



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

UTILIZAÇÃO DOS MÉTODOS SKATER E K-MEDOIDS PARA REGIONALIZAÇÃO DA REPRESA DE VÁRZEA DAS FLORES, MINAS GERAIS

Vinícius Lima Guimarães

Monografia apresentada ao curso de
Análise Espacial de Dados Geográficos
– SER-301, como requisito parcial à
aprovação no curso, sob orientação do
Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro e Dr.
Eduardo Celso Gerbi Camargo.

INPE
São José dos Campos
2024

RESUMO

Este estudo buscou regionalizar a represa de Várzea das Flores, em Minas Gerais, utilizando sensoriamento remoto e métodos estatísticos para análise de dados geoespaciais, entre 2017 e 2024. Inaugurada em 1972 para suprir a crescente demanda hídrica da Região Metropolitana de Belo Horizonte, a represa sofre de problemas de qualidade da água devido à ocupação e ao uso do solo em sua bacia. As técnicas de regionalização SKATER e K-medoids foram aplicadas para agrupar o espelho d'água em zonas homogêneas, permitindo entender como fatores ambientais, como precipitação e seus afluentes, influenciam suas características. O estudo se baseou em dados de batimetria, turbidez, temperatura de superfície da água e clorofila-a. Dados de temperatura de superfície da represa foram obtidos a partir das bandas do infravermelho termal dos sensores a bordo dos satélites da série Landsat. A batimetria foi coletada no banco de dados *Global lakes bathymetry dataset* (GLOBathy), enquanto a turbidez e a clorofila-a foram estimadas a partir de modelos semiempíricos, baseados em imagens do satélite Sentinel 2 e amostras de campo. A definição dos períodos seco e chuvoso, com base nos dados de precipitação CHIRPS, revelou padrões pluviométricos que influenciam os parâmetros da água. O método K-medoids foi mais eficaz na formação de agrupamentos homogêneos, especialmente em zonas afetadas por atividades antrópicas. O número de clusters para regionalização foi entre 4 e 6, a partir do método Elbow. A análise multivariada da variância indicou diferenças sazonais marcantes, com a temperatura sendo a variável mais influente no processo de regionalização. Esses resultados fornecem informações para ações de gestão e preservação da represa.

Palavras-chave: K-medoids. SKATER. Agrupamento. Várzea das Flores.

ABSTRACT

This study aimed to regionalize the Várzea das Flores reservoir in Minas Gerais using remote sensing and statistical methods for geospatial data analysis from 2017 to 2024. Inaugurated in 1972 to supply the growing water demand of the Belo Horizonte Metropolitan Area, the reservoir faces water quality issues due to land use and occupation in its watershed. The SKATER and K-medoids regionalization techniques were applied to group the water surface into homogeneous zones, enabling an understanding of how environmental factors, such as precipitation and its tributaries, influence its characteristics. The study was based on bathymetry, turbidity, water temperature, and chlorophyll-a data. Water surface temperature data of the reservoir were obtained from thermal infrared bands onboard the Landsat satellite series sensors. Bathymetry was sourced from the Global Lakes Bathymetry Dataset (GLOBathy), while turbidity and chlorophyll-a were estimated using semi-empirical models based on Sentinel-2 satellite images and field samples. The definition of dry and rainy periods, based on CHIRPS precipitation data, revealed rainfall patterns influencing water parameters. The K-medoids method was more effective in forming homogeneous clusters, especially in zones affected by anthropogenic activities. The number of clusters for regionalization ranged from 4 to 6, determined by the Elbow method. MANOVA analysis indicated marked seasonal differences, with temperature being the most influential variable in the regionalization process. These results provide insights for management and preservation actions for the reservoir.

Keywords: K-medoids. SKATER. Clustering. Várzea das Flores.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo: (a) Brasil e Minas Gerais, (b) Minas Gerais e municípios de Contagem e Betim, (c) represa de Várzea das Flores (ANA, 2021) em uma composição PlanetScope cor verdadeira de agosto de 2024.	9
Figura 2 - Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas para regionalização da represa de Várzea das Flores, MG, entre os 2017 e 2024..	10
Figura 3 - Representação gráfica da diferença entre o k-médias e o k-medoids.	15
Figura 4 - Exemplo de visualização do produto de precipitação diária CHIRPS para a bacia hidrográfica da represa de Várzea das Flores, MG, em 1 de janeiro de 2024.	17
Figura 5 - Precipitação mensal acumulada (mm) na bacia hidrográfica da represa de Várzea das Flores, MG, entre 2014 e 2024.....	18
Figura 6 - Aplicação dos modelos mais adequados para a estimativa de clorofila-a e turbidez: (a) Localização das amostras de treinamento e validação coletadas no dia 30/06/2022, em composição Sentinel 2A - MSI cor verdadeira da mesma data. Gráfico de ajuste (b) e aplicação do modelo de regressão (c) para estimativa de turbidez. Gráfico de ajuste (d) e aplicação do modelo de regressão (e) para estimativa de clorofila-a.	19
Figura 7 - Exemplo de reamostragem e alinhamento dos pixels de temperatura de superfície: a) Temperatura de superfície, antes do processo de reamostragem; b) Grade do Sentinel 2 utilizada como referência; c) Temperatura de superfície, após a reamostragem.	21
Figura 8 - Exemplo de reamostragem e alinhamento dos pixels de temperatura de superfície: a) Batimetria, antes do processo de reamostragem; b) Grade do Sentinel 2 utilizada como referência; c) Batimetria, após a reamostragem.	22
Figura 9 - Média dos parâmetros de clorofila-a, turbidez e temperatura de superfície para os períodos seco e chuvoso.	23
Figura 10 - Exemplo de normalização para a média de clorofila-a do período seco. Na esquerda superior, se apresenta a clorofila-a. Na direita superior, a clorofila-a normalizada. Na parte inferior, o vetor da grade de clorofila-a normalizada.	23
Figura 11 - Exemplos de diferentes regionalizações considerando os dois métodos aplicados, diferentes quantidades de clusters e diferentes períodos.	24
Figura 12 - Gráfico da Soma dos Erros Quadráticos por número de clusters. Regionalização no período seco pelo método K-medoids (a) e SKATER (b). Regionalização no período chuvoso pelo K-medoids (c) e o SKATER (d).	25
Figura 13 - Regionalização da represa de Várzea das Flores pelo K-medoids, no período seco.....	25
Figura 14 - Pontos visitados em campo (26/03/2023 e 16/04/2023): Área de mineração de gnaiss (Ponto 1), na microbacia do Córrego Bela Vista. Despejo de resíduos sólidos em nascente do Ribeirão Betim (Ponto 2) e Córrego Água Suja (Ponto 3). Esgoto doméstico sendo lançado diretamente no solo da microbacia (Ponto 4) e em tributário (Ponto 5) do Córrego Água Suja.	26
Figura 15 - Regionalização da represa de Várzea das Flores pelo K-medoids, no período chuvoso.	29

Figura 16 - Comparação entre a regionalização do K-medoids ($k = 6$) com todas as variáveis e sem uma das variáveis, no período seco e chuvoso. 31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos dados utilizados no trabalho.	10
Tabela 2 - Valores dos parâmetros de turbidez, clorofila-a e temperatura de superfície para as zonas intermediárias entre a margem de alta produtividade e a zona profunda 3, obtidas pela regionalização da represa de Várzea das Flores, MG, para o período seco, pelo K-medoids.	28
Tabela 3 - Valores dos parâmetros de batimetria, turbidez, clorofila-a e temperatura de superfície para as zonas intermediárias entre as margens e a zona profunda, obtidas pela regionalização da represa de Várzea das Flores, MG, para o período chuvoso.	29
Tabela 4 - MANOVA - Comparação entre a regionalização pelo método K-medoids ($k = 6$) no período seco e no período chuvoso.	30
Tabela 5 – MANOVA - Comparação entre a regionalização do K-medoids ($k = 6$) com todas as variáveis e sem uma das variáveis, no período seco.	31
Tabela 6 – MANOVA - Comparação entre a regionalização do K-medoids ($k = 6$) com todas as variáveis e sem uma das variáveis, no período chuvoso.	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	MATERIAIS E MÉTODOS	9
2.1	Área de estudo.....	9
2.2	Base de dados	10
2.3	Procedimentos metodológicos	10
2.3.1	Definição dos períodos seco e chuvoso	11
2.3.2	Estimativa de turbidez e clorofila-a	12
2.3.3	Coleta e tratamento de dados de temperatura de superfície	13
2.3.4	Coleta e tratamento de dados de batimetria	13
2.3.5	Cálculo de média por período e normalização dos dados	14
2.3.6	Regionalização por K-medoids e SKATER.....	14
2.3.7	Método Elbow	16
2.3.8	MANOVA	17
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
3.1	Definição de períodos de mesmo regime pluviométrico	17
3.2	Modelos semiempíricos para estimativa de turbidez e clorofila-a	19
3.3	Temperatura de superfície e batimetria da represa de Várzea das Flores	21
3.4	Média e normalização dos parâmetros	22
3.5	Regionalizações.....	24
3.6	Resultados da MANOVA.....	30
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	32
5	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto é uma alternativa para o monitoramento com alta frequência temporal de importantes características de corpos d'água, como a batimetria, temperatura, clorofila-a e turbidez, podendo ser considerado financeiramente e logisticamente mais viável que o monitoramento realizado por análises *in situ* (MARTINS et al., 2014; DUTKIEWICZ et al., 2015; HICKMAN ET AL., 2020; KHAZAEI et al., 2022; XIONG et al., 2023). Tal abordagem fornece informações para aplicação de diferentes técnicas de regionalização dos corpos d'água (LONGHURST, 2007; KAVANAUGH et al., 2016).

Estes procedimentos de regionalização buscam agrupar grandes objetos espaciais em unidades menores com características internas homogêneas (ASSUNÇÃO et al., 2006). As abordagens predominantemente utilizadas para realização de regionalizações de corpos hídricos são a de classificação supervisionada e não supervisionada (KRUG et al., 2017). Estas, no entanto, são responsáveis por criar *clusters* que capturam de maneira limitada a adjacência espacial e os padrões espaciais (ASSUNÇÃO et al., 2006).

Métodos como o Spatial 'K' Adaptive Tree (SKATER) (ASSUNÇÃO et al., 2006) e o K-medoids (KAUFMAN e ROUSSEAU, 1990) buscam superar tais limitações. Enquanto o SKATER cria regiões contínuas e interligadas pelas relações de dissimilaridade de uma árvore mínima gerada pela adjacência entre geo-objetos (ASSUNÇÃO et al., 2006), o K-medoids cria *k* regiões a partir dos pontos de maior centralidade/representatividade entre as observações existentes (KAUFMAN e ROUSSEAU, 1990; ENTEZAMI, SARMAZI e RAZAVI, 2020).

A aplicação de tais métodos de regionalização apresentam o potencial de caracterizar, em represas de abastecimento hídrico, áreas com características semelhantes, influenciadas de maneiras distintas pelas dinâmicas do uso e cobertura do solo, precipitação e vazão em sua bacia hidrográfica, em diferentes regimes pluviométricos. Assim, reservatórios em que tais elementos interagem de maneira complexa, como a represa de Várzea das Flores, em Minas Gerais, podem ter seu comportamento compreendido de maneira mais aprofundada, fornecendo ferramentas para que os gestores de recursos hídricos realizem ações de monitoramento e preservação mais bem fundamentadas.

Inaugurada em 1972, a partir de um convênio entre os municípios de Betim e Contagem, com intuito de suprir a demanda hídrica do crescente adensamento urbano desses municípios, a represa de Várzea das Flores é responsável por abastecer 15% da Região Metropolitana de Belo Horizonte (SANTOS et al., 2018; CARVALHO, 2022). Apesar desta vital importância para o abastecimento hídrico, a represa tem sua qualidade diretamente afetada pela configuração do uso e ocupação do solo de sua bacia hidrográfica (SANTOS, 2012; MAGALHÃES JÚNIOR et al., 2016; SANTOS et al., 2018; CARVALHO, 2022; ANM, 2022). Aplicar técnicas para regionalização do seu espelho, portanto, se apresenta enquanto um potencial meio para entendimento das características de tal sistema aquático.

Este trabalho teve como objetivo geral aplicar e comparar os métodos SKATER e K-medoids para a regionalização da represa de Várzea das Flores, entre 2017 e 2024, no período seco e chuvoso, utilizando dados de batimetria, turbidez,

temperatura e clorofila-a. Assim, foram desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

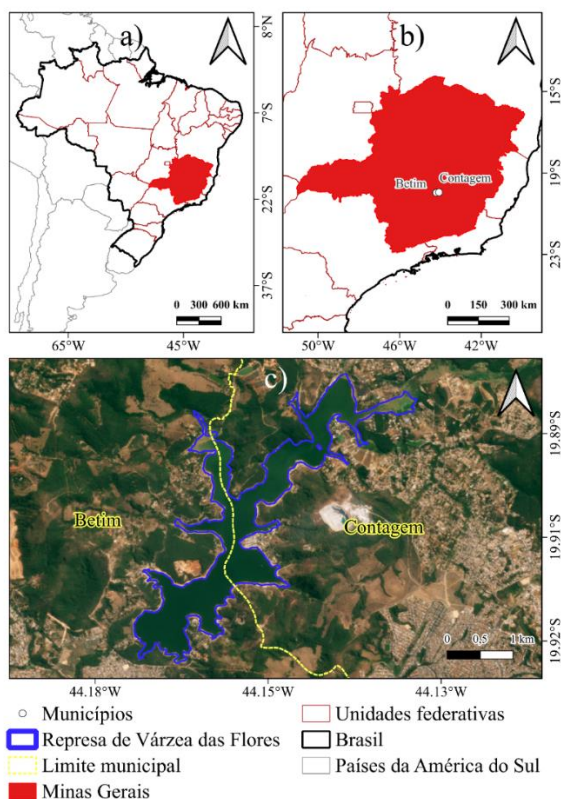
- Definir qual o modelo de regionalização é mais adequado para o período seco e chuvoso.
- Avaliar qual das variáveis utilizadas teve a maior influência no processo de regionalização.
- Determinar o número ideal de grupos a serem formados no processo de regionalização.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Localizada na região central de Minas Gerais (Figura 1) e a aproximadamente 30 km da capital estadual Belo Horizonte, a represa de Várzea das Flores tem uma área de 3,76 km², sendo que 54,43% de sua área cobre o município de Contagem e os outros 45,57% cobrem o município de Betim (ANA, 2021). Sua bacia hidrográfica apresenta 123,27 km², estando inserida na porção média da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, pertencente à bacia federal do Rio São Francisco (SANTOS, 2012; MAGALHÃES JÚNIOR et al., 2016).

Figura 1 - Localização da área de estudo: (a) Brasil e Minas Gerais, (b) Minas Gerais e municípios de Contagem e Betim, (c) represa de Várzea das Flores (ANA, 2021) em uma composição PlanetScope cor verdadeira de agosto de 2024.



Fonte: autoria própria.

2.2 Base de dados

A Tabela 1 apresenta, em resumo, os dados utilizados para realização do trabalho, bem como as suas fontes, ano e tipo.

Tabela 1 - Descrição dos dados utilizados no trabalho.

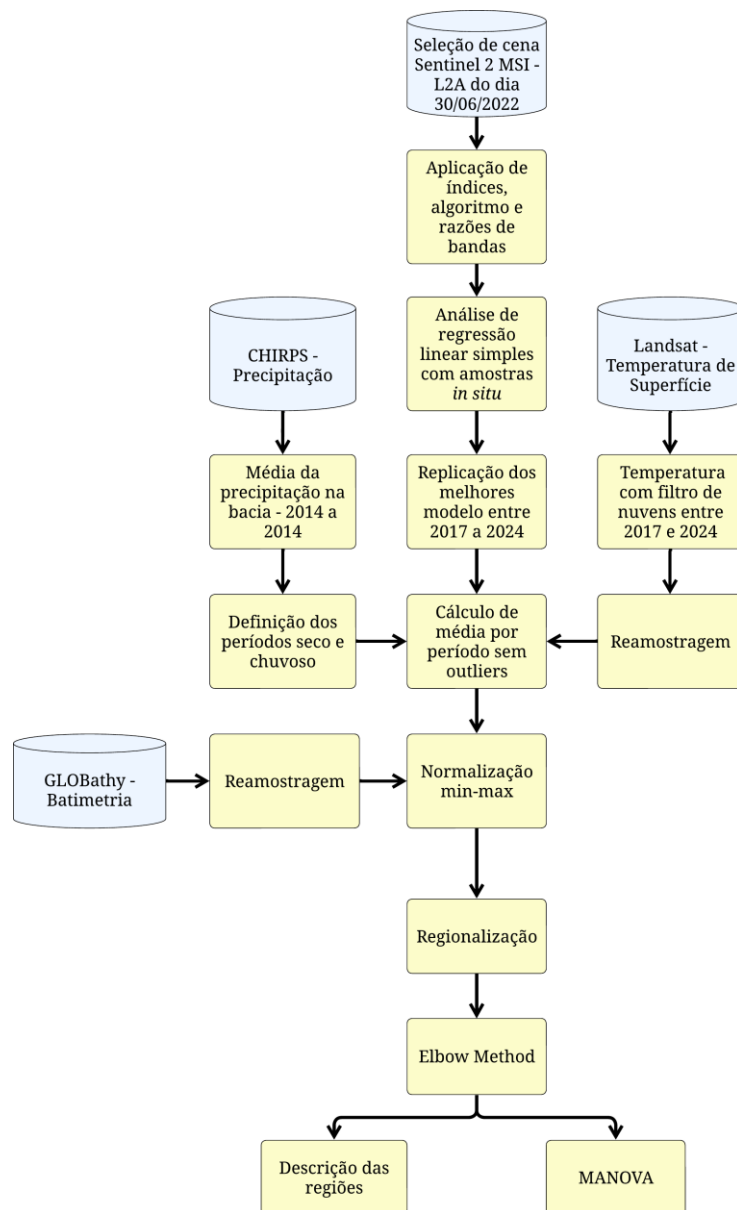
Dado	Fonte	Ano	Tipo
Amostras <i>in situ</i> de turbidez e clorofila-a	Próprio autor	2022	Vetorial (Ponto)
Imagens ópticas Sentinel 2 MultiSpectral Instrument (L2A)	European Space Agency (ESA)	2017-2024	Raster (20m)
Temperatura de superfície de cenas Landsat Level-2	United States Geological Survey (USGS)	2017-2024	Raster (30m)
Batimetria estimada pelo Global lakes bathymetry dataset (GLOBathy)	Khazaei et al.	2022	Raster (30m)
Precipitação mensal	Climate Hazards Center InfraRed Precipitation With Station Data (CHIRPS)	2014-2024	Raster (0,05°)

Fonte: autoria própria.

2.3 Procedimentos metodológicos

Um fluxograma da metodologia do trabalho é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas para regionalização da represa de Várzea das Flores, MG, entre os 2017 e 2024.



Fonte: autoria própria.

2.3.1 Definição dos períodos seco e chuvoso

Embora a literatura defina que a área apresenta um clima tropical de altitude com verão úmido, entre outubro e março, e inverno seco, entre abril e setembro (SANTOS, 2012; MOREIRA JÚNIOR, 2018; PENA, 2018), aplicou-se uma metodologia para definir, dentro do período de análise, os períodos seco, chuvoso e muito chuvoso. O intuito desta definição foi conseguir distinguir, dentro do período analisado, meses em que o regime pluviométrico na área de estudo era semelhante e, potencialmente, refletia padrões similares nos parâmetros de turbidez, clorofila-a e temperatura na represa.

Para tal, foi criado um [script](#) no Google Earth Engine (GEE), em que os valores das médias de precipitação diária na bacia hidrográfica da represa de Várzea das Flores, obtidos a partir dos dados do Climate Hazards Center InfraRed Precipitation With Station Data (CHIRPS) entre 2014 a 2024, foram calculados e

exportados para uma planilha. O CHIRPS é um produto em que informações da Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) e dados de mais 12000 estações pluviométricas são utilizados para interpolação e criação de grades de precipitação com resolução espacial de 0,05°, desde 1981 (FUNK et al., 2015).

A partir desses dados, adotaram-se os limiares de 50% e 150% da precipitação mensal acumulada entre 2014 e 2024 para definir os períodos seco (<50%), chuvoso (50%-150%) e muito chuvoso (>150%). Este critério foi utilizado para diferenciar as variações extremas no regime pluviométrico anual, distinguindo as condições médias das anomalias de precipitação significativas, facilitando a análise de variabilidade climática e a identificação de três períodos com padrão pluviométrico similar (seco, chuvoso e chuvoso intenso).

2.3.2 Estimativa de turbidez e clorofila-a

A clorofila-a é o principal pigmento fotossintético fitoplanctônico, sendo um indicador da biomassa desses organismos unicelulares encontrados em sistemas aquáticos. Estes são responsáveis por uma considerável parcela da produção primária, formando a base da cadeia alimentar aquática (MARTINS et al., 2017; HICKMAN et al., 2020). Já a turbidez serve como uma medida de aproximação da atenuação causada pela soma do material orgânico e inorgânico particulado e dissolvido em suspensão, apresentando correlação positiva com a reflectância, na parte vermelha do espectro eletromagnético (DOGLIOTTI et al., 2015; ADJOVU et al., 2023).

Considerando que ambos parâmetros são importantes indicadores da qualidade da água possíveis de estimar por sensoriamento remoto, foram criados dois modelos semiempíricos para estimativa de turbidez e clorofila-a. Para tal, foi feita a seleção, no GEE, de uma imagem de reflectância de superfície do dia 30/06/2022, obtida na área de estudo aproximadamente às 13:17, pelo sensor MultiSpectral Instrument (MSI) a bordo do satélite Sentinel 2A, e disponibilizada em seu nível de processamento L2A, com correção atmosférica pelo algoritmo Sen2Cor (ESA, 2022). Em conjunto às 10 bandas de reflectância de superfície, que abrangem o intervalo entre 496,6 e 2202,4 nm, foram aplicados 28 índices, razões de banda e algoritmos, conforme apresentado por Guimarães et al. (2024).

Estas informações foram utilizadas como variáveis independentes em diferentes modelos de regressão linear simples com amostras georreferenciadas de turbidez e clorofila-a, adquiridas entre 09:00 e 11:30, do mesmo dia da imagem. As amostras foram coletadas com o apoio e permissão da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), em 34 pontos da represa. Utilizou-se a sonda multiparâmetro YSI EXO2 para coletar dados de turbidez e clorofila-a, entre 15 e 30 cm de profundidade.

Das amostras, 24 (70%) foram selecionadas aleatoriamente para o treinamento dos modelos, enquanto as outras 10 (30%) foram usadas para a validação. Verificou-se, assim, quais dados provenientes da imagem Sentinel 2 atendiam, nas amostras de treinamento e validação, aos pressupostos da regressão linear, como linearidade, independência e normalidade dos erros e homocedasticidade. Foram selecionados os modelos que apresentaram os menores valores de erro médio absoluto (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE), e os maiores valores de coeficiente de determinação (R^2) e R^2 ajustado.

Com os modelos semiempíricos criados, foi feita a estimativa dos parâmetros de turbidez e clorofila-a para todas as imagens Sentinel 2 L2A MSI disponibilizadas na área de estudo entre 2017 e 2024. Os pixels de nuvens e sombras de nuvens foram filtrados, selecionando apenas os pixels de água, a partir da máscara do Scene Classification Layer (SCL) (GASCON et al., 2017).

2.3.3 Coleta e tratamento de dados de temperatura de superfície

A temperatura de superfície é um importante indicador das condições ambientais de sistemas aquáticos, sendo modificada pelas características climáticas, meteorológicas e de uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica em que se inserem (DOKULIL et al., 2021; ATTIAH et al., 2023). Influenciando processos ecológicos, biológicos e hidrogeoquímicos, como a produtividade e estratificação da coluna d'água (DOKULIL et al., 2021; ATTIAH et al., 2023), esta é uma variável essencial no processo de regionalização.

Neste sentido, foram coletados dados de temperatura de superfície da série Landsat, obtidos entre 2017 e 2024, em seu nível 2, com correção atmosférica pelo algoritmo Land Surface Reflectance Code (LaSRC). Esses dados foram registrados pelas bandas do infravermelho termal, disponibilizados em resolução espacial reamostrada de 30 metros, do sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), a bordo do satélite Landsat 7, e do Operational Land Imager and the Thermal Infrared Sensor (OLI/TIRS), presente nos satélites Landsat 8 e 9. Enquanto a banda termal do ETM+ abrange o intervalo entre 10,4 e 12,50 μm , a banda utilizada no trabalho, presente no OLI, obtém informações entre 10,6 e 11,19 μm (USGS, 2024).

Foram coletadas todas as datas com informação de temperatura de superfície, no período de análise, sendo utilizados exclusivamente os pixels de água, a partir da máscara proveniente do algoritmo C FUnction of Mask (CFMask) (FOGA et al., 2017). Considerando que o tamanho e a posição dos pixels das imagens de temperatura de superfície diferem dos pixels das imagens Sentinel 2, foi realizado um processo de reamostragem e alinhamento espacial dos pixels das imagens Landsat para coincidir com a resolução espacial e o arranjo dos pixels da imagem Sentinel 2.

2.3.4 Coleta e tratamento de dados de batimetria

A batimetria é responsável por determinar a profundidade e o volume de água e influenciar processos hidrológicos e hidrodinâmicos, como o transporte de sedimentos e nutrientes, a produtividade, a distribuição de organismos e a dinâmica de estratificação (YAO et al., 2018; LIU e SONG, 2022; MARTINSEN et al., 2023). O levantamento de tal informação em campo fornece medidas acuradas de profundidade, porém, envolve custos elevados, sendo necessário o emprego de sonar a bordo de embarcações ou LiDAR (GAO, 2009).

Métodos alternativos para estimativa da batimetria são assim empregados, sendo utilizadas informações da topografia adjacente ao corpo d'água para inferência da profundidade em diferentes modelos computacionais (MARTINSEN et al., 2023). Neste sentido, Khazaei et al. (2022) fornecem um conjunto de dados de batimetria global, o Global lakes bathymetry dataset (GLOBathy), em que mais de 1,4 milhões de corpos d'água têm sua batimetria estimada, a partir de um modelo de regressão Random Forest baseado nos

dados da plataforma HydroLAKES, que fornece informações de área, volume, elevação de superfície e linha de costa.

Apresentando resolução espacial de 30 metros, este modelo foi validado com dados de 1503 corpos d'água, tendo coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE = 0,97), viés percentual (PBIAS = -1,08%), erro quadrático médio normalizado (NRMSE = 0,17) e o coeficiente de correlação de Spearman igual a 0,94. Este dado foi coletado no GEE para a represa de Várzea das Flores. Dada a diferença de resolução em relação ao Sentinel 2, foi realizado um processo de reamostragem e alinhamento espacial dos pixels, semelhante ao procedimento adotado para os dados de temperatura de superfície, utilizando a grade matricial do Sentinel 2 como referência.

2.3.5 Cálculo de média por período e normalização dos dados

Foi feito o cálculo da média das variáveis de turbidez, clorofila-a e temperatura de superfície para cada pixel (Equação 1), para o período seco e o período chuvoso. Esse cálculo de média considerou, em cada pixel, apenas valores válidos (sem outliers) e positivos, filtrados de acordo com o intervalo interquartil (TUKEY, 1997).

$$\bar{X}_{pixel} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \text{ onde } X_i \in [Q_1 - 1,5 \times IQR, Q_3 + 1,5 \times IQR] \quad (1)$$

onde:

- $\bar{X}_{pixel}$ é a média dos valores válidos para cada pixel;
- X_i representa o valor do pixel na imagem i após a exclusão de outliers;
- Q_1 e Q_3 são o primeiro e terceiro quartil dos valores do pixel ao longo do tempo;
- $IQR = Q_3 - Q_1$ é o intervalo interquartil;
- n é o número de imagens que têm valores válidos dentro do intervalo determinado.

Dessa forma, as médias de turbidez, clorofila-a e temperatura de superfície, para ambos os períodos, em conjunto com o dado de batimetria, foram normalizadas (Equação 2), a partir do método mínimo-máximo. A normalização é uma etapa necessária para que, no processo de regionalização, variáveis com diferentes unidades de medida tenham o mesmo peso.

$$X_{\text{normalizado}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

Onde X é o valor original da variável, $X_{\min}$ é o valor mínimo da variável, $X_{\max}$ é o valor máximo da variável no conjunto de dados e $X_{\text{normalizado}}$ é a variável normalizada.

2.3.6 Regionalização por K-medoids e SKATER

Foram utilizados os algoritmos K-medoids e SKATER para regionalização do espelho d'água da represa de Várzea das Flores, via uso da linguagem de programação Python, tendo como entrada as variáveis normalizadas de temperatura de superfície, turbidez, batimetria e clorofila-a. O processo de agrupamento pelo método k-médias consiste em agrupar um conjunto de amostras em k clusters, de modo que a Soma dos Quadrados dos Erros (SQE)

entre as amostras e o centroide do cluster seja mínima, tendo a distância euclidiana como métrica de proximidade (MacQUEEN, 1967). Assim, a média entre as observações é utilizada como o centroide de cada cluster, o que torna a clusterização pelo método k-médias sensível a outliers e ruídos (ENTEZAMI, SARMADI e RAZAVI, 2020).

Como alternativa a essa limitação, Kaufman e Rousseeuw (1990) propuseram o K-medoids. Neste método de agrupamento, não a média, mas um ponto mais centralmente localizado dentre as amostras existentes, ou medoide, é utilizado como referência para criação de cada cluster. Assim, o k-medoids é menos sensível a outliers e ruídos, se comparado ao k-médias, sendo que, para tal, é utilizada uma métrica de proximidade, como a distância Euclidiana, de Manhattan ou Mahalanobis, para encontrar o medoide do cluster que minimize a dissimilaridade total para todos os outros possíveis medoides no mesmo cluster. Tendo como medida de proximidade a distância euclidiana entre dois vetores x_i e x_j de s dimensões (Equação 3), o SQE na clusterização por k-medoids é dado pela Equação 4.

$$D_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^T (x_i - x_j)} \quad (3)$$

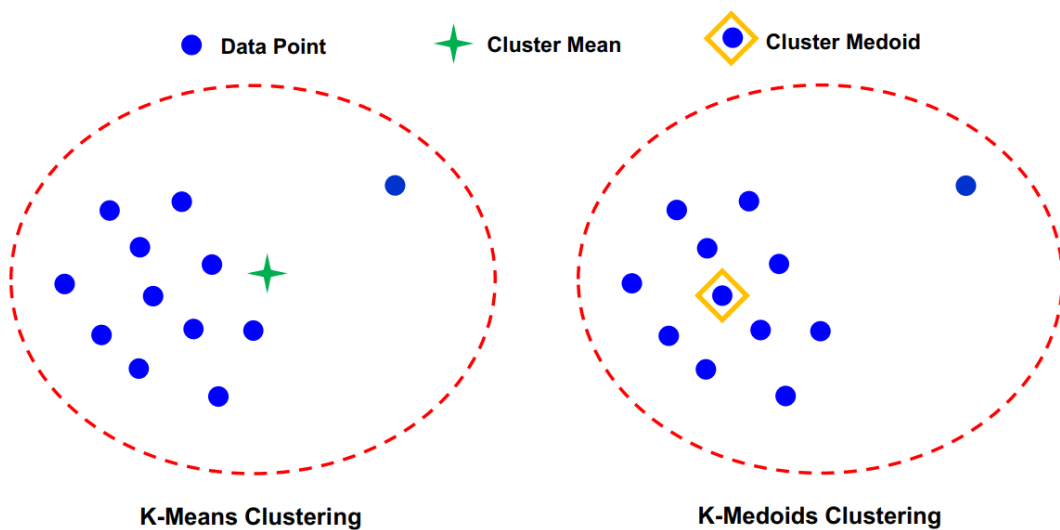
$$SQE = \sum_{r=1}^k \sum_{c(i)=k} \sqrt{(x_i - c_k)^T (x_i - c_k)} \quad (4)$$

onde:

- $D_{i,j}$ é a distância euclidiana entre dois vetores x_i e x_j de s dimensões;
- k é o número de clusters;
- c_k é o centroide do cluster k ;
- $\sum_{r=1}^k$ corresponde ao somatório externo que abrange todos os clusters;
- $\sum_{c(i)=k}$ é o somatório interno que considera apenas os pontos pertencentes ao cluster k .

A Figura 3 apresenta uma representação gráfica da diferença entre o k-médias e o k-medoids.

Figura 3 - Representação gráfica da diferença entre o k-médias e o k-medoids.



Fonte: Entezami, Sarmadi e Razavi (2020).

Como outro método possível para regionalização, surge o Spatial 'K'cluster Analysis by Tree Edge Removal (ASSUNÇÃO et al., 2006). Este se baseia na criação e particionamento de uma árvore geradora mínima (AGM), que resulta em regiões homogêneas espacialmente contíguas. Para tal, ela gera inicialmente um grafo de continuidade, tendo cada unidade espacial (vértices x_i e x_j representados pelos centroides dos geo-objetos) como um nó e as relações de vizinhança entre os nós dadas pelas áreas, ponderadas pela dissimilaridade entre as unidades espaciais conectadas medida, por exemplo, pela distância de Manhattan (Equação 5).

$$D_{i,j} = \sum_{l=1}^n |x_{il} - x_{jl}| \quad (5)$$

onde:

- $D_{i,j}$ é a distância de Manhattan entre as unidades i e j ;
- x_{il} e x_{jl} são os valores dos l atributos das unidades i e j ;
- n é o número total de atributos.

A partir do grafo, gera-se a AGM, em que todos os vértices do grafo são conectados sem a formação de ciclos, considerando a aresta de menor custo no processo de conexão, obtida pela mínima soma total dos pesos das arestas. Com a AGM criada, o SKATER remove as arestas com os maiores valores de dissimilaridade (maior custo), considerando a minimização da soma dos desvios quadráticos internos (SDQI) entre as variáveis de cada unidade espacial dentro do cluster (Equação 6).

$$SDQI = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in c_k} (x_i - \bar{x}_{c_k})^2 \quad (6)$$

em que:

- K é o número de clusters;
- c_k é o cluster;
- x_i é o valor da variável para a unidade i no cluster k ;
- $\bar{x}_{c_k}$ é a média das variáveis para o cluster k .

Com o intuito de testar não somente dois métodos diferentes de regionalização, foram utilizadas também diferentes medidas de proximidade. Assim, a distância euclidiana foi implementada no K-medoids e a distância de Manhattan no SKATER.

2.3.7 Método Elbow

Considerando que ambos os métodos de agrupamento não fornecem um número ideal de clusters para regionalização, aplicou-se o método Elbow para definir qual o número mínimo de regiões no espelho d'água, tanto no período seco quanto no período chuvoso, entre 2 e 10 clusters (THORNDIKE, 1953). Este é um método que se baseia na análise gráfica da Soma dos Quadrados dos Erros intra-cluster à medida que se aumenta o número de k , até o ponto em que o aumento no número de clusters não reduz significativamente o SQE.

Este ponto forma uma feição no gráfico similar a um cotovelo, que sugere o número mínimo de clusters adequado. Dessa forma, o método Elbow permitiu identificar o valor de k em que um aumento de clusters gerava diminuições marginais do SQE. Além disso, o gráfico utilizado para definir o número mínimo de clusters também serviu para identificar o método mais adequado para a regionalização da represa de Várzea das Flores, nos períodos seco e chuvoso, considerando o menor valor de SQE. Os valores de SQE para cada valor de k ,

em cada método, foram utilizados como métrica para avaliar o método mais eficiente.

Com o número mínimo de regiões e o método mais eficiente estabelecidos, definiu-se o número final de clusters considerando, além disso, a criação de regiões que refletissem a contribuição dos principais afluentes da represa (Ribeirão Betim, Córrego Bela Vista e Córrego Água Suja). Isso foi verificado através dos valores máximo, mínimo e médio das variáveis de entrada, que permitiram identificar áreas com maior influência das descargas de efluentes desses rios.

2.3.8 MANOVA

Considerando o melhor método de regionalização e a quantidade escolhida de clusters, foi realizada uma Análise de Variância Multivariada (MANOVA) (O'BRIEN e KAISER, 1985) para comparar as regionalizações do período seco e do período chuvoso, no sentido de verificar se houve diferenças sazonais estatisticamente significativas entre essas regionalizações. Além disso, para entender a influência de cada variável na composição das regiões, foram realizadas análises MANOVA entre a regionalização obtida com o conjunto completo de variáveis com aquelas em que uma variável foi removida por vez. Por essa abordagem, foi possível verificar qual variável tinha maior influência no processo de regionalização da represa em cada período.

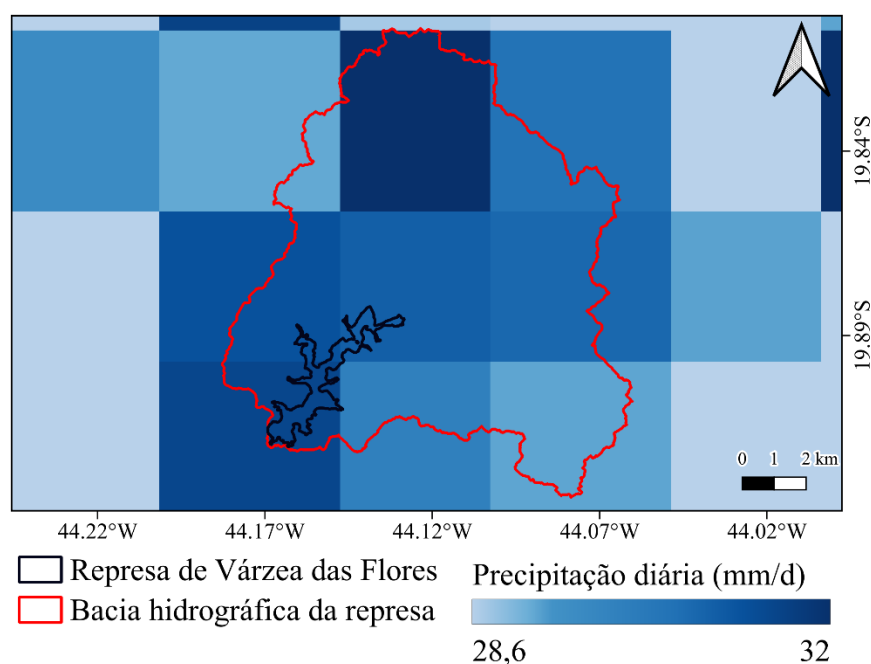
A MANOVA é uma extensão da análise de variância que permite testar a influência de variáveis independentes (turbidez, clorofila-a, temperatura de superfície e batimetria) sobre várias variáveis dependentes (clusters) ao mesmo tempo, considerando a relação existente entre elas (O'BRIEN e KAISER, 1985). Esta análise fornece algumas métricas, necessárias para avaliação estatística das comparações realizadas no trabalho. Para tal, utilizou-se as métricas Wilk's Lambda, que avalia a proporção da variabilidade total não explicada pelos clusters, o Pillai's Trace, que considera a soma das variâncias explicadas, o Hotelling-Lawley Trace, que compara as médias dos clusters e o Roy's Greatest Root, que identifica a maior raiz característica da matriz (O'BRIEN e KAISER, 1985), permitindo determinar a maior diferença entre as regiões analisadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Definição de períodos de mesmo regime pluviométrico

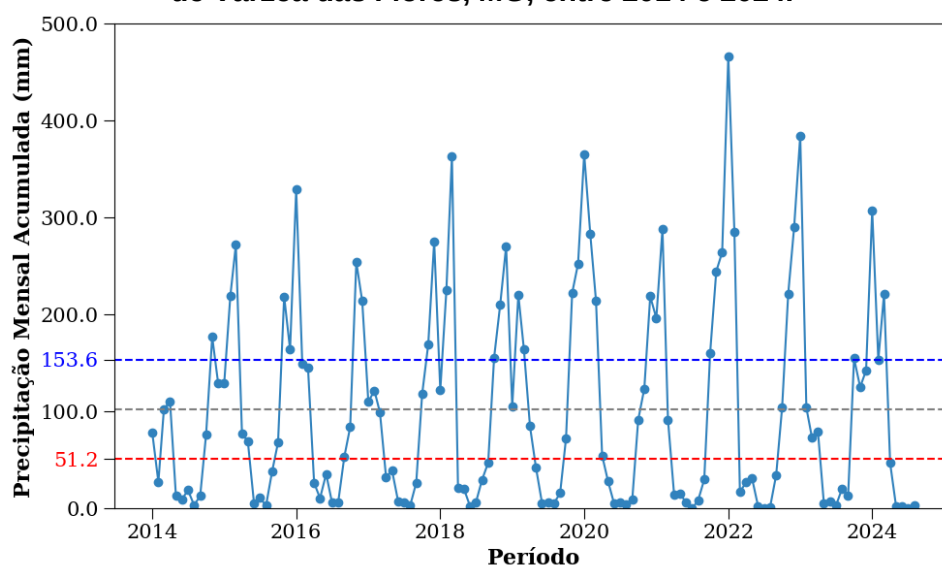
A área da bacia hidrográfica da represa de Várzea das Flores abrangeu 9 pixels do produto de precipitação diária CHIRPS (Figura 4). Definiram-se, assim, os valores de precipitação mensal acumulada, com a área não apresentando chuva nos meses de julho de 2021, 2022 e 2024, e o extremo de chuva mensal acumulada em janeiro de 2022, em que foram registrados 466,72 mm. A precipitação mensal acumulada média para o período de 2014 a 2024 foi de 102,41 mm, com 150% da precipitação correspondente a 153,6 mm e 50% da precipitação igual a 51,2 mm. Conforme mostrado na Figura 5, os meses pertencentes ao período seco foram aqueles em que a precipitação acumulada foi inferior a 51,2 mm; chuvoso, entre 51,2 mm e 153,6 mm; e chuvoso intenso, superior a 153,6 mm.

Figura 4 - Exemplo de visualização do produto de precipitação diária CHIRPS para a bacia hidrográfica da represa de Várzea das Flores, MG, em 1 de janeiro de 2024.



Fonte: autoria própria.

Figura 5 - Precipitação mensal acumulada (mm) na bacia hidrográfica da represa de Várzea das Flores, MG, entre 2014 e 2024.



Fonte: autoria própria.

A definição dos períodos fez com que 7 (10,77%) meses do inverno seco, entre abril e setembro (SANTOS, 2012; MOREIRA JÚNIOR, 2018; PENA, 2018), fossem considerados chuvosos ou de chuvas intensas. Por outro lado, 2 meses (3,17%) dos meses do verão chuvoso, entre abril e setembro (SANTOS, 2012; MOREIRA JÚNIOR, 2018; PENA, 2018), foram considerados secos. Assim, 13,94% dos meses entre 2014 e 2024 não se enquadram na definição previamente estabelecida (SANTOS, 2012; MOREIRA JÚNIOR, 2018; PENA, 2018) para os regimes sazonais de precipitação. Assim, o processo de reclassificação dos meses em períodos personalizados (seco, chuvoso e chuvoso intenso), em vez de enquadrá-los rigidamente nas estações, fornece

limites para que, no processo de regionalização por período, sejam analisadas somente as variáveis de turbidez, clorofila-a e temperatura de superfície cujaS variações estão associadas a um mesmo regime pluviométrico na bacia hidrográfica.

Tal abordagem, no entanto, apresenta algumas limitações. A primeira delas diz respeito à baixa resolução espacial do CHIRPS, igual a 0,05°. Isso faz com que áreas da bacia hidrográfica em que não houve precipitação apresentem valores de chuva, associados à mistura intrapixel com áreas fora da bacia em que houve. O CHIRPS, por sua resolução espacial, também é ajustado e validado para uma escala diferente da trabalhada. Métodos adicionais para validação do produto à área de estudo, a partir de estações pluviométricas da região, bem como a utilização destas estações para criação de superfícies de precipitação com maior resolução espacial por modelos de interpolação, são possibilidades para superação destas limitações. Outra possível limitação para definição dos períodos é a utilização exclusiva da precipitação como fator associado à variabilidade da turbidez, clorofila-a e temperatura de superfície. Definições de períodos baseando-se em outras variáveis, como vazão e descarga de afluentes, são possíveis melhorias para futuros trabalhos.

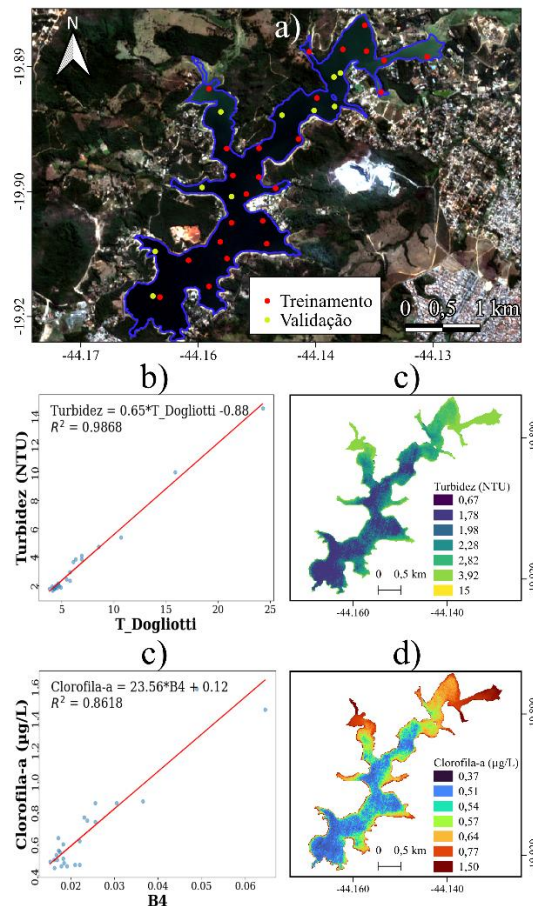
3.2 Modelos semiempíricos para estimativa de turbidez e clorofila-a

Entre as variáveis que atendiam aos pressupostos da regressão linear simples, a banda 4 (664,5 nm) e o algoritmo de Dogliotti et al. (2015) foram selecionados como os mais adequados para a estimativa de clorofila-a e turbidez, respectivamente. O desempenho destes se explica pela banda do vermelho ter boa correlação com a turbidez e correlação moderada com a clorofila-a em águas de baixa turbidez (DOGLIOTTI et al., 2015; XING et al., 2007). Assim, criou-se dois modelos (Equações 7 e 8) para estimativa das variáveis, considerando a imagem e as amostras de treinamento (Figura 6).

$$Turbidez = T_Dogliotti * 0,65 - 0,88 \quad (7)$$

$$Clorofila - a = B4 * 23,56 + 0,12 \quad (8)$$

Figura 6 - Aplicação dos modelos mais adequados para a estimativa de clorofila-a e turbidez: (a) Localização das amostras de treinamento e validação coletadas no dia 30/06/2022, em composição Sentinel 2A - MSI cor verdadeira da mesma data. Gráfico de ajuste (b) e aplicação do modelo de regressão (c) para estimativa de turbidez. Gráfico de ajuste (d) e aplicação do modelo de regressão (e) para estimativa de clorofila-a.



Fonte: autoria própria.

O modelo semiempírico desenvolvido para estimativa de turbidez apresentou R^2 de 0,98 no treinamento e 0,83 na validação, bem como R^2 ajustado de 0,98 e 0,81, respectivamente. O erro médio absoluto (MAE) foi de 0,25 (NTU) no treinamento e 0,17 (NTU) na validação, enquanto o RMSE foi igual a 0,32 (NTU) e 0,20 (NTU), respectivamente. Tais métricas indicam robustez do modelo, sendo passível de utilização para aproximação da turbidez na represa em outras datas. Esse também pode ser utilizado para o monitoramento da represa, tanto pelos agentes da COPASA quanto por outros membros da sociedade, como pesquisadores e gestores ambientais.

O modelo desenvolvido para estimativa de clorofila-a, por sua vez, apresentou R^2 igual a 0,86 no treinamento e 0,49 na validação. Com o mesmo valor para o R^2 ajustado no treinamento (0,86), ele apresentou um valor menor na validação, igual a 0,43. Os valores de MAE foram de 0,08 µg/L no treinamento e 0,05 µg/L na validação, com o RMSE igual a 0,11 µg/L e 0,06 µg/L. Apesar de ser o modelo que melhor explica a variabilidade dos dados *in situ*, este não apresenta potencial de utilização para monitoramento da clorofila-a na represa, considerando as métricas avaliadas. Assim, ele só foi utilizado no trabalho como uma maneira de ter um valor aproximado desta variável, para realização do processo de regionalização.

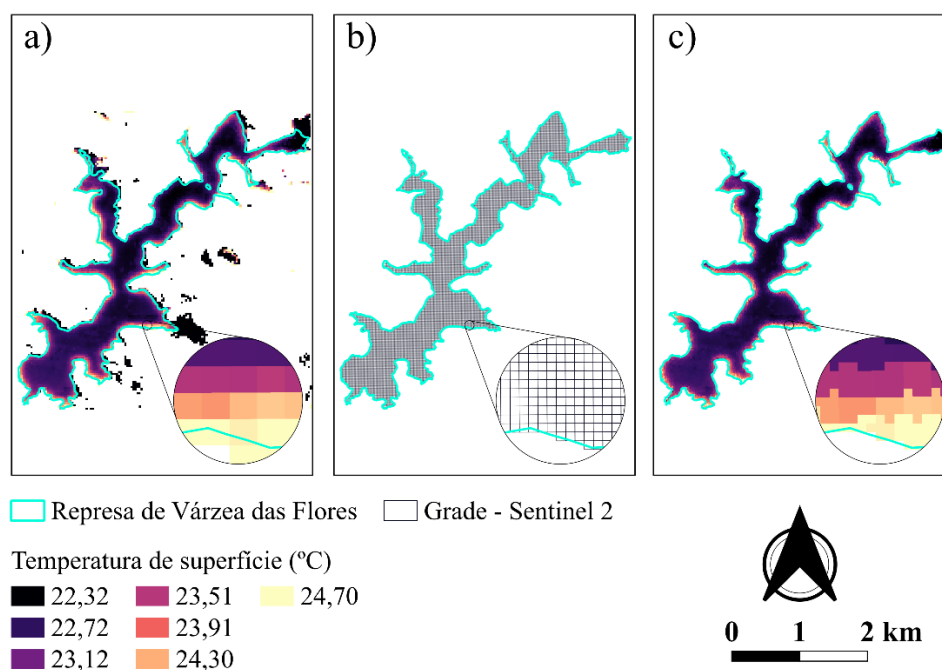
É necessário destacar também que foi utilizada uma abordagem semiempírica em ambos os modelos, que considera as características ópticas da água, mas são mais adequados à data, sensor e represa para qual foi desenvolvida

(DUTKIEWICZ et al., 2015; HICKMAN et al., 2020). Esforços adicionais devem ser desenvolvidos para que os modelos possam representar outros valores das variáveis e outras composições bio-ópticas do corpo d'água, diferentes das características na data de amostragem, melhorando a generalização e desempenho das estimativas.

3.3 Temperatura de superfície e batimetria da represa de Várzea das Flores

Foram encontradas 123 imagens de temperatura de superfície das bandas do infravermelho termal a bordo dos satélites da série Landsat. O processo de reamostragem e alinhamento espacial dos pixels destas tendo os pixels do Sentinel 2 enquanto referência é apresentado na Figura 7.

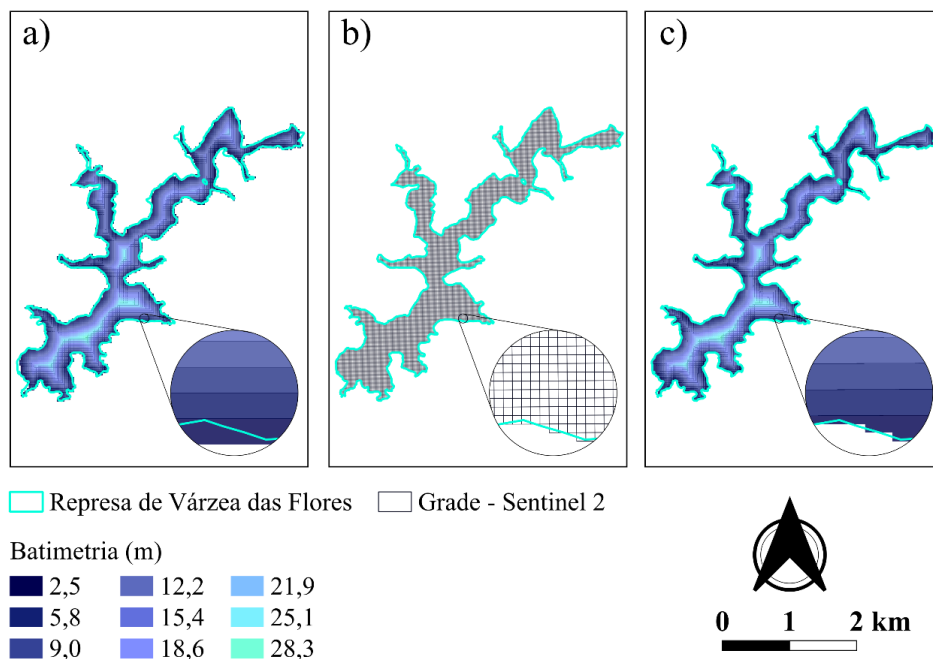
Figura 7 - Exemplo de reamostragem e alinhamento dos pixels de temperatura de superfície: a) Temperatura de superfície, antes do processo de reamostragem; b) Grade do Sentinel 2 utilizada como referência; c) Temperatura de superfície, após a reamostragem.



Fonte: autoria própria.

A represa apresentou uma profundidade entre 2,5 e 28,3 metros, de acordo com o GLOBathy. Estes valores diferem dos reportados por Santos (2009), em que foi feito um levantamento ecobatimétrico com 18330 sondagens na represa, em 2009. Nesse levantamento, a represa apresenta profundidades entre 0 e 22 metros, em relação a cota de altitude de 837,37 metros. Nesse sentido, a utilização da batimetria estimada pelo GLOBathy funciona apenas como uma aproximação da profundidade da represa, sendo necessário utilizar medidas de um novo levantamento batimétrico para uma melhor representação das condições da topografia de fundo do corpo d'água. O processo de reamostragem do produto tendo a grade do Sentinel 2 como referência é apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Exemplo de reamostragem e alinhamento dos pixels de temperatura de superfície: a) Batimetria, antes do processo de reamostragem; b) Grade do Sentinel 2 utilizada como referência; c) Batimetria, após a reamostragem.



Fonte: autoria própria.

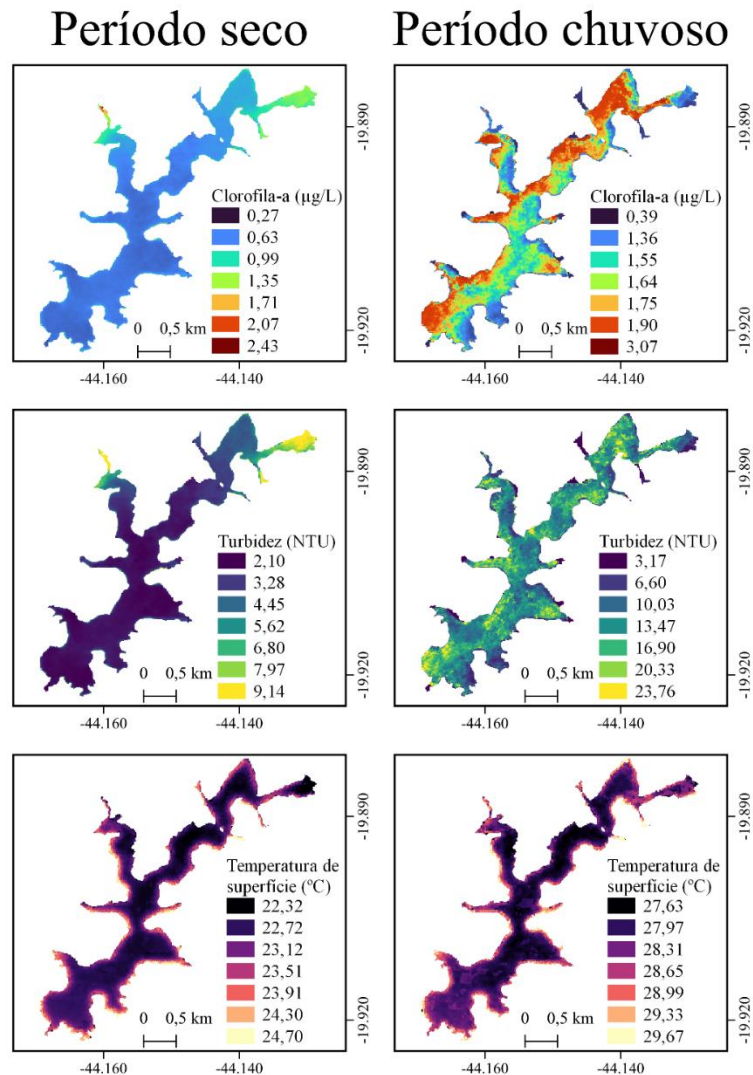
3.4 Média e normalização dos parâmetros

Excluiu-se da análise o período chuvoso intenso, considerando que o processo de cálculo de média, sem outliers e nuvens, fez com que fossem encontradas menos de 30% de informações válidas para os parâmetros de turbidez, clorofila-a e temperatura de superfície. Assim, foram calculadas as médias dos parâmetros somente para o período seco e chuvoso (Figura 9). Para cálculo das médias dos parâmetros de turbidez e clorofila-a, foram encontradas 486 imagens para o período seco e 178 no período chuvoso. Já para temperatura de superfície, foram encontradas 84 imagens válidas para o período seco e 22 para o período chuvoso.

A clorofila-a variou entre 0,27 e 2,43 $\mu\text{g/L}$ no período seco e 0,39 e 3,07 $\mu\text{g/L}$ no período chuvoso, enquanto a turbidez apresentou valores entre 2,1 e 9,14 NTU no período seco e 3,17 e 23,76 NTU no período chuvoso. A temperatura de superfície variou entre 22,32 e 24,70 $^{\circ}\text{C}$ no período seco e entre 27,63 e 29,67 $^{\circ}\text{C}$ no período chuvoso. O reservatório de Várzea das Flores é enquadrado pela política estadual de recursos hídricos, segundo seu uso preponderante, na Classe 1, sendo destinado ao abastecimento, à recreação de contato primário e à irrigação de hortaliças e frutas desenvolvidas rente ao solo (MINAS GERAIS, 1995). Águas de Classe 1 devem apresentar valores máximos de clorofila-a igual a 10 $\mu\text{g/L}$ e de turbidez até 40 NTU (MINAS GERAIS, 2022), o que indica adequação da represa a estes dois parâmetros de qualidade da água, em ambos os períodos. Os maiores valores de turbidez e clorofila-a, no período chuvoso, podem ser explicados pelas chuvas escoarem da bacia hidrográfica um maior volume de nutrientes, matéria orgânica, poluentes, efluentes e sedimentos ao reservatório [1–9]. Já o maior valor de temperatura no mesmo período pode ser

explicado pelas características do período chuvoso, predominantemente enquadrado (96,83% dos meses do período) na definição sazonal previamente estabelecida de verão úmido (SANTOS, 2012; MOREIRA JÚNIOR, 2018; PENA, 2018).

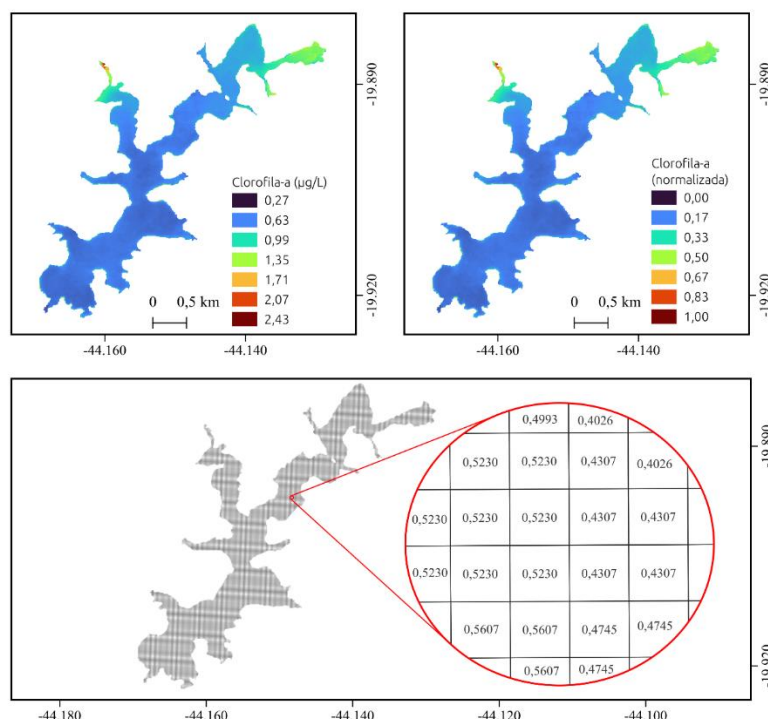
Figura 9 - Média dos parâmetros de clorofila-a, turbidez e temperatura de superfície para os períodos seco e chuvoso.



Fonte: autoria própria.

Outro aspecto a ser considerado é que, visualmente, a distribuição espacial dos valores de turbidez, clorofila-a e temperatura de superfície, no período chuvoso, é predominantemente aleatória, dada a menor estabilidade da coluna d'água com a movimentação ocasionada pela chuva. Essa instabilidade desfavorece a formação de padrões consistentes de distribuição desses parâmetros, resultando em uma maior variabilidade espacial. A Figura 10 apresenta um exemplo do processo de normalização das variáveis em escala de 0 a 1.

Figura 10 - Exemplo de normalização para a média de clorofila-a do período seco. Na esquerda superior, se apresenta a clorofila-a. Na direita superior, a clorofila-a normalizada. Na parte inferior, o vetor da grade de clorofila-a normalizada.

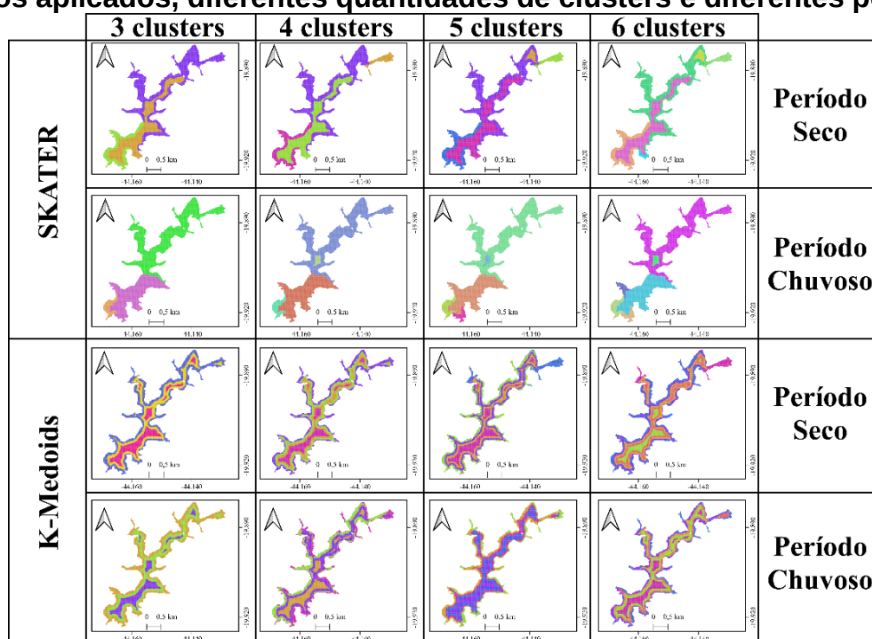


Fonte: autoria própria.

3.5 Regionalizações

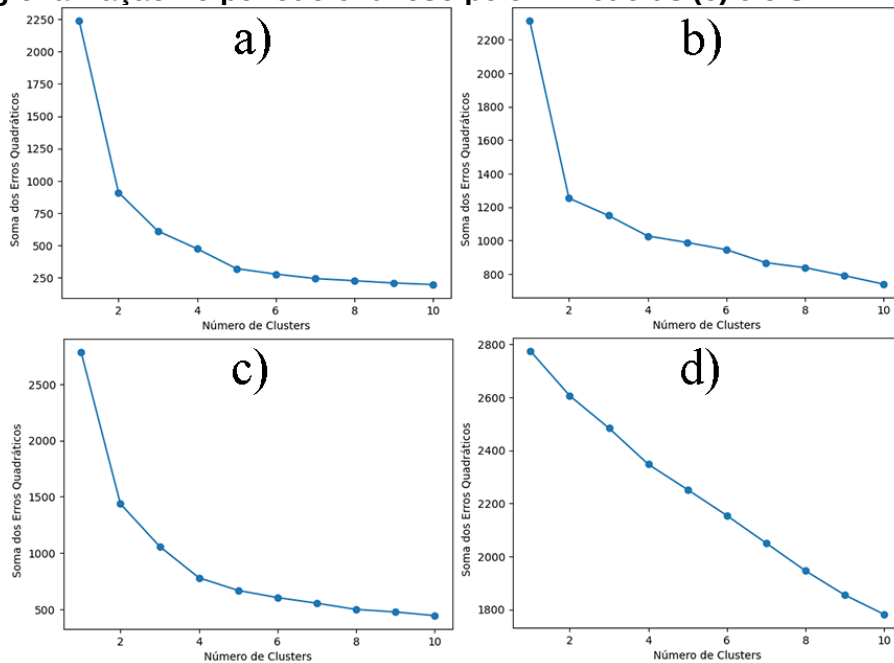
Com as variáveis normalizadas, o procedimento de regionalização nos períodos seco e chuvoso forneceu diversas possibilidades de configurações espaciais das regiões (Figura 11). Estas diferentes regionalizações, no entanto, são pouco informativas, sendo a análise gráfica da Soma dos Quadrados dos Erros (Figura 12) o que possibilitou definir qual método fornece regiões mais homogêneas e, pelo método Elbow, o número ótimo de regiões.

Figura 11 - Exemplos de diferentes regionalizações considerando os dois métodos aplicados, diferentes quantidades de clusters e diferentes períodos.



Fonte: autoria própria.

Figura 12 - Gráfico da Soma dos Erros Quadráticos por número de clusters. Regionalização no período seco pelo método K-medoids (a) e SKATER (b). Regionalização no período chuvoso pelo K-medoids (c) e o SKATER (d).

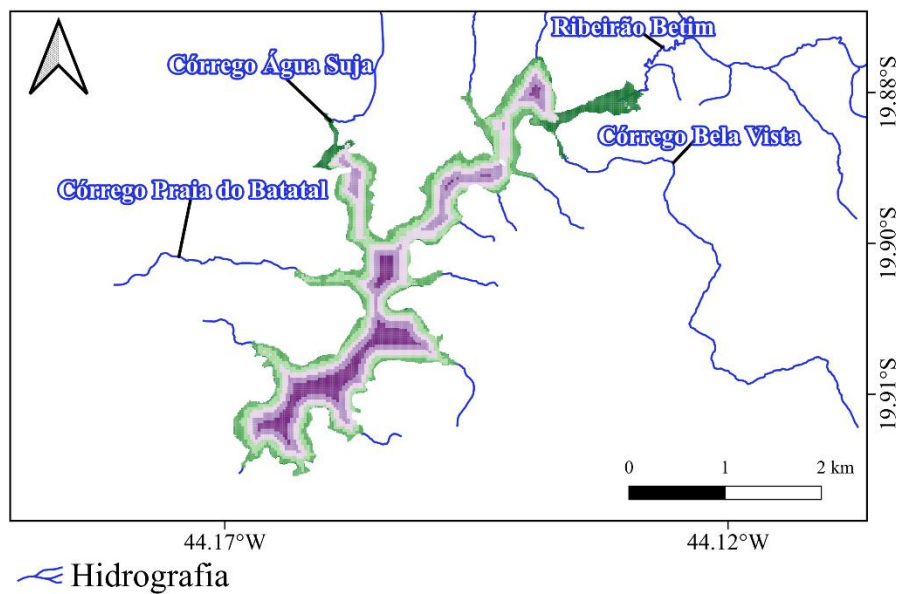


Fonte: autoria própria.

O primeiro aspecto a ser observado nos gráficos é que o SQE para os clusters formados pelo método K-medoids é sempre menor que aqueles formados pelo SKATER, independentemente do período ou da quantidade de clusters. Assim, é possível afirmar que o método K-medoids forma grupos com uma maior homogeneidade interna. Estes resultados apontam também que o mesmo grupo não necessariamente deve apresentar contiguidade espacial, o que torna o método SKATER menos aplicável ao contexto da represa de Várzea das Flores, se comparado ao K-medoids.

Tendo a concepção de que o método K-medoids é mais adequado para regionalização, é possível afirmar também que, pelo Método Elbow, os valores em que o incremento de clusters passa a ter contribuições ínfimas para diminuição do SQE varia entre 4 e 6, tanto no período seco quanto chuvoso. Considerando que este método parte também de uma análise subjetiva, optou-se por regionalizações com o maior número de clusters desse intervalo ($k = 6$), no sentido de garantir menores valores de SQE. Assim, foram geradas as regiões para o período seco (Figura 13), posteriormente nomeadas de acordo com a análise dos valores dos parâmetros utilizados na regionalização.

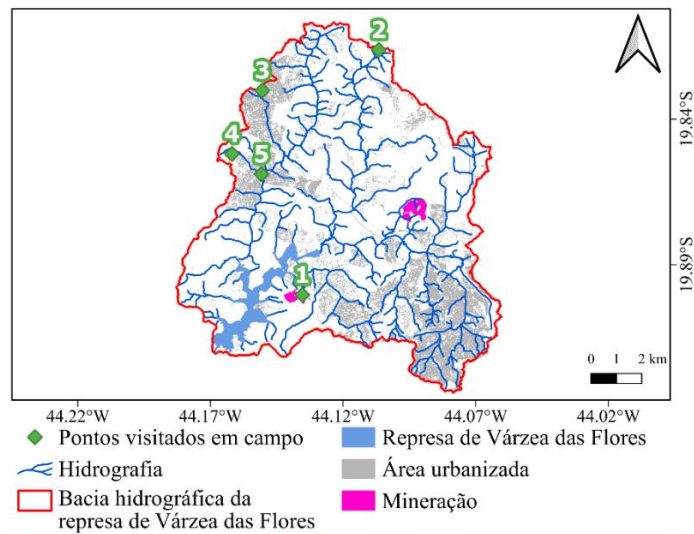
Figura 13 - Regionalização da represa de Várzea das Flores pelo K-medoids, no período seco.



Fonte: autoria própria.

A região “Margem de alta produtividade” é caracterizada por menores profundidades, entre 2,53 e 13,63 metros, bem como os maiores valores de clorofila-a (1,14 - 2,43 $\mu\text{g/L}$) e turbidez (7,75 - 42,09 NTU). Esta área também apresenta baixa estabilidade térmica, com temperaturas de superfície que variam entre 14,97 e 30,62 °C. O fato desta região concentrar os maiores valores para clorofila-a e turbidez é reflexo do que é escoado pelos principais afluentes da represa (Córrego Bela Vista, Ribeirão Betim e Córrego Água Suja). São os tributários destes corpos d’água que recebem a maior contribuição dos nutrientes, efluentes, matéria orgânica e partículas escoadas pelo esgotamento deficitário, urbanização, atividades de mineração e despejo de resíduos sólidos. Exemplos dessa dinâmica são apresentados na Figura 14.

Figura 14 - Pontos visitados em campo (26/03/2023 e 16/04/2023): Área de mineração de gnaiss (Ponto 1), na microbacia do Córrego Bela Vista. Despejo de resíduos sólidos em nascente do Ribeirão Betim (Ponto 2) e Córrego Água Suja (Ponto 3). Esgoto doméstico sendo lançado diretamente no solo da microbacia (Ponto 4) e em tributário (Ponto 5) do Córrego Água Suja.



Fonte: Adaptado de Guimarães (2023).

É nesta região que coletas de parâmetros de qualidade da água podem se concentrar, no sentido de compreender variações de turbidez e clorofila-a em resposta às ações antrópicas na bacia. Outra importante região, definida pelo K-medoids no período seco, é a Zona Profunda 3. Esta apresenta os maiores valores de profundidade, que variam entre 19,28 e 28,31 metros, bem como os menores valores de clorofila-a ($0,52 - 0,79 \mu\text{g/L}$) e turbidez média ($2,4 \text{ NTU}$). A Zona Profunda 3 também apresenta valores baixos de temperatura de superfície, entre $22,33$ e $22,87^\circ\text{C}$.

Em contrapartida à “Margem de alta produtividade”, esta é a região com menor influência do que é escoado pelos afluentes da represa, apresentando estabilidade térmica e os maiores valores de turbidez e clorofila-a. Coleta de dados limnológicos nesta região é de alta importância, considerando que aumentos elevados de temperatura, turbidez e clorofila-a nesta área potencialmente indicariam impactos mais severos de atividades antrópicas na bacia hidrográfica. As outras regiões (Tabela 2), por sua vez, funcionam como diferentes áreas de transição entre a “Margem de alta produtividade” e a “Zona Profunda”, de modo que, à medida em que se aumenta a profundidade e distância em relação aos exutórios dos diferentes afluentes, há a tendência de diminuir também a instabilidade térmica, enquanto os parâmetros de turbidez e clorofila-a apresentam valores menos variados.

Tabela 2 - Valores dos parâmetros de turbidez, clorofila-a e temperatura de superfície para as zonas intermediárias entre a margem de alta produtividade e a zona profunda 3, obtidas pela regionalização da represa de Várzea das Flores, MG, para o período seco, pelo K-medoids.

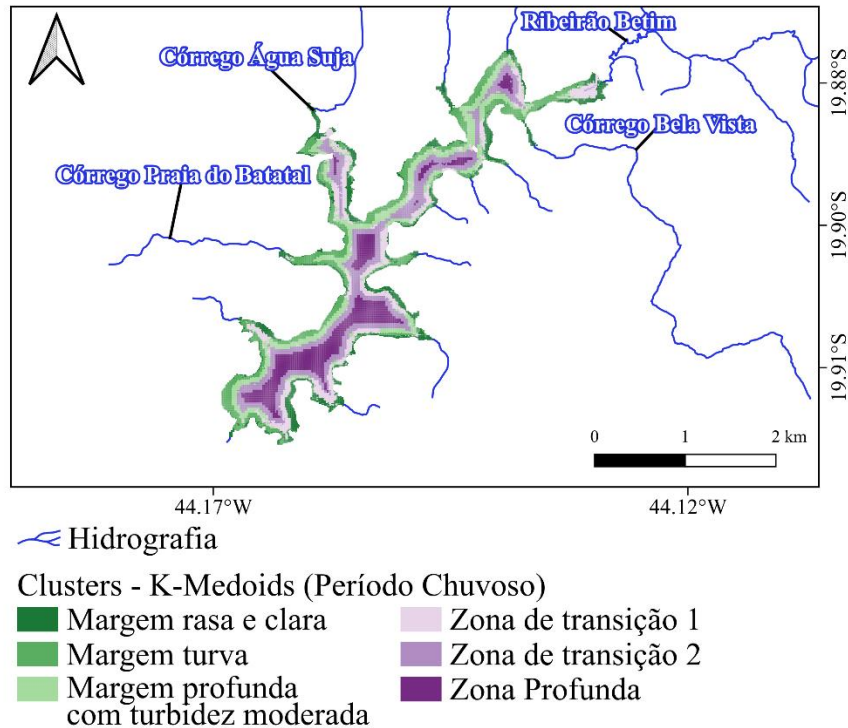
Região	Margem de produtividade moderada	Zona intermediária	Zona profunda 1	Zona profunda 2
Batimetria mínima (m)	2,53	5,06	9,13	14,32
Batimetria máxima (m)	5,66	9,13	13,64	18,43
Clorofila-a mínima (µg/L)	0,46	0,51	0,52	0,52
Clorofila-a máxima (µg/L)	0,96	0,96	1,25	1,17
Turbidez mínima (NTU)	1,50	1,82	1,93	1,98
Turbidez máxima (NTU)	6,08	5,89	8,99	7,20
Temperatura mínima (°C)	15,54	16,01	16,01	22,27
Temperatura máxima (°C)	30,16	26,93	27,65	24,41

Fonte: autoria própria.

A regionalização realizada pelo K-medoids, no período chuvoso (Figura 15), forneceu clusters com padrões diferentes. A região “Margem rasa e clara”, por sua vez, representa as áreas mais próximas aos exutórios de todos os afluentes da represa. Ao contrário da regionalização do período seco, estes agrupamentos de menor profundidade (2,53 – 10,44 metros) apresentam os menores valores de clorofila-a (0,38 – 1,6 µg/L) e turbidez (0,92 – 15,67 NTU). Apresentando a menor temperatura mínima (26,07 °C) e a maior temperatura máxima igual a 32,47°C, esta é também a região com maior instabilidade térmica. Possivelmente, o aumento do volume de água próximo aos exutórios dos afluentes dilui a concentração de clorofila-a e reduz a turbidez nas áreas menos profundas, considerando a renovação da água. A instabilidade térmica, por sua vez, pode ser potencialmente explicada pela mistura de águas de diferentes temperaturas, pelo afluxo originado de águas escoadas à montante da represa.

Investigações, no entanto, são necessárias, para confirmar se essa dinâmica está relacionada a tais fatores.

Figura 15 - Regionalização da represa de Várzea das Flores pelo K-medoids, no período chuvoso.



Fonte: autoria própria.

É na região “Margem turva”, no entanto, que se formam as condições necessárias para uma maior de concentração de turbidez e clorofila-a, vide as profundidades ainda menores (2,53 - 10,12 metros), o maior valor de turbidez média (15,65 NTU) e uma menor instabilidade térmica (26,55 – 30,99 °C). Entende-se que nessa região o maior aporte de nutrientes e sedimentos da bacia pela chuva é sinalizado, sem o processo de diluição da clorofila-a e turbidez, que ocorre na região de margem rasa e clara, mais próxima aos exultórios dos afluentes.

De maneira semelhante à regionalização do K-medoids no período seco, a “Zona profunda” do período chuvoso é aquela com as maiores profundidades (16,98 – 28,31 metros) e maior estabilidade térmica, com temperaturas de superfície que variam entre 27,56 e 28,46 °C. Com valores baixos de turbidez (5,18 – 26,4 NTU) e clorofila-a (0,95 – 2,12 µg/L), esta região continua sendo de importância para potencialmente compreender impactos mais intensos de atividades antrópicas, já que esta permanece estável tanto no período seco quanto chuvoso. Ainda de maneira similar à regionalização no período seco, as outras regiões (Tabela 3) servem como zonas intermediárias entre a margem e a zona profunda, com uma diferença que estas regiões recebem influência de duas zonas de margem, uma rasa e clara e outra turva.

Tabela 3 - Valores dos parâmetros de batimetria, turbidez, clorofila-a e temperatura de superfície para as zonas intermediárias entre as margens e a

zona profunda, obtidas pela regionalização da represa de Várzea das Flores, MG, para o período chuvoso.

Região	Margem profunda com turbidez moderada	Zona de transição 1	Zona de transição 2
Batimetria mínima (m)	5,66	5,06	11,32
Batimetria máxima (m)	13,64	15,19	17,91
Clorofila-a mínima (µg/L)	1,52	0,79	0,94
Clorofila-a máxima (µg/L)	2,41	1,78	2,32
Turbidez mínima (NTU)	7,40	4,27	5,19
Turbidez máxima (NTU)	33,80	19,34	31,13
Temperatura mínima (°C)	27,16	26,55	27,50
Temperatura máxima (°C)	29,41	29,73	29,24

Fonte: autoria própria.

3.6 Resultados da MANOVA

Os resultados da análise de variância multivariada entre a regionalização com 6 clusters no período seco e chuvoso (Tabela 4), realizada pelo K-medoids, apontou por todos os testes que há uma diferença estatisticamente significativa entre as regionalizações nos períodos seco e chuvoso, dado o valor $Pr > F$ muito baixo (0,0001). O valor baixo de Wilks' lambda (0,0528) aponta que o K-medoids é capaz de capturar com eficiência variações entre os períodos, enquanto o Pillai's Trace alto (0,9470) indica que há uma forte relação entre os parâmetros de turbidez, clorofila-a e temperatura de superfície e as condições sazonais. Por fim o Hotelling-Lawley Trace e Roy's Greatest Root apontam que algum dos parâmetros utilizados na regionalização exerce forte influência na diferenciação entre a regionalização do período seco e o período chuvoso.

Tabela 4 - MANOVA - Comparação entre a regionalização pelo método K-medoids ($k = 6$) no período seco e no período chuvoso

Efeito	Medida	Valor	GL Num.	GL Denominador	F-valor	Pr > F-valor
Intercepto	Wilks' lambda	0,0446	40,000	70,000	374,964	0,0001
	Pillai's trace	0,9554	40,000	70,000	374,964	0,0001
	Hotelling-Lawley trace	214,265	40,000	70,000	374,964	0,0001
	Roy's greatest root	214,265	40,000	70,000	374,964	0,0001
Regionalização	Wilks' lambda	0,0528	40,000	70,000	313,822	0,0001
	Pillai's trace	0,9472	40,000	70,000	313,822	0,0001

Hotelling-Lawley trace	179,327	40,000	70,000	313,822	0,0001
Roy's greatest root	179,327	40,000	70,000	313,822	0,0001

Fonte: autoria própria.

Ao realizar a MANOVA entre a regionalização obtida com o conjunto completo de variáveis e aquelas em que uma variável foi removida por vez foi possível observar, para o período seco (Tabela 5), que a variável mais influente no processo de regionalização foi a clorofila-a, dado o Wilks' Lambda de 0,0111 e um F Value de 155,47, ambos altamente significativos ($p < 0,001$). No período chuvoso (Fonte: autoria própria.

Tabela 6), a variável de maior influência no processo de regionalização foi a temperatura, com valor de Wilks' Lambda de 0,0142 e o F Value de 121,80, também com significância estatística ($p < 0,001$).

Tabela 5 – MANOVA - Comparação entre a regionalização do K-medoids ($k = 6$) com todas as variáveis e sem uma das variáveis, no período seco.

Comparação	Wilks' Lambda	F Value	Pr > F
Completa vs Sem batimetria	0,9017	0,19	0,9356
Completa vs Sem clorofila-a	0,0085	203,96	0
Completa vs Sem temperatura	0,0111	155,47	0
Completa vs Sem turbidez	0,014	123,39	0

Fonte: autoria própria.

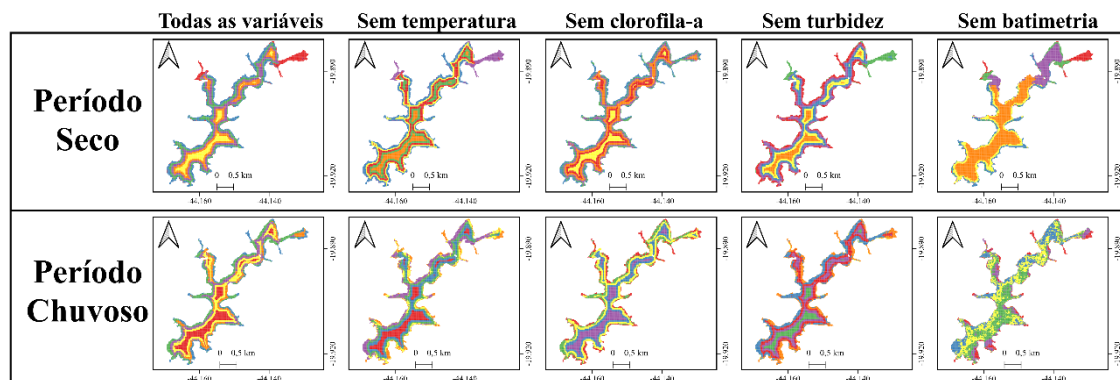
Tabela 6 – MANOVA - Comparação entre a regionalização do K-medoids ($k = 6$) com todas as variáveis e sem uma das variáveis, no período chuvoso.

Comparação	Wilks' Lambda	F Value	Pr > F
Completa vs Sem batimetria	0,334	3,49	0,0717
Completa vs Sem clorofila-a	0,4442	2,19	0,1721
Completa vs Sem temperatura	0,0142	121,80	0
Completa vs Sem turbidez	0,1288	11,83	0,0031

Fonte: autoria própria.

No entanto, ao analisar visualmente a regionalização com todas as variáveis, comparando com as regionalizações em que uma das variáveis foi retirada (Figura 16), foi possível observar que a variável de batimetria tem forte influência sobre a configuração espacial dos clusters, vide a semelhança entre as regionalizações em que a variável foi utilizada. Isto indica que, embora a batimetria tenha uma menor contribuição na explicação da variabilidade total, ela influencia a forma como os dados se agrupam espacialmente.

Figura 16 - Comparação entre a regionalização do K-medoids ($k = 6$) com todas as variáveis e sem uma das variáveis, no período seco e chuvoso.



Fonte: autoria própria.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A represa de Várzea das Flores apresenta vital importância para o abastecimento hídrico da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Compreender a dinâmica espacial da distribuição de parâmetros importantes para sua caracterização fornece informações importantes para aqueles interessados em sua preservação, em especial os agentes envolvidos no seu processo de gestão ambiental.

Métodos apropriados para realização de tal tarefa usam de modelagem estatística espacial e dados geoespaciais, dando-se destaque para os dados provenientes de sensoriamento remoto. A metodologia aqui empregada apontou que o método K-medoids, com 4 a 6 clusters é mais indicado para regionalização do espelho d'água do reservatório, se comparado ao SKATER.

Para tal, foram necessários estimar parâmetros de turbidez e clorofila-a a partir de imagens ópticas e coletar dados de temperatura de superfície e batimetria. Foi necessário também definir com clareza períodos secos e chuvosos, a partir de dados do CHIRPS. Entende-se que a metodologia empregada forneceu uma série de entendimentos importantes sobre a dinâmica da represa. O primeiro deles foi o de que a definição previamente estabelecida de inverno seco e verão úmido, embora valiosa, não deve ser considerada à risca, caso queira se compreender a dinâmica da pluviometria e, conseqüentemente, a variação dos parâmetros de turbidez, clorofila-a e temperatura de superfície, sendo prudente analisar a série histórica de precipitação e enquadrar os meses em períodos adaptados ao intervalo de tempo que está sendo analisado, conforme realizado aqui. É necessário considerar também a possibilidade de validação do dado CHIRPS, a partir de dados de estações meteorológicas, na área próxima à represa de Várzea das Flores, em futuros trabalhos.

O trabalho também contribui com a geração de modelos para estimativa de turbidez e clorofila-a a partir de imagens Sentinel 2, sendo o primeiro passível de replicação pelos agentes gestores da área de estudo. Esforços adicionais para criar um melhor modelo para estimativa de clorofila-a, no entanto, são necessários. Deve-se considerar também as limitações inerentes à abordagem semiempírica, cabendo incrementar o esforço amostral em outros pontos da represa e em outras estações do ano. Futuros trabalhos podem utilizar abordagens analíticas e semianalíticas para superar tais limitações, em havendo dados bio-ópticos disponíveis.

Dados de batimetria da área de estudo, levantados por ecobatímetros ou LiDAR, também podem ser utilizados em futuros trabalhos. Assim, informações atualizadas e acuradas podem ser úteis para aprimorar a regionalização da represa, considerando sua topografia de fundo mais atual.

As regiões fornecidas pelo K-medoids apontam também para diferentes dinâmicas da represa. Enquanto no período seco as margens próximas aos exutórios dos seus principais afluentes respondem mais acentuadamente a atividades que degradam os recursos hídricos, no período chuvoso as margens imediatamente próximas a todos os afluentes da represa apresentam os melhores valores de qualidade da água. Uma zona de alta profundidade, estável termicamente e com menores valores de clorofila-a e turbidez, também foi identificada, podendo ser utilizada como indicativo de impactos intensos causados por atividades antrópicas, na bacia hidrográfica.

Por fim, as análises MANOVA apontaram para diferenças estatisticamente significativas entre as regionalizações feitas no período seco e chuvoso, com a temperatura sendo a variável com maior influência, no processo de regionalização no período chuvoso, e a clorofila-a, no período seco. A importância da batimetria na configuração espacial das regiões, no entanto, não pode ser negligenciada. Utilizar as regionalizações aqui criadas para monitoramento ambiental e compreensão das interações dos parâmetros com outras características da bacia hidrográfica da represa, como uso e ocupação do solo, precipitação e vazão, são abordagens promissoras.

5 REFERÊNCIAS

ADJOVU, G. E.; STEPHEN, H.; JAMES, D.; AHMAD, S. Measurement of total dissolved solids and total suspended solids in water systems: A review of the issues, conventional, and remote sensing techniques. **Remote Sensing**, v. 15, n. 14, p. 1–30, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15143534>. Acesso em: 04 nov. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Massas d'Água**. 2021. Disponível em: <https://redezee.datageo.ambiente.sp.gov.br/geonetworkcrit/srv/api/records/537a07b7-4a29-422d-bdde-43ae8af87b61>. Acesso em: 04 nov. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Processos minerários ativos**. 2022. Disponível em: <https://geo.anm.gov.br/portal/home/item.html?id=90ecbc1f0e374d459c0afe7e3ae466c1>. Acesso em: 04 nov. 2024.

AHN, M; LYU, S. Selection of Priority Tributaries for Point and Non-Point Source Pollution Management. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 24 n. 4, p. 1060–1069, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12205-020-2059-x>. Acesso em: 04 nov. 2024.

ATTIAH, G.; KHEYROLLAH POUR, H.; SCOTT, K. A. Lake surface temperature retrieved from Landsat satellite series (1984 to 2021) for the North Slave Region. **Earth System Science Data**, v. 15, n. 3, p. 1329–135, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-15-1329-2023>. Acesso em: 04 nov. 2024.

ASSUNÇÃO, R. M.; NEVES, M. C.; CÂMARA, G.; DA COSTA FREITAS, C. Efficient regionalization techniques for socio-economic geographical units using minimum spanning trees. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 7, p. 797–811, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13658810600665111>. Acesso em: 04 nov. 2024.

BUGNOT, A. B.; LYONS, M. B.; SCANES, P.; CLARK, G. F.; FYFE, S. K.; LEWIS, A.; JOHNSTON, E. L. A novel framework for the use of remote sensing for monitoring catchments at continental scales. *Journal of Environmental Management*, v. 217, p. 939–

950. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.058>. Acesso em: 04 nov. 2024.

CARVALHO, L. M.; ARAÚJO, R. P. Z. Urbanização extensiva e inflexão neoliberal na metrópole: Disputas entre interesses locais e metropolitanos na bacia de Vargem das Flores. In: Anais do XIX Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional (ENANPUR), 2022, Blumenau. **Anais...** 2022. Disponível em: https://www.sisgeenco.com.br/anais/enanpur/2022/arquivos/GT3_SEM_514_706_2021_1215104949.pdf. Acesso em: 04 nov. 2024.

DOGLIOTTI, A. I.; RUDDICK, K. G.; NECHAD, B.; DOXARAN, D.; KNAEPS, E. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 156, p. 157–168, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>. Acesso em: 24 nov. 2024.

DOKULIL, M. T.; DE EYTO, E.; MABERLY, S. C.; MAY, L.; WEYHENMEYER, G. A.; WOOLWAY, R. I. Increasing maximum lake surface temperature under climate change. **Climatic Change**, v. 165, n. 56, p. 3–4, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03085-1>. Acesso em: 04 nov. 2024.

DUTKIEWICZ, S.; HICKMAN, A. E.; JAHN, O.; GREGG, W. W.; MOUW, C. B.; FOLLOWS, M. J. Capturing optically important constituents and properties in a marine biogeochemical and ecosystem model. **Biogeosciences**, v. 12, n. 14, p. 4447–4481, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-12-4447-2015>. Acesso em: 04 nov. 2024

ENTEZAMI, A.; SARMADI, H.; SAEEDI RAZAVI, B. An innovative hybrid strategy for structural health monitoring by modal flexibility and clustering methods. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 10, n. 5, p. 845–859, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00421-4>. Acesso em: 04 nov. 2024.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Level-2A**. 2022. Disponível em: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types/level-2a>. Acesso em: 04 nov. 2024.

FOGA, S.; SCARAMUZZA, P. L.; GUO, S.; ZHU, Z.; DILLEY, R. D.; BECKMANN, T.; SCHMIDT, G. L.; DWYER, J. L.; JOSEPH HUGHES, M.; LAUE, B. Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products. **Remote Sensing of Environment**, v. 194, p. 379–390, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.026>. Acesso em: 04 nov. 2024.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 150066, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>. Acesso em: 04 nov. 2024.

GAO, J. Bathymetric mapping by means of remote sensing: Methods, accuracy and limitations. **Progress in Physical Geography**, v. 33, p. 103-116, 2009. <https://doi.org/10.1177/0309133309105657>. Acesso em: 04 nov. 2024.

GASCON, F.; THEPAUT, O.; JUNG, M.; FRANCESCONI, B.; LOUIS, J.; LONJOU, V.; LAFRANCE, B.; MASSERA, S.; GAUDEL-VACARESSE, A.; LANGUILLE, F.; ALHAMMOUD, B.; VIALLEFONT, F.; BINEIARZ, J.; PFLUG, B.; CLERC, S.; PESSIOT, L.; TRÉMAS, T.; CADAU, E.; BONIS, R.; FERNANDEZ, V. Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation status. *Remote Sensing*, n. 9, v. 6, p. 1–23, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs9060584>. Acesso em: 04 nov. 2024.

GUIMARÃES, V. L. **Análise da dinâmica de poluição na área de proteção ambiental Vargem das Flores**: aplicabilidade do monitoramento de qualidade da água por sensoriamento remoto e do modelo SWAT. 2023. 149 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

GUIMARÃES, V. L.; GIANASI, L. M.; JARDIM, H. L.; ALVES, R. C.; SANTOS, P. J. A.; KAMPEL, M. **UM MODELO SEMIEMPÍRICO PARA ESTIMATIVA DE TURBIDEZ NA REPRESA DE VÁRZEA DAS FLORES, MINAS GERAIS.** (submetido à publicação), 2024.

HICKMAN, A.; MOUW, C. B.; ROUSSEAU, C. S.; STOCK, C.; CIAVATTA, S. **Synergy between ocean colour and biogeochemical/ecosystem models.** 2020. Disponível em: https://eprints.soton.ac.uk/442288/1/ioccg_report_modelling_vol_19_rr.pdf. Acesso em: 04 nov. 2024.

KAUFMAN, L.; ROUSSEUW, P. J. Partitioning Around Medoids (Program PAM). In: KAUFMAN, L.; ROUSSEUW, P. J. (Ed.). **Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis.** New Jersey: John Wiley & Sons, 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9780470316801.ch2>. Acesso em: 04 nov. 2024.

KAVANAUGH, M.; OLIVER, M.; CHAVEZ, F.; LETLIER, R.; MULLER-KARGER, F.; DONEY, S. Seascapes as a new vernacular for pelagic ocean monitoring, management and conservation. **ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil.** v. 73, n. 7, p. 1839-1850, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw086>. Acesso em: 04 nov. 2024.

KHAZAEI, B.; READ, L.; CASALI, M.; SAMPSON, K.; YATES, D. GLOBathy, the global lakes bathymetry dataset. **Scientific Data.** v. 9, n. 1, p. 36, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41597-021-01110-2>. Acesso em: 04 nov. 2024.

KRUG, L. A.; PLATT, T.; SATHYENDRANATH, S.; BARBOSA, A. B. Ocean surface partitioning strategies using ocean colour remote Sensing: A review. **Progress in Oceanography,** v. 155, p. 41-53, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.05.013>. Acesso em: 04 nov. 2024.

LIU, K.; SONG, C. Modeling lake bathymetry and water storage from DEM data constrained by limited underwater surveys. **Journal of Hydrology,** v. 604, p. 127260, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127260>. Acesso em: 04 nov. 2024.

LONGHURST, A. R. **Ecological Geography of the Sea.** 2.ed. San Diego: Academic Press, 2007. 560 p. ISBN 0080465579.

MACQUEEN, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 5., 1967, Berkley, USA. **Proceedings...** 1967, p. 281-297. Disponível em: <https://projecteuclid.org/ebooks/berkeley-symposium-on-mathematical-statistics-and-probability/Proceedings-of-the-Fifth-Berkeley-Symposium-on-Mathematical-Statistics-and/chapter/Some-methods-for-classification-and-analysis-of-multivariate-observations/bsmsp/1200512992?tab=ArticleFirstPage>. Acesso em: 04 nov. 2024.

MAGALHÃES JUNIOR, A. P.; COTA, G. E. M.; LEMOS, R. S. CONTRADIÇÕES E DESAFIOS PARA A PROTEÇÃO DE MANANCIAIS HÍDRICOS EM MINAS GERAIS - OS CASOS DAS ÁREAS DE PROTEÇÃO ESPECIAL DE VARGEM DAS FLORES E SERRA AZUL - REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE. **Caminhos de Geografia,** v. 17, n. 60, p. 89–104, 2016. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/33960>. Acesso em: 04 nov. 2024.

MARTINS, V. S.; BARBOSA, C. C. F.; CARVALHO, L. A. S.; JORGE, D. S. F.; LOBO, F. de L.; NOVO, E. M. L. M. Assessment of atmospheric correction methods for Sentinel-2 MSI images applied to Amazon floodplain lakes. **Remote Sensing,** v. 9, n. 4, p. 322, 2017. Acesso em: <https://doi.org/10.3390/rs9040322>. Acesso em: 04 nov. 2024.

MARTINSEN, K. T.; SAND-JENSEN, K.; SELVAN, R. Predicting lake bathymetry from the topography of the surrounding terrain using deep learning. **Limnology and Oceanography: Methods,** v. 21, n. 10, p. 625–636, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/lom3.10573>. Acesso em: 04 nov. 2024.

MASHALA, M. J.; DUBE, T.; MUDERERI, B. T.; AYISI, K. K.; RAMUDZULI, M. R. A Systematic Review on Advancements in Remote Sensing for Assessing and Monitoring Land Use and Land Cover Changes Impacts on Surface Water Resources in Semi-Arid Tropical Environments. **Remote Sensing**, v. 15, n. 16, p. 3926, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15163926>. Acesso em: 04 nov. 2024.

MCCARTHY, M. J. et al. Impacts of 40 years of land cover change on water quality in Tampa Bay, Florida. **Cogent Geoscience**, v. 4, n. 1, p. 1422956, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23312041.2017.1422956>. Acesso em: 20 mar. 2024.

MCCARTHY, M. J.; OTIS, D. B.; MÉNDEZ-LÁZARO, P.; MULLER-KARGER, F. E. Water quality drivers in 11 Gulf of Mexico Estuaries. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 1–30, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs10020255>. Acesso em: 18 mai 2024.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH/MG nº 8, de 21 de novembro de 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=56521>. Acesso em: 04 nov. 2024.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 14, de 28 de dezembro de 1995**. 1995. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=112>. Acesso em: 03 nov. 2024.

NIE, J.; FENG, H.; WITHERELL, B. B.; ALEBUS, M.; MAHAJAN, M. D.; ZHANG, W.; YU, L. Causes, assessment, and treatment of nutrient (N and P) pollution in rivers, estuaries, and coastal waters. *Current Pollution Reports*, v. 4, n. 2, p. 154–161, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40726-018-0083-y>. Acesso em: 04 nov. 2024.

O'BRIEN, R. G.; KAISER, M. K. MANOVA Method for Analyzing Repeated Measures Designs: An Extensive Primer. **Psychological Bulletin**, v. 97, n. 2, p. 316–333, 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.1037/0033-2909.97.2.316>. Acesso em: 04 nov. 2024.

PENA, N. M. **Gestão compartilhada de recursos hídricos na Bacia Hidrográfica de Vargem das Flores**. 2018. 72 p. Monografia (Especialização em Gerenciamento de Recursos Hídricos) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-BCEHJ5/1/monografia_p_s_recursos_h_dricos_nilma_2018.pdf. Acesso em: 04 nov. 2024.

SANTOS, A. L. V.; CALDEIRA, A. B.; JUNIOR, I. S. Recolhimento de Esgoto na Área de Proteção Ambiental Vargem das Flores/MG. **Revista Do Departamento De Geografia**, v. 35, p. 83-90, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/rdg.v35i0.140604>. Acesso em 04 nov. 2024.

SANTOS, S. P. **Morfometria, compartimentação e hidrodinâmica de um reservatório periurbano tropical: Prognósticos sobre o tempo de vida útil do Reservatório de Vargem das Flores, Minas Gerais – Brasil**. 2012. 136 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia, Conservação e Manejo de Vida Silvestre). Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-92YPGV/1/disserta_o_final_simone_santos.pdf. Acesso em: 04 nov. 2024.

TAYLOR, C. A.; RISING, J. Tipping point dynamics in global land use. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 12, p. 125012, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac3c6d>. Acesso em: 04 nov. 2024.

THORNDIKE, R. L. Who belongs in the family? **Psychometrika**, v. 18, p. 267–276, 1953. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02289263>. Acesso em: 04 nov. 2024.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Landsat Collection 2 Level-2 Science Products**. 2024. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>. Acesso em: 04 nov. 2024.

TUKEY, J. W. **Exploratory Data Analysis**. 1. ed. Massachusetts, USA: Pearson, 1977. 688 p. ISBN 978-0201076165.

UNIVERSITY OF CALIFORNIA SANTA BARBARA (UCSB). **CHIRPS**: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations. 2024. Disponível em: <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>. Acesso em: 04 nov. 2024.

VERDONSCHOT, P. F. M.; SPEARS, B. M.; FELD, C. K.; BRUCET, S.; KEIZER-VLEK, H.; BORJA, A.; ELIOTT, M.; KERNAN, M.; JOHNSON, R. K. A comparative review of recovery processes in rivers, lakes, estuarine and coastal waters. **Hydrobiologia**, v. 704, n. 1, p. 453–474, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1294-7>. Acesso em: 04 nov. 2024.

WIERING, M.; BOEZEMAN, D.; CRABBÉ, A. The Water Framework Directive and agricultural diffuse pollution: Fighting a running battle? **Water**, v. 12, n. 5, p. 1447, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12051447>. Acesso em: 04 nov. 2024.

XING, X.-G.; DONG-ZHI, Z.; YU-GUANG, L.; JIANG-HONG, Y.; PENG, X.; LIN, W. An overview of remote sensing of chlorophyll fluorescence. **Ocean Science Journal**, v. 42, n. 1, p. 49– 59, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF03020910>. Acesso em: 04 nov. 2024.

XIONG, J.; ZHENG, Y.; ZHANG, J.; QUAN, F.; LU, H.; ZENG, H. Impact of climate change on coastal water quality and its interaction with pollution prevention efforts. **Journal of Environmental Management**, v. 325, p. 116557, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116557>. Acesso em: 04 nov. 2024.

YAO, J.; ZHANG, Q.; YE, X.; ZHANG, D.; BAI, P. Quantifying the impact of bathymetric changes on the hydrological regimes in a large floodplain lake: Poyang Lake. **Journal of Hydrology**, v. 561, p. 711–723, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.035>. Acesso em: 04 nov. 2024.