

Imageamento orbital do reservatório de Furnas: variação espaço-temporal do nível da água e inferências hidrométricas

Orbital imaging of the Furnas reservoir: spatial-temporal variability of the water level and hydrometrics inferences

Imágenes orbitales del reservorio de Furnas: variación espacio-temporal de la lámina de agua y inferencias hidrométricas



Marcelo de Oliveira Latuf

Universidade Federal de Alfenas - Minas Gerais - Brasil
marcelo.latuf@unifal-mg.edu.br



Kelvin Silva Caovila Santos

Universidade Federal de Alfenas - Minas Gerais - Brasil
kelvin.caovila@gmail.com

Resumo Diversas variáveis norteiam a geração de energia em usinas hidrelétricas, sendo duas delas o volume útil e a cota altimétrica, sendo seu monitoramento realizado, majoritariamente, por régua linimétrica. Objetiva-se com este estudo obter a frequência espaço-temporal da lâmina d'água do reservatório de Furnas, no período entre 1995 e 2019, bem como ajustar equações de regressão entre os parâmetros área do espelho d'água, cota altimétrica e volume útil. Para tal, utilizaram-se imagens dos satélites Landsat 5 e 8 no mapeamento do espelho d'água e dados diários de cota altimétrica e volume útil. As equações entre os parâmetros foram ajustadas adotando o coeficiente de determinação maior ou igual a 0,70 e intervalo de confiança de 95%. O mapeamento da frequência espaço-temporal da lâmina d'água apontou regiões de expressiva oscilação do nível da água, próximo às desembocaduras dos rios Grande, Verde e Sapucaí, além das proximidades de Campo do Meio e Alfenas. Resultados demonstram que o ajuste estatístico foi satisfatório na estimativa dos parâmetros com R^2 de 0,9805 e 0,9913,

para as relações entre área versus volume útil e área versus cota altimétrica, respectivamente. Almeja-se com os resultados fornecer subsídios às ações que garantam o múltiplo uso dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Hidrologia. Sensoriamento remoto. Recursos hídricos. Usos múltiplos.

Abstract Several variables guide the generation of energy in hydroelectric power plants, two of which are the useful volume and the altimetric quota, and its monitoring is performed mostly by limimetric rulers. The objective of this study is to obtain the spatial-temporal frequency of the water level of the Furnas reservoir, in the period between 1995 and 2019, as well as to adjust regression equations between the parameters water surface area, altimetric height, and useful volume. Thus, images from Landsat 5 and 8 satellites were used to map the water surface and daily data about the altimetric height and the useful volume. The equations between the parameters were adjusted adopting a coefficient of determination bigger than or equal to 0.70 and a 95% confidence interval. The mapping of the spatial-temporal frequency of the water level showed regions of significant oscillation of the water level, near the mouths of the rivers Grande, Verde and Sapucaí, besides the proximities of Campo do Meio and Alfenas. Results show that the statistical adjustment was satisfactory in the estimation of the parameters with R^2 of 0.9805 and 0.9913, for the relations between area versus useful volume and area versus altitude, respectively. The aim of the results is to provide subsidies for actions that guarantee the multiple use of water resources.

Keywords: Hydrology. Remote sensing. Water resources. Multiple uses.

Resumen: Diversas variables orientan la generación de energía en las centrales hidroeléctricas, siendo dos de ellas, el volumen útil y la cuota altimétrica, y su seguimiento se realiza mayoritariamente mediante reglas linimétricas. El objetivo de este estudio es obtener la frecuencia espacio-temporal de la lámina de agua del embalse de Furnas en el periodo comprendido entre 1995 y 2019, así como ajustar las ecuaciones de regresión entre los parámetros área de espejo de agua, altura altimétrica y volumen útil. Para conseguir esto, se utilizaron imágenes de los satélites Landsat 5 y 8 para cartografiar la superficie del agua y datos diarios sobre la cuota altimétrica y el volumen útil. Las ecuaciones entre los parámetros se ajustaron adoptando un coeficiente de determinación mayor o igual a 0,70 y un intervalo de confianza del 95%. El mapeo de la frecuencia espacio-temporal de la lámina de agua señaló regiones de oscilación expresiva del nivel del agua, cerca de las desembocaduras de los ríos Grande, Verde y Sapucaí, además de las proximidades de Campo do

Meio y Alfenas. Los resultados demuestran que el ajuste estadístico fue satisfactorio en la estimación de los parámetros con R^2 de 0,9805 y 0,9913, para las relaciones entre área-volumen útil y área-altitud, respectivamente. El objetivo de los resultados es subvencionar acciones que garanticen el uso múltiple de los recursos hídricos.

Palabras clave: Hidrología. Teledetección. Recursos hídricos. Usos múltiples.

Introdução

O conhecimento acerca das dinâmicas terrestres ainda é um desafio para a comunidade científica, em função das características dos fenômenos a serem monitorados, bem como pelos métodos empregados. Neste sentido, a observação terrestre teve expressivo impulso por meio do desenvolvimento de programas espaciais, com o lançamento de satélites orbitais para fins não-militares, sobretudo, a partir da década de 1970.

Dentre os variados alvos de detecção orbital, destacam-se os corpos hídricos naturais e/ou antrópicos, e seu monitoramento auxilia no diagnóstico e prognóstico de sistemas fluviais, incluindo a observação de inundações e secas, em virtude do avanço, recuo ou recorrência da lâmina d'água, bem como em associações a variáveis hidrométricas, com o intuito de subsidiar a elaboração de estudos científicos nas mais diversas áreas da ciência.

Desta forma, o sensoriamento remoto posiciona-se como uma ferramenta no auxílio ao monitoramento de superfícies aquáticas (BARBOSA et al., 2019), por meio de características espectrais, radiométricas, espaciais e temporais, potencializando o mapeamento de extensas porções territoriais (CRÓSTA, 2002).

Com relação às características espectrais dos sensores imageadores, a região do infravermelho é largamente utilizada com objetivos de mapeamento de superfícies aquáticas, devido ocorrer nesta faixa do espectro-eletromagnético a maior absorção da radiação (JENSEN, 2009), ocasionando expressiva diferenciação espectral entre alvos aquáticos e não-aquáticos.

Contudo, há também a utilização de índices espectrais específicos para o realce de superfícies aquáticas, tais como o Normalized Difference Water Index (NDWI), elaborado por McFeeters (1996), apoiando-se nas bandas do verde e infravermelho próximo, bem como o Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), elaborado por Xu (2006), utilizando-se as bandas do verde e infravermelho médio.

Desta forma, diversos autores utilizam de limiares para a classificação dos corpos hídricos a partir da análise de imagens na banda do infravermelho próximo e médio, além dos índices supramencionados (CAMPOS et al., 2012; ZHOU et al., 2017; LEONARDO et al., 2021). Estas classificações podem ser realizadas, nos já consolidados ambientes desktops, via Sistema de Informação Geográfica (SIG), como também mais recentemente por meio de ambiente de computação em nuvem (SOUZA JÚNIOR et al., 2019; PEKEL et al., 2016).

Neste último caso, destaca-se a utilização do Google Earth Engine (GORELICK et al., 2017), com os trabalhos desenvolvidos pela Cooperação MapBiomias Água (<https://mapbiomas.org/>) e pela Joint Research Centre Global Surface Water Mapping (<https://global-surface-water.appspot.com/>), ambos fazendo uso da série histórica de imagens dos satélites Landsat.

No contexto regional sul-mineiro, o mais expressivo corpo hídrico é representado pelo reservatório da Usina Hidrelétrica de Furnas (UHE Furnas), que registra anualmente, de acordo com dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio do Sistema de Acompanhamento de Reservatório (SAR/ANA), relevantes oscilações verticais do nível de suas águas (ANA, 2022), refletindo em diversos impactos nos circuitos econômicos regionais (LEMOS JÚNIOR, 2010; GODOY, 2017).

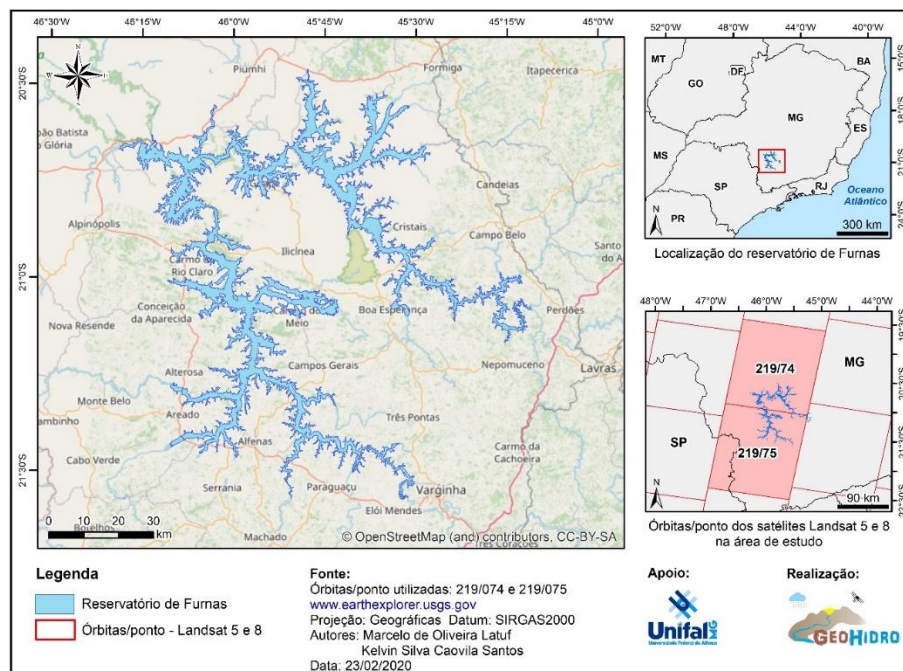
Neste contexto, o presente estudo objetiva mapear a variação espaço-temporal da lâmina d'água do reservatório de Furnas, no período entre 1995 e 2019, mediante imagens dos catálogos dos satélites Landsat 5 e 8, bem como ajustar equações de regressão entre os parâmetros área do espelho d'água, cota altimétrica e volume útil, visando subsidiar ações de planejamento e gestão dos recursos hídricos que garantam os usos múltiplos dos recursos hídricos.

Materiais e Métodos

Localização e caracterização da área de estudo

O reservatório da UHE Furnas (Figura 1) foi planejado durante o governo do ex-presidente Juscelino Kubitschek de Oliveira (1956-1961), no atendimento à crescente demanda energética brasileira naquele período (BRANDI, 2021). A obra da barragem, localizada entre os municípios mineiros de São João Batista do Glória e São José da Barra, iniciou-se em 1958, havendo o enchimento do lago artificial e início da geração hidroenergética em 1963 (FURNAS, 2022).

Figura 1 - Localização do reservatório de Furnas



Como principais sistemas hídricos afluentes ao reservatório têm-se os rios Grande, Sapucaí, Verde, Jacaré, Santana e Machado, formando o lago artificial de área em sua cota máxima de 1.440km², armazenando o total de 22,95 bilhões de metros cúbicos e potência instalada de 1.216 megawatts (FURNAS, 2022).

Com relação à precipitação média anual na bacia afluente ao reservatório de Furnas, no período entre 1977 e 2006, tendo por base estudo do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2011), por meio do Atlas Pluviométrico do Brasil, observou-se a média de 1.528,2mm com desvio padrão de 83,5mm.

Quanto à faixa operativa da UHE Furnas ($20^{\circ}40'6,73''S$ e $46^{\circ}18'53,81''O$), o reservatório possui variação de 18m entre o mínimo e máximo operativo, com cotas altimétricas que variam entre 750m e 768m acima do nível do mar, respectivamente (FURNAS, 2022).

O reservatório é gerido por Furnas Centrais Elétricas S/A e está inserido na Circunscrição Hidrográfica do Entorno do Reservatório de Furnas (IGAM, 2022a), referente à bacia do rio Grande e posiciona-se como tema central das ações do Comitê da Bacia Hidrográfica do Entorno do Reservatório de Furnas (CBH Furnas), criado pelo Decreto Estadual n.º 42.596/2002 (MINAS GERAIS, 2002).

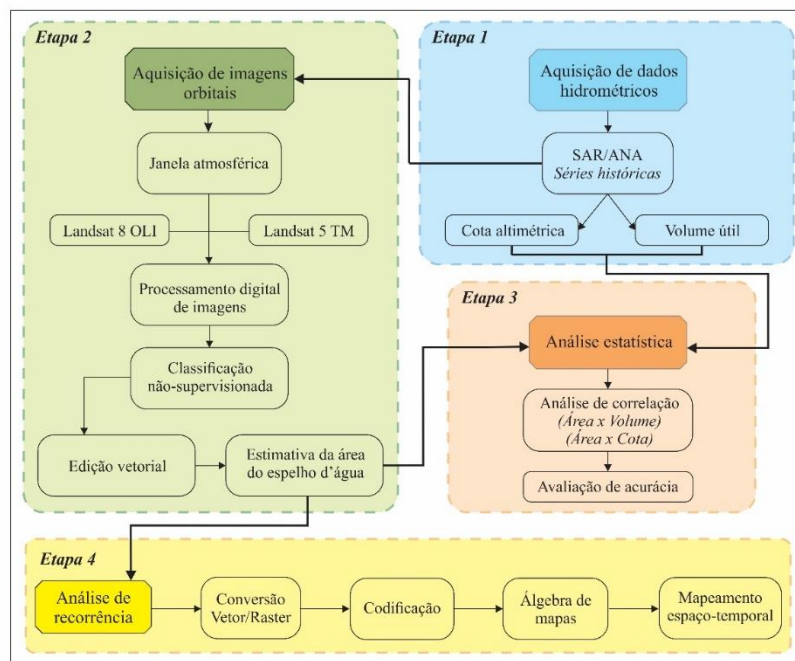
O reservatório da UHE Furnas impacta, direta ou indiretamente, as atividades econômicas de 50 municípios (IGAM, 2022b), com população estimada em 2021 de 949.599 mil habitantes (IBGE, 2021).

Desde sua criação, tornou-se um atrativo a diversos segmentos usuários, pautado nos usos múltiplos dos recursos hídricos (BRASIL, 1997). Entretanto, há conflitos pelo uso dos recursos hídricos no entorno do reservatório há décadas, a exemplo, os debates e – embates – acerca das oscilações do nível das águas entre o principal usuário (setor energético) e demais segmentos, representados em sua maioria pela cadeia econômica do turismo (LEMONS JÚNIOR, 2010; GODOY, 2017).

Aquisição e tratamento de dados

Os procedimentos metodológicos foram pautados em quatro etapas (Figura 2), sendo a primeira caracterizada pela aquisição de dados hidrométricos, a segunda etapa consistiu na aquisição e tratamento de dados orbitais, a terceira pautou-se na análise estatística dos dados e, finalmente, a quarta e última etapa concentrou-se na análise da recorrência espaço-temporal do nível da água do reservatório de Furnas.

Figura 2 - Fluxograma metodológico da pesquisa



A etapa de aquisição de dados hidrométricos consistiu na obtenção de dados diários do volume útil (%) e da cota altimétrica (m) do nível de água do reservatório da UHE Furnas, por meio de acesso ao SAR/ANA, no endereço <https://www.ana.gov.br/sar/>, onde foram adquiridos os dados pareados entre as duas variáveis a partir de 1995.

No que tange à etapa 2, foram utilizadas as imagens orbitais dos satélites Landsat 5 e Landsat 8, sensores Thematic Mapper (TM) e Operational Terra Imager (OLI), respectivamente, obtidas por meio do site Earth Explorer do Serviço Geológico Norte-Americano (USGS), <https://earthexplorer.usgs.gov/>. As imagens foram adquiridas com o processamento Level-1 (correção radiométrica e geométrica), para as órbitas/ponto 219/074 e 219/075, no período entre 1995 e 2019.

A aquisição de imagens orbitais ocorreu orientando-se pelas passagens dos satélites por “janelas atmosféricas” na área de estudo, ou seja, onde não fossem detectadas a presença de nuvens ou suas sombras, sobre a lâmina d’água do reservatório de Furnas, em virtude das características dos sensores utilizados.

O processamento digital das imagens consistiu na execução de atividades de reprojeção e mosaico da banda do infravermelho próximo, bandas 4 e 5, respectivamente aos sensores TM e OLI, com o auxílio do software Envi 5.0, para cada passagem dos satélites. Logo após, optou-se por reduzir a área de processamento das imagens resultantes a um retângulo envolvente que enquadrasse o reservatório da UHE Furnas.

O mapeamento do espelho d'água da UHE Furnas baseou-se na absorção do fluxo radiante por corpos hídricos da banda do infravermelho próximo, pois Jensen (2009) comenta que quase a totalidade da energia incidente nesta faixa do espectro eletromagnético é absorvida pelo corpo hídrico, resultando em baixa resposta de reflectância neste comprimento de onda, o que torna a aparência destes corpos, expressivamente, contrastante à superfície emersa.

Desta forma, o mapeamento do espelho d'água foi realizado por meio do método de classificação não-supervisionada, a partir da segmentação das imagens e definição de limiares através da interpretação visual do histograma unidimensional da banda do infravermelho próximo.

Os procedimentos de classificação supramencionados foram realizados pelo módulo Feature Extraction do software Envi 5.0 e, logo após sua conclusão, exportaram-se os polígonos resultantes para o formato shapefile. Tais arquivos vetoriais foram utilizados na edição vetorial, que teve por objetivo a minimização de erros do mapeamento do espelho d'água, por meio da inspeção visual em tela na escala de 1:60.000, utilizando-se o módulo Editor do programa computacional ArcMapTM 10.6.1, obtendo-se ao final o quantitativo da área do espelho d'água em quilômetros quadrados.

A avaliação de exatidão global do mapeamento contou com a inserção de 100 pontos aleatórios por imagem na banda do infravermelho, onde foram inspecionados visualmente em tela e rotulados nas classes água ou solo. Concluída a classificação, os pontos previamente rotulados como água foram novamente verificados a fim da contabilização de pontos assertivos.

A etapa 3, referente à análise estatística dos dados, consistiu nos ajustes estatísticos entre as variáveis área do espelho d'água (km²), volume útil (%) e cota altimétrica do nível da água (m), por meio da análise de regressão linear, tendo como limiares de ajustes o valor do coeficiente de determinação (R²) maior ou igual a 0,7 e intervalo de confiança de 95%. A avaliação da acurácia baseou-se na estatística da Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE), sendo tais procedimentos realizados em ambiente de planilha eletrônica, utilizando-se do pacote demonstrativo do plugin XLSTAT©.

A etapa de número 4 apoiou-se na análise de recorrência espaço-temporal do nível da água do reservatório de Furnas e, como insumo básico para esta análise, utilizaram-se os dados provenientes da etapa 2, referentes aos polígonos mapeados de cada passagem dos satélites selecionados.

Os polígonos foram convertidos para o formato matricial pelo módulo Polygon to Raster, sendo posteriormente codificados com o valor 1 e, logo após, procedeu-se o somatório de todas as passagens, utilizando-se a calculadora matricial do ArcMap™ 10.6.1, sendo possível desta maneira a elaboração do mapeamento da recorrência do nível da água no reservatório de Furnas.

Resultados e Discussão

Após cumpridas as etapas e os critérios apontados pelo fluxograma metodológico proposto, obtiveram-se as recorrências mensais e anuais do imageamento orbital dos satélites Landsat 5 e 8 sobre o espelho d'água do reservatório de Furnas.

Em função do tipo climático reinante no entorno do reservatório, Clima Tropical de Altitude (Cwa), que possui sazonalidade marcante no regime de precipitações ao longo do ano (REBOITA, 2015), evidenciaram-se os meses de julho, agosto e setembro como o período de maiores ocorrências de "janelas atmosféricas", representando 67% das imagens selecionadas (Tabela 1), com destaque para agosto com 15 cenas.

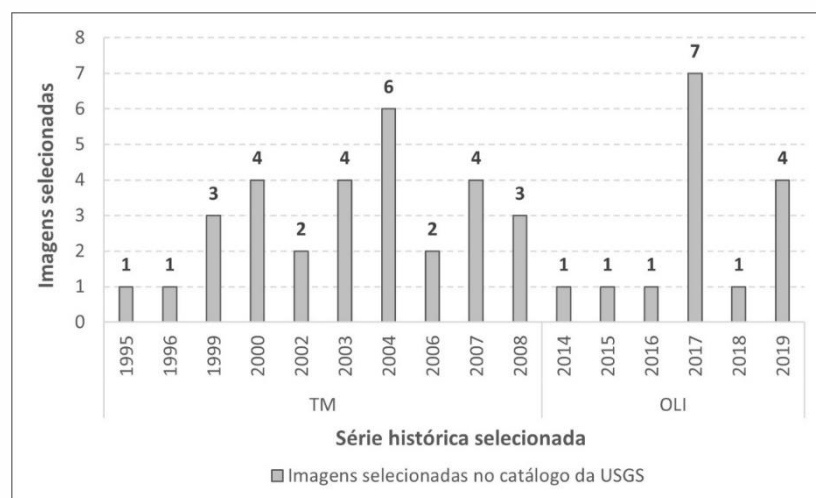
Tabela 1 - Recorrência mensal de imagens selecionadas (1995 a 2019)

Mês	Imagens (und)	Mês	Imagens (und)
Janeiro	0	Julho	6
Fevereiro	0	Agosto	15
Março	0	Setembro	9
Abril	3	Outubro	4
Maio	3	Novembro	1
Junho	4	Dezembro	0

Esta característica climática determinou, expressivamente, o quantitativo de imagens adquiridas, visto que no período de chuvas, compreendido entre outubro e março (IGAM, 2013), apenas 5 imagens foram selecionadas de acordo com os critérios adotados.

Já no que tange à recorrência anual de imagens selecionadas (Figura 3), destacam-se os anos de 2017 e 2004, com respectivamente 7 e 6 cenas obtidas. Por outro lado, houve anos em que não foi possível a aquisição de cenas ($n = 9$), sendo estes 1997, 1998, 2001, 2005 e de 2009 a 2013. Este último período sem imagens (5 anos), coincidiu com o final do período de operação do Landsat 5 e os preparativos para o lançamento do Landsat 8 (EMBRAPA, 2021).

Figura 3 - Recorrência anual de imagens selecionadas (1995 a 2019)

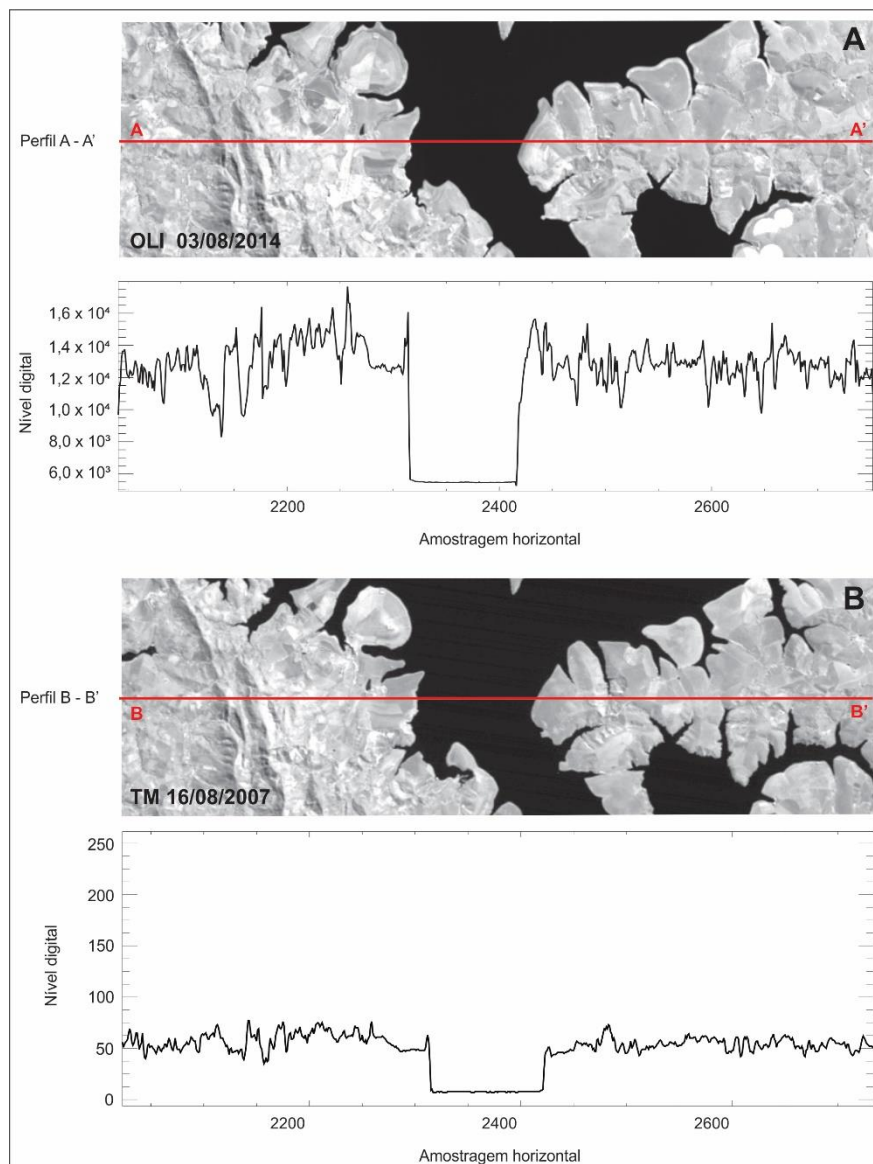


Tomando-se por base o recorte temporal deste estudo (25 anos), há uma média aproximada de aquisição de 2 imagens por ano. Esta irregularidade na distribuição de cenas disponíveis, sem cobertura e sombra de nuvem sobre o reservatório, impacta no mapeamento do espelho d'água, como já mencionado. Entretanto, auxilia na detecção das áreas onde há recuos longitudinais expressivos, ocasionados pela oscilação do nível da água do reservatório.

É sabido que sensores ópticos possuem limitações na detecção da superfície, devido à presença de nuvens (MONTANHER et al., 2018), porém são os sensores com as maiores extensões de séries históricas disponíveis em catálogos, a exemplo do Programa Landsat (USGS, 2022), o que auxilia no mapeamento e avaliação espaço-temporal das oscilações de diversos alvos, inclusive o reservatório de Furnas.

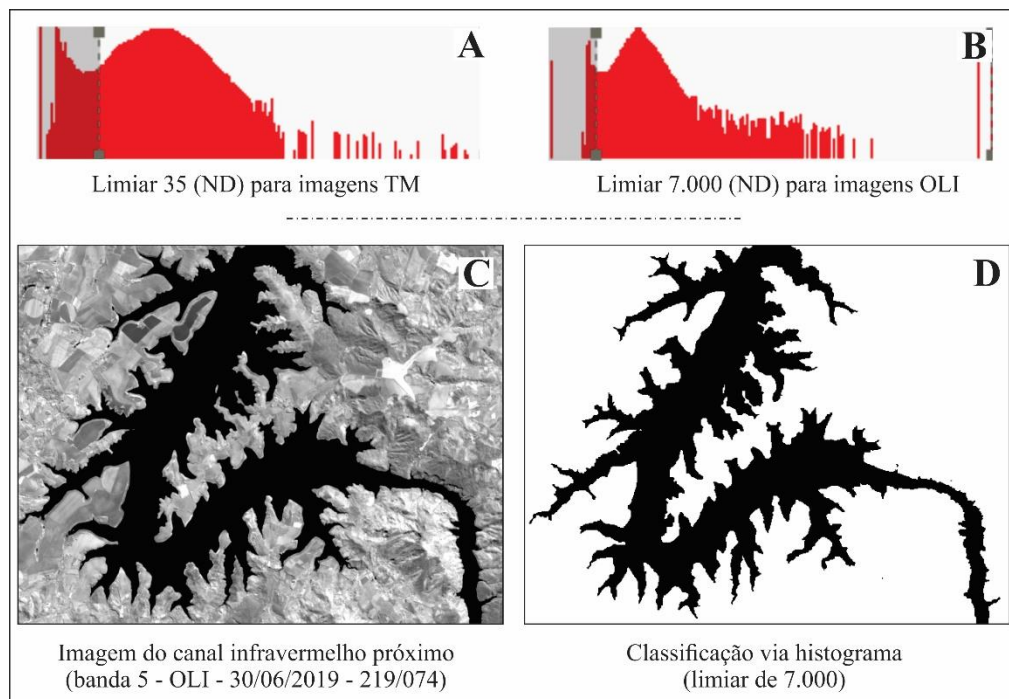
Neste contexto, o mapeamento de superfícies aquáticas foi realizado com base na determinação de limiares de detecção da água. Para isto, avaliaram-se as respostas radiométricas em diferentes transectos dispostos no reservatório de Furnas (Figura 4). Nas Figuras 4A e 4B evidenciam-se os perfis radiométricos em recortes da imagem dos sensores OLI e TM, respectivamente, sobre o reservatório de Furnas.

Figura 4 - Perfis radiométricos da banda do infravermelho próximo dos sensores OLI e TM



Observa-se que devido à maior resolução radiométrica do sensor OLI, comparativamente ao sensor TM (EMBRAPA, 2021), as diferenças entre a interação solo e água são mais pronunciadas graficamente. A partir da interpretação destes transectos, definiram-se os limiares de detecção da superfície aquática para os níveis digitais das imagens dos sensores (Figura 5).

Figura 5 - Limiares na detecção do reservatório de Furnas (sensores TM e OLI)



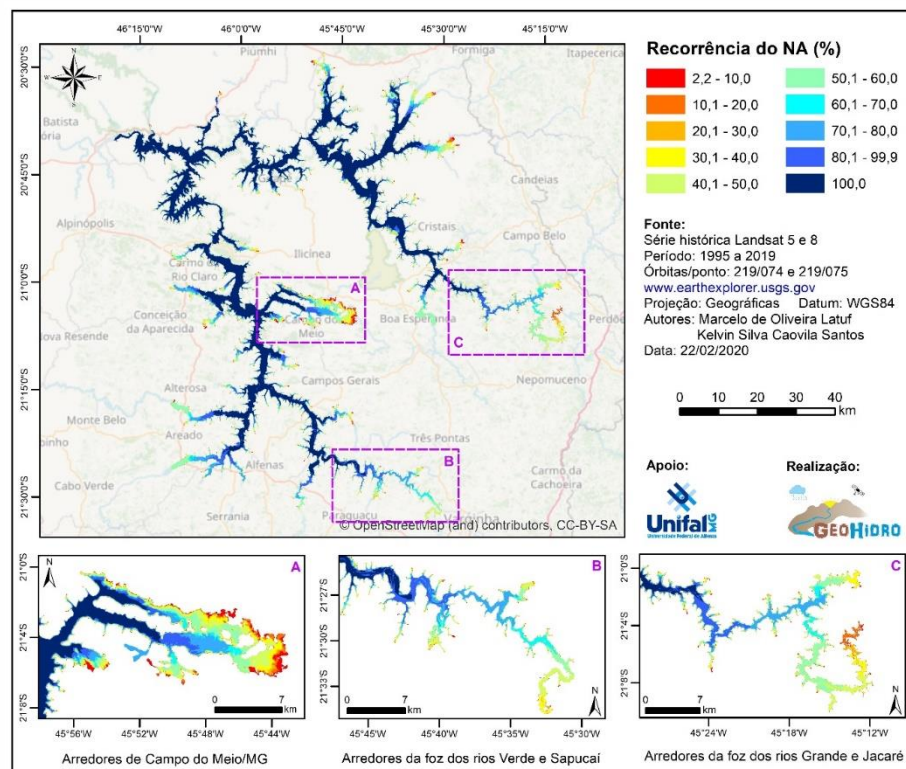
Observam-se na Figura 5A e 5B os histogramas de frequência dos níveis digitais para duas amostras de imagens dos sensores TM e OLI, com seus limiares, respectivamente. Já na Figura 5C, apresenta-se um recorte da órbita/ponto 219/074, com data de passagem de 30 de junho de 2019, sendo sua classificação visualizada na Figura 5D. Avaliou-se, por este método, menor quantidade de “ruídos” na imagem classificada quando comparadas às classificações via amostras de treinamento, o que facilitou expressivamente a etapa de edição vetorial.

Com relação à exatidão global do mapeamento do reservatório de Furnas no período entre 1995 e 2019, obteve-se ao final do processo de classificação o valor de 97,3%, o que evidencia que o procedimento alcançou resultados satisfatórios. Porém, identificaram-se algumas inconsistências em “pequenos braços” do reservatório, muitas destas representadas por canyons, em que houve confusão entre a diferenciação dos pixels de água e solo, devido às reentrâncias destes braços e, em especial, em virtude da resolução espacial dos sensores utilizados (30m).

A partir do total de imagens selecionadas (n = 45) no período entre 1995 e 2019, mapeando o espelho d'água em diferentes cotas, detectou-se área média de 1.081,09km², tendo sua variação oscilado entre 696,23km² (área mínima, com cota de 754,43m e volume útil de 16,04% em 15/10/2000) e 1.345,73km² (área máxima, com cota de 767,90m e volume útil de 99,18% em 28/04/2008).

Valendo-se da base de dados confeccionada dos diversos espelhos d'água no período supramencionado, foi possível elaborar o mapeamento da recorrência espaço-temporal do nível da água (Figura 6).

Figura 6 - Recorrência do nível da água (NA) no reservatório de Furnas (1995 a 2019)



A paleta de cor utilizada para representar a variação percentual do nível da água no reservatório de Furnas indica em cores frias locais onde há maior recorrência da água entre 1995 e 2019, enquanto as cores quentes indicam locais onde há reduzida permanência da lâmina d'água no tempo.

A análise da recorrência do nível da água comprova que as áreas mais atingidas pelos recuos longitudinais da lâmina d'água estão localizadas nos arredores do município de Campo do Meio/MG (Figura 6A), na região da foz dos rios Verde e Sapucaí (Figura 6B), bem como nos arredores da foz dos rios Grande e Jacaré (Figura 6C).

Destacam-se ainda os arredores dos municípios de Alfenas/MG, Areado/MG, Alterosa/MG, Boa Esperança/MG, Conceição da Aparecida/MG e Formiga/MG. Este último município possui área declarada de conflito pelo uso dos recursos hídricos desde 2019, por meio da Portaria do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) n.º 49 de 15 de outubro de 2019 (MINAS GERAIS, 2019).

Diversos são os conflitos pelo uso dos recursos hídricos no entorno do reservatório de Furnas e envolvem tanto o uso das águas superficiais quanto subterrâneas (DEUS, 2021). Ainda de acordo com o estudo de Deus (2021), as captações diretamente realizadas no reservatório de Furnas possuem como destinação majoritária o uso agrícola pela irrigação, com 84% das outorgas concedidas pela ANA no período de 2001 a 2020.

Por outro lado, a avaliação espaço-temporal da recorrência do nível de água apontou locais onde há sempre a presença de água, o que não necessariamente atende às demandas da sociedade, a exemplo dos circuitos econômicos do turismo, aquicultura e navegação. Neste sentido, não basta a presença de água, pois, em diversas circunstâncias, a profundidade é uma variável determinante nos ganhos ou perdas pelas atividades econômicas.

Porém, cabe destacar que as varrições de relevo podem estar associadas à intensidade dos recuos longitudinais da lâmina d'água, pois nas regiões de Capitólio/MG, São João Batista do Glória/MG, São José da Barra/MG, Carmo do Rio Claro/MG e Guapé/MG, por exemplo, há características de formações de canyons, onde a oscilação vertical da água não causa expressivos impactos no recuo longitudinal.

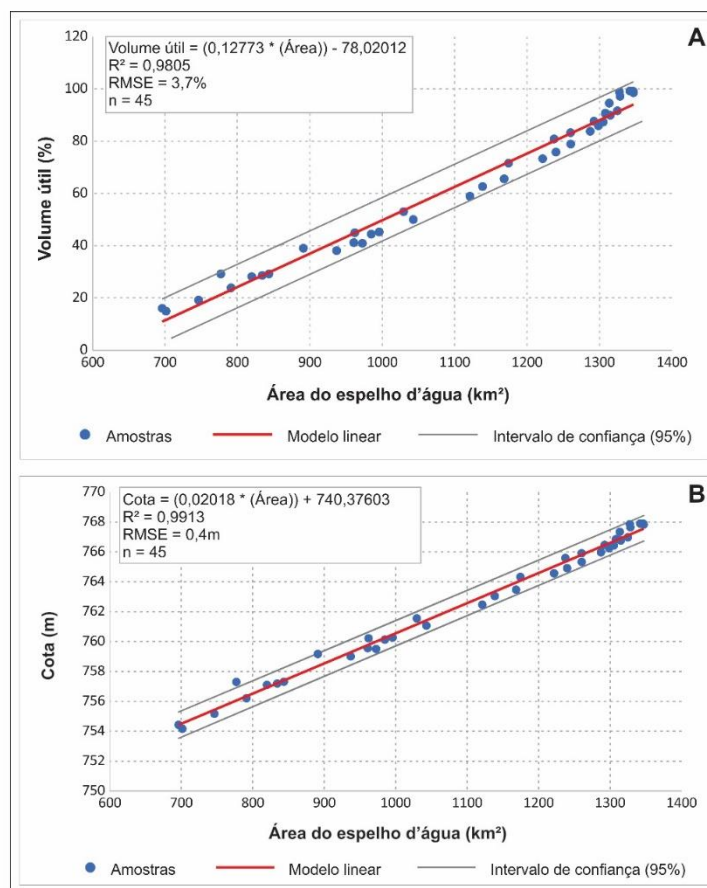
O mapeamento da recorrência do nível da água poderá auxiliar os 34 municípios lindeiros ao reservatório (IGAM, 2013) em ações de planejamento e gestão do território, com o intuito de mitigar impactos

negativos da baixa ocorrência temporal do nível da água em certas regiões, bem como indicar locais mais apropriados para atividades que demandem da água do reservatório de Furnas, a exemplo da captação para abastecimento humano e irrigação.

Com o mapeamento do espelho d'água do reservatório de Furnas em diferentes níveis, a partir das imagens dos satélites Landsat 5 e 8, foi possível executar a avaliação estatística entre as variáveis hidrométricas da área do espelho d'água (km²), obtida pelo processamento das imagens orbitais, com os dados de cota altimétrica da água (m) e volume útil (%), adquiridos pelo sistema SAR/ANA.

Desta forma, os ajustes entre as variáveis área do espelho d'água e volume útil, bem como área do espelho d'água e cota altimétrica da água, foram consideradas satisfatórias (Figura 7), com base nos coeficientes de determinação 0,9805 e 0,9913, respectivamente.

Figura 7 - Ajustes estatísticos entre as variáveis hidrométricas



A partir destas equações, evidenciaram-se expressivas correlações entre as variáveis hidrométricas, que possibilitam não só o monitoramento da cota e volume útil por sensoriamento remoto, mas principalmente abrem perspectivas no que tange à atualização de dados relacionados à curva cota-área-volume do reservatório de Furnas, conforme estudos realizados por Peng et al. (2006), Rodrigues e Liebe (2013) e Collischonn e Clarke (2016).

Considerações Finais

Os resultados deste estudo nos auxiliam a compreender os padrões espaço-temporais do nível da água no reservatório da Usina Hidrelétrica de Furnas no período de 1995 a 2019, que por sua vez identificaram áreas mais susceptíveis ao recuo da lâmina d'água, bem como subsidiam a (re)alocação de atividades econômicas advindas do uso múltiplo dos recursos hídricos, visando a minimização dos impactos causados.

Em referência às estimativas das variáveis hidrométricas volume útil e cota altimétrica por imagens orbitais, os resultados obtidos são encorajadores, tendo como base seu monitoramento espaço-temporal. Além disso, abre-se uma nova perspectiva para a continuação das pesquisas envolvendo outras variáveis, bem como a elaboração de modelos associados à qualidade da água.

Quanto às limitações dos sensores ópticos utilizados no monitoramento do reservatório, principalmente no que tange ao período das chuvas, a inserção de sistemas sensores radares, potencializará a aquisição de imagens em virtude da não sensibilidade destes à cobertura de nuvens, o que favorecerá a obtenção de imagens ao longo de todo o ano, independente da hora do dia ou das condições meteorológicas.

Almeja-se com este estudo contribuir com o planejamento e a gestão dos recursos hídricos na Circunscrição Hidrográfica do Entorno do Reservatório de Furnas, municiando o CBH Furnas, os municípios

que o compõem e o órgão gestor federal no diagnóstico da variação espaço-temporal do nível de água, bem como no planejamento de adequações necessárias aos critérios de outorgas de uso dos recursos hídricos.

Cabe ressaltar que os dados deste estudo estão disponíveis à sociedade por meio do Sistema de Compartilhamento de Dados Geoespaciais – SisGEO, desenvolvido por Alvarenga et al. (2022), sendo acessado em <https://sisgeo.unifal-mg.edu.br/>.

Referências

ANA. **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/sar/>>. Acesso em: jan. 2022.

ALVARENGA, S. H.; VIEIRA, G. S.; LATUF, M. O.; PAGLIARES, R. M. Sistema de Compartilhamento de Dados Geoespaciais: SisGEO. **Caderno de Geografia**, v. 32, n. 69, p. 443-455, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2022v32n69p443>.

BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. **Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: princípios e aplicações**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. 161p. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/labisa/livro/>>. Acesso em: set. 2021.

BRANDI, P. **Furnas Centrais Elétricas completa 64 anos: história do setor elétrico**. Disponível em: <<https://memoriadaeletricidade.com.br/artigos/40211/furnas-centrais-eletricas-completa-64-anos>>. Acesso em: out. 2021.

BRASIL. República Federativa do Brasil. **Lei n.º 9.433 de 08/01/1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Governo da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 08 jan. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm>. Acesso em: dez. 2021.

CAMPOS, J. C.; SILLERO, N.; BRITO, J. C. Normalized difference water indexes have dissimilar performances in detecting seasonal and permanent water in the Sahara–Sahel transition zone. **Journal of Hydrology**, v.464-465, p. 438-446, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.042>.

COLLISCHONN, B.; CLARKE, R. T. Estimativa e incerteza de curvas cota-volume por meio de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Recursos**

Hídricos, v. 21, n. 4, p. 719-727, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616022>.

CPRM. **Atlas pluviométrico do Brasil**. Brasília: CPRM, 2011. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/11558>>. Acesso em: jun. 2022.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. 4. ed. Campinas, SP: IG/UNICAMP, 2002, 170p.

DEUS, F. O. **Outorgas de uso dos recursos hídricos na Circunscrição Hidrográfica do Entorno do reservatório de Furnas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Ciências da Natureza, Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, 2021. Disponível em: <<https://btd.unifal-mg.edu.br:8443/handle/tede/1968>>. Acesso em: dez. 2021.

EMBRAPA. **Características dos satélites Landsat**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/landsat>>. Acesso em: dez. 2021.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S/A. **Dados sobre a Usina Hidrelétrica de Furnas**. Disponível em: <<https://www.furnas.com.br/subsecao/120/usina-de-furnas---1216-mw?culture=pt.>> Acesso em: jan. 2022.

GODOY, M. J. **A reestruturação produtiva e territorial nos municípios de pequeno porte do entorno do Lago de Furnas (MG): (re)funcionalização, transformações e novas dinâmicas**. 2017. 140f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: <https://btd.ibict.br/vufind/Record/UNB_922280a6351dd3331acb680cca23dd2e>. Acesso em: fev. 2021.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.

IBGE. **Atualização da estimativa populacional brasileira para 2021**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: dez. 2021.

IGAM. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Entorno de Furnas: Resumo Executivo**. Belo Horizonte, 2013, 65p. Disponível em: <<http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/handle/123456789/617>>. Acesso em: jan. 2022.

IGAM. **Circunscrições hidrográficas do Estado de Minas Gerais**. 2022a. Disponível em: <<http://comites.igam.mg.gov.br/mapa-unidades-de-planejamento>>. Acesso em: jan. 2022.

IGAM. **Características do Entorno do Reservatório de Furnas**. 2022b. Disponível em: <<http://comites.igam.mg.gov.br/conheca-a-bacia-gd3>>. Acesso em: jan. 2022.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

LEMOS JÚNIOR, C. B. **A implantação da Usina hidrelétrica de Furnas (MG) e suas repercussões: estudo sobre a territorialização de políticas públicas**. 2010. 129f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010. Disponível em: <https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNICAMP-30_a1f0cb3f3f8ac740e21b72cb7797fa7f>. Acesso em: fev. 2021.

LEONARDO, H. R. A. L.; SALGUEIRO, C. O. B.; ALMEIDA, D. N. O.; SANTOS, S. M.; OLIVEIRA, L. M. M. Sensoriamento Remoto Aplicado na Geoespacialização do Reservatório Poço da Cruz - PE e seu Entorno. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.14, n.06, p. 3592-3607, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.6.p3510-3525>.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.

MINAS GERAIS. **Decreto n.º 42.596/2002 de 23/05/2002**. Institui o Comitê da Bacia Hidrográfica do Entorno do Reservatório de Furnas e dá outras providências. Governo do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 23 mai. 2002. Disponível em: <<https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=DEC&num=42596&comp=&ano=2002>>. Acesso em: jan. 2022.

MINAS GERAIS. **Portaria n.º 49 de 15 de outubro de 2019**. Declaração de Área de Conflito - DAC. n.º 002/2019, localizada na sub-bacia hidrográfica do rio Formiga, no município de Formiga - MG. Governo do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 15 out. 2019. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=49821>>. Acesso em: dez. 2021.

MONTANHER, O. C.; NOVO, E. M. L. M.; SOUZA FILHO, E. E. Temporal trend of the suspended sediment transport of the Amazon River (1984-2016). **Hydrological Sciences Journal**, v. 63, n. 13-14, p. 1901-1912, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1546387>.

PENG, D; GOU, S; LIU, P; LIU, T. Reservoir Storage Curve Estimation Based on Remote Sensing Data. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 11, n. 2, p. 165-172, 2006. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:2\(165\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:2(165)).

PEKEL, J.F.; COTTAM, A.; GORELICK, N.; BELWARD, A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**, v. 540, p. 418-422, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature20584>.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 11, v. 17, p. 206-226, jul./dez. 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.5380/abclima.v17i0.41493>.

RODRIGUES, L. N; LIEBE, J. Small reservoirs depth-area-volume relationships in Savannah Regions of Brazil and Ghana. **Water Resources and Irrigation Management**. v. 2, n. 1, p. 1-10, Jan.-Apr., 2013. Disponível em: <<https://www3.ufrb.edu.br/seer/index.php/wrim/article/view/1591>>. Acesso em: jun. 2022.

SOUZA JUNIOR, C. M.; KIRCHHOFF, F. T.; OLIVEIRA, B. C.; RIBEIRO, J. G.; SALES, M. H. Long-Term Annual Surface Water Change in the Brazilian Amazon Biome: Potential Links with Deforestation, Infrastructure Development and Climate Change. **Water**, v. 3, n. 11, p. 566, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11030566>.

USGS. **Dados e características do programa Landsat**. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/landsat-missions>>. Acesso em: jan. 2022.

XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 14, p. 3025-3033, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.

ZHOU, Y.; DONG, J.; XIAO, X.; XIAO, T.; YANG, Z.; ZHAO, G.; ZOU, Z.; QIN, Y. Open Surface Water Mapping Algorithms: A Comparison of Water-Related Spectral Indices and Sensors. **Water**, v. 9, n. 256, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/w9040256>.

Publisher

Universidade Federal de Goiás. Instituto de Estudos Socioambientais. Programa de Pós-graduação em Geografia. Publicação no Portal de Periódicos UFG.

As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.

Contribuições dos autores

Todos os autores ofereceram substanciais contribuições científicas e intelectuais ao estudo. As tarefas de concepção e design do estudo e preparação do manuscrito, bem como, revisão crítica foram desenvolvidas em grupo. O primeiro autor Marcelo de Oliveira Latuf ficou especialmente responsável pelo desenvolvimento teórico-conceitual, delineamento metodológico e redação. O segundo autor Kelvin Silva Caovila Santos, responsabilizou-se pela aquisição e processamento de dados.

Marcelo de Oliveira Latuf Professor do curso de Geografia da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG); Graduação em Geografia pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF); Mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV); Doutorado em Geografia pela Universidade Estadual Paulista - campus de Presidente Prudente (UNESP). Líder do Grupo de Pesquisa em Geodinâmica de Bacias Hidrográficas (GeoHidro).

Kelvin Silva Caovila Santos Bacharel em Geografia pela Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG); Atualmente trabalha com análise transporte e logística; Integrante do Grupo de Pesquisa em Geodinâmica de Bacias Hidrográficas (GeoHidro).

Data de recebimento 17 de janeiro de 2022

Aceite em 18 de abril de 2023

Publicação em 20 de outubro de 2023