: 14. Jun. 2021.

FADEL, A. et al. Environmental factors associated with phytoplankton succession in a Mediterranean reservoir with a highly fluctuating water level. **Environmental Monitoring and Assessment**, Springer Verlag (Germany), v. 187, n. 633. 2015. Disponível em: <<https://europemc.org/article/med/26383738>>. Acesso em: 20 fev. 2021. DOI: 10.1007 / s10661-015-4852-4.

FIGGATT, M. et al. Harmful Algal Bloom–Associated Illnesses in Humans and Dogs Identified Through a Pilot Surveillance System — New York, 2015. **Morbidity and Mortality**

Weekly Repor, v.66, n. 43. 2017. Disponível em: <<https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/66/wr/pdfs/mm6643a5-H.pdf>>. Acesso em: 14. jun. 2021.

FLOID, F.; SABINS, JR. **Remote sensing: principles and interpretation**. 2. ed. New York: W. H. Freeman and Company, 1986.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3. ed. Oficina de textos. São Paulo: 2011. 128 p.

FRICKE, K.; BASCHEK, B. Water surface temperature profiles for the Rhine river derived from Landsat ETM+ data. Em Proceedings of SPIE 8887, **Remote Sensing for Agriculture Ecosystems, and Hydrology XV**, p. 88870E, 2013.

FUNASA. FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Cianobactérias tóxicas para consumo humano na saúde pública e processos de remoção em água para consumo humano**. Ministério da Saúde: Fundação Nacional de Saúde, 2003.

GENUÁRIO, D. B. et al. Cyanobacterial community and microcystin production in a recreational reservoir with constant *Microcystis* blooms. **Hydrobiologia**, v. 779, n. 1, p. 105–125, out. 2016. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10750-016-2802-y>>. Acesso em: 20 jan. 2021. DOI: 10.1007/s10750-016-2802-y.

GERACE, A.; MONTARANO, M. Derivation and validation of the stray light correction algorithm for the thermal infrared sensor onboard Landsat 8. **Remote Sensing of Environmental**, v. 191, p. 246 – 257, 2017.

GRAY, A. et al. Remote sensing reveals Antarctic green snow algae as important terrestrial carbon sink. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 2527, dez. 2020. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41467-020-16018-w>>. Acesso em: 20 jan. 2021. DOI: 10.1038/s41467-020-16018-w.

GRIFFITH, A. W.; GOBLER, C. J. Harmful algal blooms: A climate change co-stressor in marine and freshwater ecosystems. **Harmful Algae**, v. 91, p. 101-590, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568988319300344>>. Acesso em: 13 jan. 2021. DOI: 10.1016/j.hal.2019.03.008.

GRIFFITH, A. W.; GOBLER, C. J. Temperature Controls the toxicity of the ichthyotoxic dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides*. **Marine Ecology Progress Series**. 545, 63–76, 2016.

GUIMARÃES, A. et al. Using distribution models to estimate blooms of phytosanitary cyanobacteria in Brazil. **Biota Neotrop**, Campinas, v. 20, n. 2, e 20190756, 2020. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/bn/a/SCdBVN59D99PV8Qrg9VjBZv/?lang=en>>. Acesso em: 23 jan. 2021. DOI: 10.1590/1676-0611-bn-2019-0756.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria básica**. 5 ed. Bookman: São Paulo, 920p. 2011.

HANSEN, G. J. A. et al. Projected shifts in fish species dominance in Wisconsin lakes under

climate change. **Global Change Biology**, v. 23, n. 4, p. 1463–1476, abr. 2017. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.13462>>. Acesso em: 23 jan. 2021. DOI: 10.1111/gcb.13462.

HANDCOCK R. N. et. al. Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiplespatial scales. **Remote Sens Env** 100:427–440, 2006.

HANDCOCK, R. N. et al. Thermal Infrared Remote Sensing of Water Temperature in RiverineLandscapes. **Fluvial Remote Sensing for Science and Management**, 85-113, 2012.

HARKE, M.J. et al. A review of the global ecology, genomics, and biogeography of the toxic cyanobacterium, *Microcystis spp.* **Harmful Algae**, v. 54, p. 4–20, 2016. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28073480/>>. Acesso em: 23 jan. 2021. DOI: 10.1016/j.hal.2015.12.007.

HÉBERT, C. Predicting Hourly Stream Temperatures Using the Equilibrium Temperature Model. **Journal of Water Resource and Protection**, 7, 322-338, 2015.

HO, J. C.; MICHALAK, A. M.; PAHLEVAN, N. Aumento global generalizado em florações intensas de fitoplâncton de lago desde os anos 1980. **Nature**, v. 574, p. 667–670, 2019 Disponível em: < <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1648-7>>. Acesso em: 23 jan. 2021. DOI: 10.1038/s41586-019-1648-7.

HUOVINEN, P.; RAMÍREZ, J.; GÓMEZ, I. Remote sensing of albedo-reducing snow algae and impurities in the Maritime Antarctica. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 146, p. 507–517, dez. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924271618302934>>. Acesso em: 23 nov. 2020. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.10.015.

IMBERGER, J. Transport process in lakes: a review. In: MARGALEF, R. (ed.). **Limnology now: a paradigm of planetary problems**. Nova York: Elsevier Science, 1994. p. 99-194.

IMBERGER, J.; PATTERSON, J.C. Physical limnology. **Advances in Applied Mechanics**, v. 27, p.303-475, 1990.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Banco de dados meteorológicos**. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 28 de nov. 2020.

ITAIPU BINACIONAL. A maior geradora de energia limpa e renovável do planeta. **Geração**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>>. Acesso em: 15 dez. 2020.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução de J. C. N. Epiphanyo et al. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598p.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; SOBRINO, J. A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. **Journal of Geophysical Research**, 108:D22, 2003.

JIN, J. et al. Effects of water level fluctuation on thermal stratification in a typical tributary bay

of Three Gorges Reservoir, China. **PeerJ** 7:e6925, 2019. Disponível em: <<https://peerj.com/articles/6925/>>. Acesso em: 23 nov. 2020. DOI: 10.7717/peerj.6925.

KAMIYAMA, T. et al. Effect of temperature on production of okadaic acid, dinophysistoxin-1, and pectenotoxin-2 by *Dinophysis acuminata* in culture experiments. **Aquat. Microb. Ecol.** V. 60, p. 193–202, 2010.

KARKI, S.; SULTAN, M.; ELKADIRI, R.; ELBAYOUMI, T. Mapping and Forecasting Onsets of Harmful Algal Blooms Using MODIS Data over Coastal Waters Surrounding Charlotte County, Florida. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, p. 1656, out. 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/10/10/1656>>. Acesso em: 23 nov. 2020. DOI:10.3390/rs10101656.

KAY, J. E. et al. Accuracy of lake and stream temperatures estimated from thermal infrared images. **J Am Water Res Assoc** 41:1161–1175, 2005.

KIM, H.G. Harmful algal bloom in Korean coastal waters focused on three fishkilling dinoflagellates. In: Kim, H.G., Lee, S.G., Lee, C.K. (Eds.), *Harmful Algal Blooms in Korea and China*. **National Fisheries Research and Development Institute**, Pusan, Republic of Korea, Pusan, 1998.

KIM, K. et al. Harmful Cyanobacterial Material Production in the North Han River (South Korea): Genetic Potential and Temperature-Dependent Properties. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 3, p. 444, mar. 2018. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29510518/>>. Acesso em: 24 nov. 2020. DOI:10.3390/ijerph15030444.

KRAEMER, B. M. et al. Century-Long Warming Trends in the Upper Water Column of Lake Tanganyika. **PLOS ONE**, v. 10, n. 7, p. e0132490, 6 jul. 2015. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26147964/>>. Acesso em: 24 nov. 2020. DOI:10.1371/journal.pone.0132490.

KRAMER, G.; PEREIRA FILHO, W.; DEZORDI, R.; SANTOS, M. A. G. **Dinâmica sazonal da temperatura de superfície da água em um reservatório subtropical a partir de dados Landsat**. In: Cássio Arthur Wollmann; Eliane Maria Foletto; Waterloo Pereira Filho. (Orgs.). *Análise integrada e estudos geográficos comparados em bacias hidrográficas de São Paulo, Goiás e Rio Grande do Sul*. 1ed.Santa Maria: UFN, 2020, v. 1, p. 01-360.

KUENZER, C.; DECH, S. **Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications**. New York: Springer, 2013. 546 p.

LAMARO, A. et al. Estimativa da temperatura da superfície da água a partir dos dados infravermelhos térmicos Landsat 7 ETM + usando o método generalizado de canal único: Estudo de caso de Embalse del Río Tercero (Córdoba, Argentina). **Advances in Space Research**, V.51, 492–500, 2013.

LARRAS, F. et al. The effect of temperature and a herbicide mixture on freshwater periphytic algae. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 98, p. 162–170, 2013. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24119653/>>. Acesso em: 24 nov. 2020. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2013.09.007.

LAVAL, B. et al. Modelling circulation in lakes: spatial and temporal variations. **Limnology and Oceanography**, v. 48, p. 983-994, 2003.

LEDREW, E.F.; FRANKLIN, S.E. The use of thermal infrared imagery in surface current analysis of a small lake. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 51, 565–573, 1985.

LEVINE, D. N. et al. **Estatística: teoria e aplicações usando o Microsoft Excel em português**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

LING, F. et al. Monitoring Thermal Pollution in Rivers Downstream of Dams with Landsat ETM+ Thermal Infrared Images. **Remote Sens.**, v. 9, p. 1175, 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/9/11/1175>>. Acesso em: 21 mar. 2020. DOI: 10.3390/rs9111175.

LIOU, K. N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. 2 ed. USA: Elsevier science, 2002. 584 p.

LIU, H. et al. Eddy covariance measurements of surface energy budget and evaporation in a cool season over southern open water in Mississippi, **Journal of Geophysical Research**, v. 114, p. 1-13, 2009.

LOPES, F. B. et al. Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiperespectral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 13 – 19, 2014.

MA, J. et al. Seasonality of biological feedbacks on sea surface temperature variations in the Arabian Sea: The role of mixing and upwelling, **J. Geophys. Res. Oceans**, v. 119, p. 7592–7604, 2014. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014JC010186>>. Acesso em: 21 nov. 2020. DOI:10.1002/2014JC010186.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, p.147-155, 2003.

MANIGLIA, T. C. Genetic potential for toxicity: blooms of cyanobacteria in the Itaipu reservoir, Brazil. **Applied ecology and environmental research**, v. 8, n. 3, p. 11, 2010.

MANTZOUKI, E. et al. Temperature effects explain continental scale distribution of cyanobacterial toxins. **Toxins (Basel)**. V. 10, n. 4, p. 1–24, 2018. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29652856/>>. Acesso em: 21 jan. 2021. DOI: 10.3390 / toxins10040156.

MAZUMDER, A. et al. Effect of fish and plankton on lake temperature and mixing depth. **Science**, v. 247, p. 312–314, 1990. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17735850/>>. Acesso em: 2 jan. 2021. DOI: 10.1126 / science.247.4940.312.

MERTES, L. A. K. et al. Rivers and lakes. In Remote sensing for natural resource management and environmental monitoring. **Manual of remote sensing**. v. 4, p. 345-400, 2004.

MONTANARO, M. et al. Performance of the Thermal Infrared Sensor on-board Landsat 8 over the first year on-orbit. **Proceedings of SPIE, Earth Observing Systems XIX**. v. 9218-17, 2014.

MONTANARO, M., GERACE, A., ROHRBACH, S. Toward an operational stray light correction for the Landsat 8 thermal infrared sensor. **Appl. Opt.** v. 54, n. 13, p. 3963–3978, 2015.

MULLIGAN, M.; SOESBERGEN, A. V.; SÁENZ, L. GOODD, a global dataset of more than 38,000 georeferenced dams. **Scientific Data**, v. 7, n. 31, dez. 2020. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41597-020-0362-5>>. Acesso em: 2 jan. 2021. DOI: 10.1038/s41597-020-0362-5.

MULLIN, C. A.; KIRCHHOFF, C. J.; WANG, G. Future Projections of Water Temperature and Thermal Stratification in Connecticut Reservoirs and Possible Implications for Cyanobacteria. **Water Resources Research**, v. 56, n. 11, nov. 2020. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020WR027185>>. Acesso em: 2 jan. 2021. DOI: 10.1029/2020WR027185.

NAKAMOTO, S. et al. Chlorophyll modulation of sea surface temperature in the Arabian Sea in a mixed-layer isopycnal general circulation model, **Geophys. Res. Lett.**, v. 27, n. 6, p. 747–750, 2000.

NASA. **Atmospheric Correction Parameter Calculator**. Disponível em: <<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>> Acesso em: 15 jul. 2018.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V.: River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles, **Journal of Hydrology**, v.10, p.282-290, 1970.

NDOSSI, M. I.; AVDAN, U. Application of Open Source Coding Technologies in the Production of Land Surface Temperature (LST) Maps from Landsat: a PyQGIS Plugin. **Remote Sensing**, v. 8, n. 5, 2016. DOI: 10.3390 / rs8050413.

NORT CAROLINA ENVIRONMENTAL QUALITY. **Flores de algas**. Disponível em: <<https://ncdenr.maps.arcgis.com/apps/dashboards/7543be4dc8194e6e9c215079d976e716>>. Acesso em: 14. jun. 2021.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: EdgardBlücher, 2010. 387 p.

O'REILLY, C. M. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. **Geophysical Research Letters**, v. 42, n. 24, dez. 2015. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015GL066235>>. Acesso em: 2 jan. 2021. Doi:10.1002/2015GL066235.

O'SULLIVAN, A. M.; DEVITO, K. J.; CURRY, R. A. The influence of landscape characteristics on the spatial variability of river temperatures. **CATENA**, v. 177, p. 70–83, jun. 2019.

OLSEN, R. C. **Remote sensing from air and space**. SPIE The International Society for Optical Engineering: Washington, 2007, 255 p.

PLANO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ 3. **Uso e ocupação do solo**. Cascavel, 2014. Disponível em: <http://www.iat.pr.gov.br/sites/aguaterra/arquivos_restritos/files/documento/202005/produto_01_caracteristicas_gerais_da_bacia_bp3_2014_v07_final.pdf>. Acesso em: 14. Jun. 2021.

PICCOLROAZ, S. et al. Prediction of river water temperature: a comparison between a new family of hybrid models and statistical approaches. **Hydrological Processes**, 30(21):3901–3917, 2016.

PORTAL ACTION. Regressão linear: análise de resíduos. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/analise-de-regressao/analise-dos-residuos>> Acesso em: 10 jun. 2018.

PRATS, J. et al. Lake SST: Lake Skin Surface Temperature in French inland water bodies for 1999–2016 from Landsat archives. **Earth System Science Data**, v. 10, n. 2, p. 727–743, 2018.

PROENÇA, L. A. O.; HALLEGRAEFF, G. M. Marine and fresh-water harmful algae. **Proceedings of the 17th International Conference on Harmful Algae**, 2017.

REBOUÇAS, A. C. Água doce no mundo e no Brasil. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Orgs.). **Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3 ed. São Paulo: Escrituras, 2006, p. 1-35.

REUTER, D., et al. The Thermal Infrared Sensor (TIRS) on Landsat 8: design overview and pre-launch characterization. **Remote Sens.** v. 7, n. 1, p. 1135–1153, 2015.

RIGOSI, A. et al. Determining the probability of cyanobacterial blooms: the application of Bayesian networks in multiple lake systems. **Ecological Applications**, v. 25 (1), p. 186–199, jan. 2015.

RYAN, J. P. et al. Causality of an extreme harmful algal bloom in Monterey Bay, California, during the 2014–2016 north east Pacific warm anomaly: extreme HAB Causality in Monterey Bay. **Geophys. Res. Lett.** v. 44, p. 5571–5579, 2017.

SABINS, F. F. **Remote sensing: Principles and interpretations**, 3 ed. Wiley: New York, 1996, 494 p.

SALISBURY, J. W.; D'ARIA, D. M. Emissivity of terrestrial materials in the 8–14 μm atmospheric window. **Remote Sensing of Environment**, v. 42, p. 83–106, 1992.

SANT'ANNA, C. L. et al. A new species of *Trichodesmium* (Cyanobacteria) from freshwaters, Brazil. **Rodriguésia**, v. 69, n. 4, p. 2019–2024, dez. 2018.

SANT'ANNA, C. L. et al. Planktic Cyanobacteria from upper Tietê basin reservoirs, SP, Brazil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 30, n. 1, mar. 2007.

SATHYENDRANATH, S. T. et al. Biological control of surface temperature in the Arabian Sea. **Nature**, v. 349 (6304), 54–56, 1991.

SCHAEFFER, B. A. et al. An initial validation of Landsat 5 and 7 derived surface water temperature for U.S. lakes, reservoirs, and estuaries. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 22, p. 7789–7805, nov. 2018.

SCHNEIDER, K. e MAUSER, W. Processing and accuracy of Landsat Thematic Mapper data for lake surface temperature measurement. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 11, p. 2027–2041, 1996.

SERVIÇO NACIONAL DE PESCA E AQUICULTURA – SERNAPESCA. **Sernapesca confirma que se ha retirado el 99% de la mortalidad por contingencia FAN en Los Lagos**. Disponível em: <<http://www.sernapesca.cl/noticias/sernapesca-confirma-que-se-ha-retirado-el-99-de-la-mortalidad-por-contingencia-fan-en-los>> Acesso em: 14. jun. 2021.

SHARAF, N. et al. Lake surface temperature retrieval from Landsat-8 and retrospective analysis in Karaoun Reservoir, Lebanon. **Appl. Remote Sens.** v. 13, n. 4, 2019.

SIMON, R.; TORMOS, T.; DANIS, P. A. Retrieving water surface temperature from archive LANDSAT thermal infrared data: Application of the mono-channel atmospheric correction algorithm over two freshwater reservoirs. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 30, p. 247–250, 2014.

STEFFEN, C. A.; LORENZZETTI, J. A.; STECH, J. L. **Sensoriamento remoto: princípios físicos, sensores e produtos e sistemas Landsat**. São José dos Campos: INPE, 1981. 81p.

TANG, D. et al. In situ and satellite observations of a harmful algal bloom and water condition at the Pearl River estuary in late autumn 1998. **Harmful Algae**, v. 2, n. 2, p. 89–99, jun. 2003.

TANG, H.; LI, Z. L. **Quantitative remote sensing in thermal infrared: theory and applications**. China: Springer, 2014. 298p. DOI 10.1007/978-3-642-42027-6.

TAVARES, M. H. **Estimativas da temperatura superficial da água por sensores remotos: acurácia e aplicabilidade com modelos de temperatura**. 2019. 102 p. Tese (Doutorado em Pesquisas Hidráulicas). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, RS, 2019.

TONOLLA, D. et al. Thermal heterogeneity in river floodplains. **Ecosyst**, v. 13, p. 727–740, 2010.

TORGERSEN, C. E. et al. Multiscale thermal refugia and stream habitat associations of Chinook salmon in northeastern Oregon. **Ecol Appl**, v. 9, p. 301–311, 1999.

TORGERSEN, C.E. et al. Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, p. 386–398, 2001.

TRAINER, V. et al. Pelagic harmful algal blooms and climate change: Lessons from nature's experiments with extremes. In: Trainer, V. L., Moore, S.K., Hallegraeff, G., Kudela, R.M.,

Cochlan, W.P. (Eds.). **Harmful Algae**, v. 91, 101591, 2019.

TRINDADE, P. M. T.; SALDANHA, D. L.; PEREIRA FILHO, W. Utilização do infravermelho termal na análise espaço temporal da temperatura de superfície e ilhas de calor urbanas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.69, n. 4, p. 837-855, 2017.

TUNDISI, J. G. (ed.). **Limnologia e manejo de represas**. V.1. Tomo 1. EESC-USP/ACIESP, 1988. p.1-90.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. Integration of research and management in optimizing multiple uses of reservoirs: the experience in South America and Brazilian case studies. **Hydrobiologia**, v. 500, n. 1-3, p. 231-242, 2003.

TUNDISI, J. G; et al. Limnologia de águas interiores: impactos, conservação e recuperação de ecossistemas aquáticos. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Orgs.). **Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3 ed. São Paulo: Escrituras, 2006, p. 203-240.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Landsat 8 (L8) Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)**. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/calibration_notices.php> Acesso: 1 jun. 2018.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Landsat 8 Overview**. Disponível em: <<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview/>> Acesso em: 1 abr. 2019.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Landsat: the Cornerstone of Global Land Imaging**. Disponível em: <<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-the-cornerstone-of-global-land-imaging/>> Acesso em: 1 abr. 2019.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Using the USGS Landsat 8 Product**. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php> Acesso em: 1 jun. 2018.

VALOR, E.; CASELES, V. Mapping Land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and South Americas áreas. **Remote Sensing of Environment**, v. 7, p. 167 – 184, 1996.

VAN de GRIEND, A. A.; OWE, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. **International Journal Remote Sensing**, v. 14, p. 1119– 1131, 1993.

VAQUER-SUNYER, R.; DUARTE, C. M. Temperature effects on oxygen thresholds for hypoxia in marine benthic organisms. **Glob. Change Biol.** V. 17, n. 5, p. 1788–1797, 2011.

WACHHOLZ, F. **Influência da bacia hidrográfica e características espaço-temporais de variáveis limnológicas sobre reservatórios no Rio Jacuí - RS**. 2011. 196 f. Tese - (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2011.

WANG, S.; TANG, D. Preliminary remote sensing observation of sea surface temperature increase during *Ulva* prolifera blooms. **Aquatic Ecosystem Health e Management**, v. 17, n.

3, p. 299–304, 3 jul. 2014. DOI: 10.1080/14634988.2014.944471.

WANG, S.; TANG, D. Remote sensing of day/night sea surface temperature difference related to phytoplankton blooms. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 17–18, p. 4569–4578, set. 2010. DOI: 10.1080/01431161.2010.485143.

WAWRZY尼亚K, V.; PIEGAY, H.; POIREL, A. Longitudinal and temporal thermal patterns of the French Rhone River using Landsat ETM+ thermal infrared images. **Aquatic Sciences**, v.75, p. 405-414, 2011.

WETZEL, R.G. **Limnology**: lake and river ecosystems. 3.ed. San Diego: Academic Press, 2001. 1006 p.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v.90, p.8995-9005, 1985.

WLOCZYK, C. et al. Sea and lake surface temperature retrieval from landsat thermal data in Northern Germany. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 12, p. 2489–2502, 2006.

YIN, D. et al. Preliminary study on biological characteristics of spring diatom bloom in the Hanjiang river. **Journal of Yangtze River scientific Research Institute**, 6–10. 2012. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2012.02.002.

ZHANG, J.; WANG, Y.; LI, Y. A C++ program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band6. **Comput. Geosci.** v. 32, p. 1796–1805, 2006.

ZHANG, X.P. et al. Studies on the toxic effects of microcystin-LR on the zebrafish (*Danio rerio*) under different temperatures. **J. Appl. Toxicol.** v. 31, p. 561–567, 2011. DOI: 10.1002/jat.1597.