ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Diagnóstico Batimétrico do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Caçu-GO

Wanderlubio Barbosa Gentil¹, Fernanda Luísa Ramalho², Celso de Carvalho Braga³, Assunção Andrade de Barcelos⁴, João Batista Pereira Cabral⁵

¹ Doutorando em Geografia, Universidade Federal de Goiás, Professor Instituto Federal de Goiás – Campus Jataí, Rua Orminda Vieira de Freitas, 775, Residencial Flamboyant, CEP 75804-714, Jataí, Goiás. (64) 3605-0800. wanderlubio@gmail.com. ² Doutoranda em Geografia, Universidade Federal de Goiás-IESA, Av. Esperança, s/n – Samambaia, CEP 74001-970, Goiânia, Goiás. (62) 3521-1184. ramalho_luisa@hotmail.com. ³ Professor Dr. Instituto Federal de Goiás – Campus Jataí, Rua Orminda Vieira de Freitas, 775, Residencial Flamboyant, CEP 75804-714, Jataí, Goiás. (64) 3605-0800. ccarvalhoabraga@gmail.com. ⁴ Doutorando em Geografia, Universidade Federal de Jataí, BR 364, Km 195, nº 3800, CEP 75801-615, Jataí, Goiás. (64) 3606-8202. assuncaoa-barcelos@hotmail.com. ⁵ Professor Dr. Associado IV, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Jataí, BR 364, Km 195, nº 3800, CEP 75801-615, Jataí, Goiás. jcabral2000@yahoo.com.br (autor correspondente)..

Artigo recebido em 18/05/2020 e aceito em 19/04/2021.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar as mudanças e os níveis de sedimentação ocorridos no reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Caçu, entre janeiro de 2014 e março de 2015. Os procedimentos empregados para avaliar o processo de sedimentação do reservatório envolveram o diagnóstico dos locais assoreados por meio de levantamento batimétrico e análise da velocidade de escoamento da água com o uso do acoustic doppler current profiler (ADCP). Os resultados obtidos permitiram identificar alterações no perfil topográfico do reservatório, sendo a perda de volume inferior a 0,5% ao ano. O local de maior acúmulo de sedimentos encontra-se no trecho inicial do reservatório (primeiros 6km), ocorrendo a formação de bancos de areia. Os valores máximos de velocidade de escoamento da água nos períodos avaliados variaram entre 0,858m/s a 1,979 m/s. Os valores mínimos da velocidade de escoamento foram detectados nas áreas entre o córrego do Caju e a barragem da usina hidrelétrica de Caçu.

Palavras Chave: Sedimentação. Velocidade da água. ADCP.

The Bathymetric Diagnosis of the Hydroelectric Power Station from Caçu – GO.

ABSTRACT

This research job has as its goal to evaluate the changes and the sedimentation levels occurred in the reservoir of Hydroelectric Power Station (UHE) Caçu, between January 2014 and March 2015. The procedures employed to evaluate the sedimentation process of the reservoir involved the diagnosis of the locals silted through the bathymetric survey and analysis of the water drainage speed with the use of the acoustic doppler current profiler (ADCP). The results obtained permitted to identify changings on the topographic profile of the reservoir, being the loss of the volume under 0,5% per year. The local of the largest sediment accumulation is located in the initial excerpt (first 6 kilometers) occurring the formation of sandbanks. The maximum speed values of wa ter drainage in the evaluated periods varied between 0,858m/s to 1,979 m/s. The minimum values of drainage speed were detected in the areas between the Caju water stream and the dam of the Hydroelectric Power Station of Caçu.

Keywords: Sedimentation. Water Speed. ADCP.

Introdução

A construção de reservatórios, principalmente os de grande porte, para empreendimentos hidrelétricos, provoca diversos impactos ambientais, como, por exemplo, a perda da biodiversidade, que parece ser o impacto mais evidente, pois, grandes áreas com vegetação e floresta nativas são inundadas; mas, outros

aspectos também merecem destaque, como a perda da qualidade da água, a erosão e o depósito de sedimentos, que implica em mudanças qualitativas e quantitativas e na circulação de matéria e energia em todo sistema fluvial (Szatten et al., 2018).

Nos seus cursos normais, os rios transportam sedimentos provenientes do solo e das

rochas existentes nas bacias hidrográficas. Porém, quando se constrói uma barragem, o processo de transporte de sedimentos é alterado, visto que a barragem serve como obstáculo para o escoamento dos mesmos, transformando o regime de lótico para lântico, reduzindo a velocidade de escoamento e fluxo das águas, além de favorecer a deposição dos sedimentos, resultando na sedimentação dos reservatórios (Morris & Fan, 1997; Campagnoli, 2006; Carvalho, 2008; CETESB, 2016).

Diversos reservatórios encontram-se total ou parcialmente assoreados e, para verificar essas alterações, pesquisadores do mundo todo têm realizado estudos para determinar as alterações do volume, causadas pelos depósitos de sedimentos em várias barragens e lagos do mundo. Dentre esses estudos, podem ser citadas as pesquisas desenvolvidas por Ceylan e Ekizoglu, (2014), Lopes et al., (2015b), Santos e Cunha (2015); Silva et al. (2016) e Foteh et al. (2018).

A estimativa do volume do material sedimentado em reservatórios tem sido realizada por meio da integração de dados topográficos antes e depois da fase de enchimentos de reservatórios, utilizando-se ecobatímetros de monofeixe e multifeixe, o GPR - Ground Penetrating Radar, que é um método geofísico, não invasivo e a estimativa do nível d'água por imagens de satélite, entre outros métodos (Paiva, Durand e Hossain, 2015; Lopes et al., 2015a; Collischonn e Clarke, 2016; Faria et al., 2017; Rocha et al., 2017).

Diante disso, o conhecimento da quantidade e da qualidade dos sedimentos transportados e depositados no reservatório é de fundamental importância para o planejamento e aproveitamento dos recursos hídricos e consequente geração de energia para uma região, uma vez que os danos ambientais (assoreamento e eutrofização) causados pela deposição desses sedimentos dependem da quantidade e da natureza dos mesmos, as quais, por sua vez, dependem dos processos de erosão (transporte e deposição) e do modelo de uso da terra de uma bacia hidrográfica (Sima, Tajrishy, 2013; Cruz, Rodrigues, 2013; Silva et al., 2016; Zhu, et al., 2019; Zeng et al., 2020).

A escolha do reservatório da UHE Caçu como objeto de estudo deve-se ao fato de a mesma estar localizada na bacia do rio Claro, que sofre com alto grau de antropização, proporcionado pelos distintos modelos existentes de uso da terra, pois, anteriormente à sua construção (que entrou em funcionamento em 2010), predominavam na área atividades agropastoris. Posteriormente, além dessas atividades, houve a introdução do cultivo de cana-de-açúcar e silvicultura, além de atividades de

recreação e lazer no reservatório (Cabral et al., 2013; Lima e Mariano, 2014; Rocha et al., 2015; Braga et al., 2018).

Assim sendo, este artigo versará sobre uma pesquisa realizada no reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Caçu, localizada em Caçu-Goiás (GO), que teve como objetivos diagnosticar o nível de sedimentação, identificar as zonas de compartimentação horizontal e verificar a velocidade de escoamento da água em três períodos distintos: dois no período úmido (28 de janeiro de 2014 e 31 de março de 2015) e outro no período seco (06 de agosto de 2014).

Material e métodos

Localização e Caracterização da Área de estudo

A Usina Hidrelétrica (UHE) Caçu (Figura 1), do grupo Gerdau Aços Longos S/A, localiza-se no município de Caçu e Cachoeira Alta, em Goiás, e possui área inundada pelo reservatório de aproximadamente 15 km². A usina tem um potencial instalado de 65 MW e sua casa de força é constituída de três máquinas da marca Kaplan, com capacidade de 23 MW por unidade, operando no modo fio d'água. O nível máximo de água, em seu barramento, é na cota de 477 m, e o nível máximo a jusante do barramento tem cota de 448,80 m, enquanto que, para a operação da usina, o nível máximo da água tem cota de 477 m e mínimo de 475 m, variando apenas 2 metros o nível do reservatório enquanto a usina estiver em operação. O perímetro do reservatório perfaz uma distância de 75,5 km, enquanto a profundidade média do reservatório é de 29 m e a profundidade máxima é de 32,60 m. O tempo médio de residência da água no reservatório é de 12 dias, enquanto a vida útil projetada do reservatório é de 675 anos (Braga et al., 2018a).

Litologicamente, a área de influência direta do reservatório é constituída por arenitos da Formação Marília e Vale do Rio do Peixe (que são mais suscetíveis a sofrer com processos erosivos devido à baixa compactação e cimentação, conforme Cabral et al., 2009), e rochas basálticas da Formação Serra Geral, que são encontradas no leito do rio Claro. Os levantamentos de solos apontam a presença de Latossolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho perférico, Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, Nitossolo Vermelho eutrófico e Neossolos Litólicos (Rocha et al., 2015). As áreas consideradas de maior suscetibilidade, classificadas como de média fragilidade ambiental, localizam-se em áreas de Argissolo e com declive entre 8 e 20% (Braga et al., 2018b).

O clima na área de estudo, de acordo com as pesquisas realizadas por Lima e Mariano (2014) e por Lopes e Mariano (2018), é classificado como Awa, tropical de savana, mesotérmico, indicando a ocorrência de um período chuvoso, que se estende de outubro a abril, com maiores concentrações de chuvas (entre 80 a 500 mm mensais), e um período menos chuvoso, de maio a setembro (entre 0 e 79 mm). A média anual da precipitação varia de 1400 a 1750 mm.

Em relação ao modelo de uso da terra, destaca-se o predomínio da pastagem para gado de leite e de corte, sendo que, em 2009, a pastagem

ocupava 71,91% e, em 2014, passou a ocupar 72,67% da área. As áreas de Cerrado ou matas ciliares remanescentes da vegetação natural, em 2009, ocupavam 22,20 % da área e, em 2014, ocupavam 21,57 %. Os cursos d'água ocupavam 0,67% da área da bacia em 2009 e 3,19% em 2014. As áreas ocupadas por culturas representavam 0,60% em 2009 e 1,26% em 2014. As áreas ocupadas com silviculturas ocupavam 0,19% da área da bacia em 2009 e 0,79% em 2014 (Braga et al, 2018b).

Figura 1 – Área de influência direta e reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Caçu-GO.

Os trabalhos de campo para obtenção dos dados georreferenciados (coordenadas dos trajetos, velocidade da água e profundidade) foram realizados em três períodos distintos, sendo dois no período úmido (28 de janeiro de 2014 e 31 de março de 2015 - Campo 1 e Campo 3) e outro no período seco (seis de agosto de 2014 - Campo 2).

O levantamento batimétrico e da velocidade de escoamento da água foi realizado tendo como referência as propostas de Carvalho (2008) e Gamaro (2012), utilizando-se receptores Global Positioning System (GPS) geodésicos e

Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP).

O cadastramento e o mapeamento dos trajetos transversais foram feitos utilizando a integração de um medidor acústico doppler de vazão (ADCP), modelo M9, da marca SONTEK, e um conjunto de receptores GPS, modelo R4, da marca Trimble, instalados sobre uma canoa motorizada (Figura 2), todos configurados com intervalo de gravação de um segundo, com horário sincronizado, para possibilitar a compatibilização dos dados do ADCP com os do receptor GPS.

Figura 2 - Instalação do ADCP M9 e GPS R4 na canoa para medição no reservatório da UHE Caçu-GO.

Enquanto um receptor GPS foi instalado como base, foram feitos trajetos transversais em zigue-zague (Figura 3) para densificar as medições batimétricas e obter uma melhor interpolação para geração do modelo digital do reservatório; com isso, foram obtidos mais de 30 mil pontos de batimetria por período. A seção longitudinal do reservatório, coincidente com o antigo leito do rio, foi obtida com a interpolação dos pontos de menores altitudes de cada seção transversal.

Esses trajetos georreferenciados foram salvos como rota no receptor GPS, o que permitiu, com o uso dele, a repetição dos mesmos trajetos em épocas posteriores.

Desse trabalho de campo, foram obtidas as

coordenadas georreferenciadas, a profundidade e a velocidade da água de todos os pontos projetados sobre o reservatório.

Importante destacar que o levantamento não tinha como referência o nível da água do reservatório, mas, sim, as coordenadas obtidas pelo receptor GPS. A cada segundo, o receptor gravava as coordenadas do ponto e o ADCP, no mesmo instante, obtinha a profundidade através do sensor vertical batimétrico. Com isso, as informações do fundo do reservatório eram obtidas independente das alterações do nível da água do reservatório.

De posse dos dados de campo, procedeu-se ao processamento dos dados de GPS com os softwares Topcon Tools e Trimble Business Center

(TBC), para se obter precisões milimétricas. O Software RiverSurveyor Live foi usado para processamento dos dados de profundidade e velocidade fornecidos pelo ADCP. O software ArcGis foi usado para elaboração dos mapas e geração dos modelos digitais, enquanto o software Topograph serviu para elaboração de mapas e cálculos de volumes e o software Mapgeo para cálculo das altitudes ortométricas. Por fim, os softwares Microsoft Word e Microsoft Excel foram usados para elaboração de textos, planilhas e gráficos.

Para se calcular a taxa de sedimentação no reservatório e verificar as alterações batimétricas, fez-se uso das cotas altimétricas obtidas em três períodos distintos no reservatório, de acordo com a proposta de Cabral et al. (2009) e Abdulrahman, Siyamand e Ali (2017). Isso permitiu a elaboração dos mapas de isóbatas, bem como a confecção de perfis batimétricos. Não existiam dados batimétricos de toda a área de estudo antes da construção do reservatório para se comparar com os resultados obtidos.

Figura 3 - Trajeto batimétrico realizado no reservatório da UHE Caçu-GO.

A compartimentação aquática (zonação longitudinal) do reservatório foi realizada de acordo com a proposta de Kimmel, Lind e Paulson (1990). Foi classificado como zona de rio (ou lótico) o ambiente onde o canal é mais estreito e apresenta fluxo alto. A zona de transição apresentou canal largo e profundo e fluxo reduzido. A zona de lago (ou lacustre) foi definida quando se apresentou canal largo, profundo e fluxo muito baixo. Essa classificação foi obtida pela análise dos dados de velocidade da água fornecidos pelo ADCP e da morfometria obtida com os dados da batimetria.

Os mapas de isolinhas foram confeccionados utilizando-se o método matemático "Inverso do Quadrado da Distância", conforme a proposta de Cabral et al. (2013). Neste método, o valor da célula interpolada é obtido pela média ponderada, utilizando-se o peso dos postos de controle mais próximos, ponderados pelo inverso da potência da distância, ou seja, não estimando os valores de "Zi" maiores ou menores que os valores máximos e mínimos dos dados.

Resultados e discussão

Os reservatórios desempenham papel importante na geração de energia e abastecimento de água para uso doméstico, agropecuário e industrial. No entanto, por se tratar de uma interferência antrópica ao meio ambiente, os mesmos podem causar impactos na área circundante da sua criação, principalmente por influenciar na dinâmica do ciclo da água (Agostinho et al., 2016; Zhang et al., 2016).

Os estudos voltados para o monitoramento em reservatórios tornam-se cruciais, por isso, observa-se uma intensificação de trabalhos nos últimos anos ligados a esses barramentos, tanto com intuito de avaliar o risco, quanto o dano potencial do empreendimento (Detofol, Bortolini, Felipetto, 2017).

Segundo o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), o risco é a probabilidade de acontecer um acidente que prejudique o meio ambiente e as pessoas. Já dano potencial são os problemas vindos do mau funcionamento da barragem.

Um dos efeitos potenciais que ocorre em um reservatório é o assoreamento, que é responsável por grande parte da escassez dos recursos hídricos, além de provocar enormes problemas operacionais. Esses depósitos de sedimentos do reservatório são decorrentes, principalmente, da erosão proveniente das bacias hidrográficas, no que reduz gradativamente a capacidade efetiva da barragem, ou seja, a vida útil dos reservatórios, além de aumentar o risco de inundação desses locais (Remini, Bensafia,

Nasroun, 2015).

A partir desse contexto, vários métodos são aplicados com o intuito de monitorar o assoreamento dos reservatórios. Para tanto, Licciardello et al. (2016) ressaltaram a importância da batimetria na análise comparativa de modelos aplicados em reservatórios. Os autores observaram no estudo do reservatório Ragoletto, no Mediterrâneo, que a batimetria é indispensável por se tratar de um método mais confiável para medição do rendimento de sedimentos e transporte de carga do leito em longos períodos de tempo.

Para Ferreira, Ayres Neto e Monteiro (2016), os usos múltiplos dos levantamentos batimétricos vão além do monitoramento de assoreamento de reservatórios, auxiliando também na manutenção de hidrovias, obras civis, locação de cabos e dutos e a prospecção de recursos minerais. Os autores ressaltam ainda que, no cenário atual, os produtos gerados por essa metodologia apresentam um elevado ganho em resolução e acurácia, tanto em termos planimétricos quanto altimétricos (profundidade). A detecção de mudanças em terreno submerso, o nível de água e o monitoramento do armazenamento do reservatório exigem dados batimétricos extensos (Alvarez et al., 2018).

A partir desse contexto, os dados do levantamento batimétrico permitiram produzir os mapas de isolinhas e as seções batimétrica de cada período do fundo do reservatório. Posteriormente, foi montado um banco de dados com as latitudes, longitudes e profundidades, que permitiram o cálculo do volume do material líquido de cada época, obtendo-se os seguintes valores, conforme, Tabela 1.

Tabela 1: Cálculo de volume.

PERÍODO	VOLUME (m³)
Campo 1 – 01/2014	163.195.511,67
Campo 2 – 08/2014	162.900.998,24
Campo 3 – 03/2015	162.781.138,84

Ressalta-se que, nesse cálculo, têm-se as informações das coordenadas do fundo do reservatório, desprezando as diferenças de nível da água do reservatório nas três medições. Com isso, foi adotado um nível único do reservatório para as três medições, com o propósito de se identificar a perda de volume, considerando as alterações do fundo.

De acordo com os valores de volume (Tabela 1), constatou-se uma diminuição de 294.513,43 m³ no volume de água do Campo 1 para o Campo 2 e de 119.859,40 m³ do Campo 2 para o Campo 3, o que pode ser presumido que é resultado

do acúmulo de sedimentos.

Ao analisar o volume total de cada campo, percebe-se uma perda de 0,18 % comparando-se o Campo 1 com o Campo 2 e 0,07 % comparando-se o Campo 2 com o Campo 3, valores que podem ser considerados pequenos quando comparados aos estudos realizados por Cabral et al. (2009) para o reservatório de Cachoeira Dourada, no estado de Goiás, em que foi detectada uma perda de 38% do seu volume inicial em 59 anos de assoreamento, ou para os estudos realizados por Miranda et al. (2013), para o reservatório da usina hidrelétrica de Três Irmãos (SP), que detectaram um assoreamento de 14,5% entre os anos de 1975 a 2008, e para os de Ceylan e Ekizoglu (2014), que detectaram uma taxa de sedimentação de 12,7% entre os anos de 1984 a 2009 para o reservatório de Altinapa, na Turquia.

Mesmo que o nível de sedimentação não seja muito significativo, perdendo menos de 0,5% ao ano (Carvalho, 2008), existe a necessidade de monitoramento, a fim de garantir o tempo de vida útil do reservatório e a geração de energia, fato este destacado nas pesquisas desenvolvidas por Santos e Cunha (2015), Khaba e Griffiths (2017), pois, a dinâmica hidrossedimentométrica de cada reservatório depende do modelo de uso e conservação da bacia do reservatório.

A partir da análise espacial e temporal da topografia de fundo do reservatório (Figuras 4A, 4B e 4C), é possível detectar que as menores profundidades são encontradas no setor entre o início do lago e o Córrego João e Maria, com valores que variam de 2 a 6 metros. Entre o córrego João e Maria e córrego do Caju, a profundidade variou entre 6 e 15 metros. Entre o córrego do Caju e o Barramento, a profundidade ficou entre 15 e 30 metros, demonstrando que a sedimentação diminui no sentido de montante para jusante, sendo as menores profundidades próximas ao remanso e nas áreas de influência dos afluentes sobre o reservatório.

Nos estudos realizados por Almeida, Figueiredo e Oliveira (2016) no reservatório de Itacarambi (Brasil), de Minhoni, Brito e Azevedo (2017) no reservatório da PCH Pipoca (Brasil) e por Armido et al. (2020) no reservatório de Keuliling (Indonésia), foram verificados que, no trecho inicial do reservatório, ocorria a menor profundidade, com possibilidade de formação de bancos de areia, e próximo ao barramento, as maiores profundidades, com menores possibilidades de formação de bancos de areia, fato semelhante aos observados nesta pesquisa para o reservatório de Caçu.

Após avaliação espacial e temporal das profundidades destacadas na figura 4 (A, B e C), buscou-se identificar, dentro dos setores, os locais com maiores alterações batimétricas e

sedimentação. Para isso, projetaram-se oito seções transversais (Figura 5) sobre os mapas de profundidade, contemplando diferentes valores de velocidade de fluxo da água e a contribuição de sedimentos em suspensão, conforme pesquisa desenvolvida por Barcelos et al. (2012).

Projetadas as seções transversais, produziram-se perfis comparativos das alterações do fundo do reservatório. Na seção 1 (Figura 6A), foi possível verificar que houve um processo de sedimentação no centro e na margem direita. Nesse trecho, foram identificadas alterações batimétricas de até 1,20 m. Na seção 2 (Figura 6B), localizada após a primeira curva acentuada do reservatório, observaram-se alterações de sedimentação de até 2,50 m, provocando alteração no formato do canal, com o acúmulo de sedimentos na margem direita do reservatório.

Observou-se que a curva acentuada à direita - próxima à seção 2 - proporciona uma diminuição do fluxo de água, contribuindo, assim, para formação de banco de areias (Figura 7). Tal fato pode ser associado ao modelo de uso da terra a partir da degradação do solo e alterações do fluxo de velocidade de escoamento da água proporcionado pela construção do reservatório que passa a regular a vazão do rio, fato este também destacado por Almeida, Figueiredo e Oliveira (2016) no reservatório de Itacarambi (Brasil) e por Santos et al. (2020) no rio São Francisco, entre as cidades de Sergipe e Alagoas.

Na seção 3 (Figura 8A), localizada ainda na parte inicial do reservatório, as alterações são mais evidentes no centro do reservatório, com alterações de profundidade de até 1,60 m, ao contrário do que se observou nas seções anteriores, quando as alterações ocorreram mais nas margens. A partir da análise dos perfis batimétricos nas seções 4 e 5 (Figuras 8B e 8C), é possível perceber que ocorreram alterações de até 2,12 m, que culminaram na retirada de sedimentos do lado esquerdo do reservatório e um acúmulo no lado direito, fato que se deve à curva acentuada e à força da corrente de água até este local, ainda coincidindo com a força hidráulica do canal do rio, antes da criação do reservatório.

Figura 4 - Mapas de profundidades para os três períodos analisados no reservatório da UHE Caçu-GO.

Figura 5 - Projeção das seções transversais no reservatório da UHE Caçu-GO.

6A – Seção 1

6B – Seção 2

Figura 6: Perfis batimétricos comparativos das seções 1 e 2 no reservatório da UHE Caçu-GO.

Figura 7 - Acúmulo de sedimentos na margem direita do reservatório da UHE Caçu-GO, próximo à seção 2.

A) Seção 3

B) Seção 4

C) Seção 5

Figura 8: Perfis batimétricos comparativos das seções 3, 4 e 5 do reservatório da UHE Caçu-GO.

As seções 6, 7 e 8 (Figura 9), localizadas na zona de compartimentação de lago, em que a velocidade reduz para 0,05 m/s e a profundidade e largura do reservatório são maiores, as alterações

de sedimentação foram de aproximadamente 0,50 m, ocorrendo de forma mais distribuída nessas seções.

A) Seção 6

B) Seção 7

C) Seção 8

Figura 9: Perfis batimétricos comparativos das seções 6, 7 e 8 do reservatório da UHE Caçu-GO (2015).

Com as comparações das seções transversais, observou-se que houve um acúmulo de sedimentos mais acentuado na parte superior do reservatório. Além disso, constatou-se que, em alguns trechos, houve a movimentação dos sedimentos que foram transportados para outro trecho, a jusante.

Ao comparar as seções transversais projetadas sobre os mapas de profundidade em diferentes períodos, foi possível perceber que o setor com maior nível de sedimentação ocorreu nos locais com maior velocidade de escoamento, região compreendida entre o início do reservatório até o córrego João Maria.

De acordo com as análises feitas, verificou-se que o trecho mais suscetível à acumulação de sedimentos é o correspondente aos primeiros seis quilômetros do reservatório, em que o intervalo de profundidade varia entre quatro a quinze metros e a velocidade da água é superior a

0,25 m/s.

Ao comparar os resultados da pesquisa realizada para o reservatório de Caçu, verifica-se uma certa semelhança em relação às pesquisas de sedimentação realizadas por Santos (2012) no reservatório de Vargem das Flores-MG, o qual verificou que o maior acúmulo de sedimentos ocorreu no setor inicial do reservatório e nas baixas profundidades, e à pesquisa realizada por Silva et al. (2016), que verificaram que o reservatório da represa Hedberg, em Iperó-SP, apresentou a maior taxa de sedimentação na região do deságue do rio Ipanema, localizada no trecho rio do reservatório, visto que o deflúvio é mais intenso na região de desembocadura.

Peteuil et al. (2017) estudaram sobre a dinâmica de transporte de sedimento no reservatório de Champagneux, na França, que funciona como fio d'água, mesmo caso da UHE-Caçu. Os autores observaram que, nos locais que

apresentam maior fluxo de água, ocorre uma maior mobilização dos sedimentos, e que a natureza dos depósitos tem uma grande influência nessas condições. Ressaltaram ainda que, em particular, as partículas arenosas correspondem às frações mais móveis.

Em relação à velocidade de fluxo, perceberam-se, por meio das medições com o ADCP, valores diferentes em todo o reservatório, permitindo, assim, analisar o comportamento nos vários trechos longitudinais para realizar a classificação das diferentes zonas de compartimentação longitudinal, de acordo com a proposta de Kimmel, Lind e Paulson, (1990).

Thornton et al. (1981) e Kimmel, Lind e Paulson (1990), em suas pesquisas, procuraram descrever os padrões espaciais de diferentes variáveis limnológicas ao longo do eixo principal de um reservatório. De acordo com esses autores, a velocidade de escoamento da água diminui de montante para jusante, assim como a concentração de sedimentos em suspensão, ocorrendo o inverso em relação à transparência da água.

Por meio dos estudos realizado pelos autores anteriormente citados, um reservatório pode ser dividido em três zonas (rio, transição e lacustre), com diferentes características da água, ao longo do eixo principal de um reservatório.

De acordo com os dados de velocidade da água, foram elaborados mapas de isolinhas dos três períodos avaliados, retratando o comportamento da velocidade, conforme as Figuras 10A, 10B e 10C.

Na espacialização dos dados nas três medições, o valor máximo da velocidade da vazão dos três campos ocorreu no período chuvoso. A velocidade de vazão no Campo 1, na entrada do reservatório, apresentou valores em torno de 1,979 m/s; já próximo ao barramento, a velocidade foi reduzida a quase 0,00 m/s. No Campo 2, a velocidade máxima encontrada foi de 0,858m/s na entrada do reservatório e no Campo 3 houve um aumento da velocidade para 1,395 m/s na entrada do reservatório.

Ao se avaliar as compartimentações aquáticas do reservatório (Figura 11), conforme a proposta de Kimmel, Lind e Paulson (1990), verificou-se que a zona de rio, segundo a variável velocidade de escoamento da água, encontra-se entre o início do reservatório até aproximadamente o Córrego das Três Barras (numa distância total de 4.386,94 m), setor em que o canal é mais estreito e menos profundo.

A zona de transição ocorre entre o trecho do Córrego Caju e Córrego da Furna (distância de 12.129,08 m), setor em que o reservatório tem um aumento gradativo da largura, o canal é um pouco mais profundo e a velocidade da água é inferior ao setor rio e superior ao setor lacustre. Por fim, a zona lacustre, que tem início nos córregos Caju e da

Furna até o barramento, em que a largura e a profundidade são maiores e a velocidade de escoamento da água apresenta os menores valores.

De acordo com o Campo 1, a zona de rio - onde foram projetadas as seções 1, 2 e 3 - apresentou variação de velocidade entre 1,979 m/s a 0,15 m/s. Na zona de transição - onde foram projetadas as seções 4 e 5 - a velocidade variou de 0,15 m/s a 0,05 m/s. Por fim, na zona lacustre - onde foram projetadas as seções 6, 7 e 8 - a velocidade variou de 0,05 m/s a aproximadamente 0,00 m/s.

Ao projetar a divisão das zonas de compartimentação sobre o perfil longitudinal do reservatório (Figura 12), verificou-se que a zona de rio compreende as profundidades médias de quatro a dez metros, que a zona de transição tem de dez a 25 metros e que a zona lacustre tem de 25 a 30 metros

Ao se avaliar espacialmente e temporalmente a velocidade de escoamento da água (Figura 10), a compartimentação aquática (Figura 11) e o perfil batimétrico longitudinal do reservatório (Figura 12), verifica-se que esses elementos possuem um papel importante na compreensão do processo de sedimentação e nos efeitos adversos à biota, e que estes parâmetros sofrem variações de acordo com as características de uso e ocupação das terras das bacias hidrográficas, variação hidrológica, idade dos reservatórios e presença de reservatórios a montante (Liu et al., 2012; Abdulrahman, Siyamand, Ali, 2017; Cabral e Pereira Filho, 2018; Cho et al., 2019).

No estudo realizado por Vyleta, Valent e Danáčová (2020), nos anos de 2017 e 2019, num lago da Eslováquia, os autores observaram que a sedimentação do reservatório também tem relação com fenômenos naturais que ocorrem na bacia hidrográfica e que não podem ser totalmente evitados, como o fato da diminuição da velocidade da corrente e a reduzida capacidade de transporte do sedimento pela água, que além de ocasionar problemas a jusante do barramento, cria uma área privada de sedimentos, compensada pelo aumento da capacidade erosiva.

A) Velocidade de escoamento em 01/14

B) Velocidade de escoamento em 08/14

C) Velocidade de escoamento em 03/15

Figura 10 - Mapas de velocidade de escoamento para os três períodos analisados no reservatório da UHE Caçu-GO

Figura 11 - Mapa de compartimentação horizontal do reservatório da UHE Caçu-GO.

Figura 12 - Perfil longitudinal do reservatório da UHE Caçu-GO.

Estudos realizados ao longo de 54 anos no reservatório de Koronwski, na planície do norte da Polônia, os autores Szatten et al. (2018) detectaram uma perda da capacidade do reservatório de 33% e uma perda de volume de água de 6,2% da área total. Muitos desses reservatórios estão cheios de sedimentos em suspensão devido ao fato de o reservatório receber uma grande quantidade de sedimentos dos seus afluentes e perder uma pequena quantidade devido ao barramento. Essa dinâmica é intrínseca à maioria dos estudos voltados à sedimentação em reservatórios.

Fato semelhante aos resultados apresentados por Cabral et al. (2013), a partir do estudo de variáveis limnológicas, com base na espacialização dos dados de transparência da água, turbidez e CSS e de acordo com a proposta de Kimmel, Lind e Paulson (1990).

Conclusões

A análise topobatimétrica e da velocidade do fluxo da água do reservatório da UHE Caçu possibilitou conhecer a sua morfologia, levando à conclusão de que o estudo desses fatores pode contribuir para a compreensão do processo de sedimentação dentro do reservatório.

Os resultados alcançados com a pesquisa permitiram concluir também que:

1) Houve sedimentação mais acentuada nos primeiros seis quilômetros do reservatório, provocando uma diminuição do volume da água em 0,18% entre a primeira e segunda medição, e 0,07% entre a segunda e terceira medição;

2) A velocidade de escoamento da água apresentou valores que variaram conforme o período de análise, sendo maior no período chuvoso e menor no período seco. Esses valores também sofrem variação conforme o trecho do reservatório, sendo mais altos próximos à entrada e mais baixos na medida em que se aproxima do barramento;

3) Essa variação da velocidade também apresentou valores que permitiram a classificação das zonas de compartimentação do reservatório, que ficaram assim definidas: da entrada do reservatório até a segunda curva acentuada (distância 4.386,94 m), zona de rio; desse ponto até os afluentes Córrego da Furna e Córrego do Caju (distância 12.129,08 m), zona de transição; e deste até o barramento, zona de lago;

4) A metodologia aplicada, por meio da análise morfológica do reservatório e do

mapeamento da velocidade, permitiu calcular o volume da sedimentação, dividir os compartimentos horizontais e identificar os locais mais suscetíveis à sedimentação.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Goiás pela licença de capacitação concedida ao primeiro autor.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás pela bolsa de formação que contribuiu para a realização desta pesquisa.

À CAPES e ao Programa de Cooperação Acadêmica, pelo financiamento de parte da pesquisa através do Processo 88887.124105/2014-00. Projeto “Análise integrada em bacias hidrográficas: estudos comparativos com distintos uso e ocupação do solo”.

Referências

- Abdulrahman, F. H., Siyamand, M. A., Ali A. Y., 2017. Creating a bathymetric contour map using acoustic Doppler current profiler (ADCP): Duhok Dam reservoir as a case study. **Polytechnic Joraul**, 7, 40-55.
- Agostinho, A. S., Gomes, L. C., Santos, N. C. L., Pelicice, F. M., 2016. Fish assemblages in neotropical reservoirs: Colonization patterns, impacts and management. *Fisheries Reserch*, 173, 26-36.
- Almeida, L. T. de., Figueiredo, F. P. de., Oliveira, F. G., 2016. Estimates of volume and sedimentation of the reservoir of the Itacarambi River dam, Minas Gerais, Brazil. *Pesquisas Agrárias e Ambientais*, 4, 231-237.
- Alvarez, L. V., Moreno, H. A., Segales, A. R., Pham, T. G., Pillar-Little, E. A., Chilson, P. B., 2018. Merging Unmanned Aerial Systems (UAS) Imagery and Echo Soundings with an Adaptive Sampling Technique for Bathymetric Surveys. *Remote Sensing*, 10.
- Armido, A., Azmeri, A., Fatimah, E., Nurbaiti, N., Yolanda, S. N., 2020. The sedimentation datasets of Keuliling reservoir. *Data in Brief*, 32.
- Barcelos, A. A., Cabral, J. B. P., Braga, C. C.; Rocha, I. R., 2012. Caracterizações físicas e químicas das águas dos afluentes da UHE Caçu. *Revista Geonorte*, 3, 739-749.
- Braga, C. C., Cabral, J. B. P., Lopes, S. M. F., Batista, D. F., 2018. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Reservatório da UHE CAÇU - Goiás. *Ciência e Natura*, 39, 81-98b.

- Braga, C. C., Cabral, J. B. P., Lopes, S. M. F., Oliveira, S. F., Rocha, I. R., 2018. Qualidade dos sedimentos em relação à presença de metais pesados no reservatório da usina hidrelétrica de Caçu – GO (Quality of sediments in relation to the presence of heavy metals in the hydroelectric plant reservoir in Caçu–Goiás). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 11, 959-972a.
- Cabral, J. B. P., Fernandes, L. A., Scopel, I., Becegato, V. A., Fiori, A. P., 2009. Avaliação do estado de assoreamento do reservatório de Cachoeira Dourada (GO/MG). *Sociedade & Natureza*, 21, 1, 97-119.
- Cabral, J. B. P., Wachholz, F., Becegato, V. A., Nascimento, E. S., 2013. Diagnóstico hidrossedimentológico do Reservatório da UHE Caçu-GO. *GeoFocus - Revista Internacional de Ciencia y Tecnologia de la Informacion Geográfica*, 13_1, 25-37.
- Cabral, J. B. P., Pereira Filho, W., 2018. Técnicas de sensoriamento remoto aplicada análise da concentração de sólidos em suspensão na UHE Foz do Rio Claro – GO. *Revista Brasileira de Geografia Física* 11, 1526-1541.
- Campagnoli, F., 2006. The production of the sediment from South American: propose of mapping of the erosion rates based on geological and geomorphological aspects. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Uberlândia, 7, 1, 3-8.
- Carvalho, N. O., 2008. *Hidrossedimentologia prática*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciências.
- CETESB, 2016. Relatório de qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo. São Paulo: CETESB, 2017. Disponível: https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2013/11/Cetesb_QualidadeAguasInteriores_2016_corre%C3%A7%C3%A3o02-11.pdf. Acesso: 13 abr. 2020.
- Ceylan, A., Ekizoglu, I., 2014. Assesment of bathymetric maps via gis for water in reservoir. *Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos*, Curitiba 20, 142-158.
- Cho, H., Marrs, R. H., Alday, J. G., Cho, K-H., 2019. Vertical and longitudinal variations in plant communities of drawdown zone of a monsoonal riverine reservoir in South Korea. *Jornal of Ecology and Environment* 43.
- Collischonn, B., Clarke, R.T., 2016. Estimativa e incerteza de curvas cota-volume por meio de sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 21, 719-727.
- Cruz, L. M., Rodrigues, S. C., 2013. Avaliação do potencial de produção de produção de sedimentos para a PCH Piedade – Monte Alegre de Minas-MG. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia 14, 54-73.
- Detofol, K., Bortolini, J., Felipetto, H. dos S., 2017. Análise batimétrica do lago municipal de Cascavel-PR. *Revista Técnico-Científica*, 1-22.
- Faria, S. H., Rodrigues, D. D., Medeiros, N. G., Aranha, P. R. A., 2017. Avaliação de radargramas batimétricos para cálculo de volume de represa empregando o classificador “FCLASS2”. *Boletim Ciências Geodésicas*, 23, 234-251.
- Ferreira, I. O., Ayres Neto, A., Monteiro, C. S., 2016. O uso de embarcações não tripuladas em levantamentos batimétricos. *Revista Brasileira de Cartografia*, 10, 68, 1885-1903.
- Foteh, R., Garg, V., Nikam, B. R., Khadatare, M. Y., Aggarwal, S. P., Kumar, A. S., 2018. Reservoir Sedimentation Assessment Through Remote Sensing and Hydrological Modelling. *J Indian Soc Remote Sens*, 46, 1893-1905.
- Gamaro, P. E., 2012. Medidores acústicos doppler de vazão. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional.
- Khaba, L., Griffiths, J. A., 2017. Calculation of reservoir capacity loss due to sediment deposition in the Muela reservoir, Northern Lesotho. *International Soil and Water Conservation Research*, 5, 130-140.
- Kimmel, B. L., Lind, O. T., Paulson, L. J., 1990. Reservoir primary production. In: Thornton, K. W., Kimmel, B. L., Payne, F. E. (eds.). *Reservoir limnology: ecological perspectives*. New York: John Wiley & Sons, 133-193.
- Licciardello, F., Toscano, A., Cirelli, G. L., Consoli, S., Bargallo, S., 2017. evaluation of sediment deposition in a Mediterranean reservoir: comparison of long term bathymetric measurements and swat estimations. *Land Degradation & Development*, 28, 566-578.
- Lima, A. M.; Mariano, Z. F., 2014. Análise microclimática no interior e fora das florestas estacionais semidecíduais na área da bacia da usina hidrelétrica de Caçu-GO. *Revista do Departamento de Geografia – USP*, 27, 67-87.
- Liu, W., Li, S., Bu, H., Zhang, Q., Liu, G., 2012. Eutrophication in the Yunnan Plateau lakes: the influence of lake morphology, watershed land use, and socioeconomic factors. *Environ Sci Pollut Res*, 19, 858-870.
- Lopes, H. L., Neto, A. R., Cirilo, J. A., 2015. Modelagem batimétrica no Reservatório de

- Sobradinho II: Avaliação do volume atual e da taxa de sedimentação no espaço de tempo entre 1978 e 2009. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, 67, 6, 1265-1277a.
- Lopes, J. W. B., Neto, J. R. A.; Pinheiro, E. A. R., 2015. Produção de sedimentos e assoreamento em reservatório no semiárido: o caso do açude Marengo, Ceará. *Geoambiente On-Line*, 24b.
- Lopes, R. M., Mariano, Z. F., 2018. Análise dos episódios de verão e inverno na área de influência dos reservatórios Caçu e Barra dos Coqueiros-GO. *Geoambiente On-Line*, 30.
- Minhoni, R. T. de A., Brito, G. M., Azevedo, R. F. de., 2017. Uso de ecobatímetro monofeixe na determinação da curva cota x área x volume do reservatório da PCH Pipoca – Minas Gerais – Brasil. *Irriga*, 22, 87-100.
- Miranda, R. B., Scarpinella, G. A., Mauad, F. F., 2007. Influência do assoreamento na capacidade de armazenamento do reservatório da usina hidrelétrica de Três Irmãos (SP). *Recursos Hídricos*, 34, 69-79.
- Morris, G. L., Fan, J., 1997. *Reservoir sedimentation handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Paiva, R. C. D., Durand, M. T., Hossain, F., 2015. Spatiotemporal interpolation of discharge across a river network by using synthetic SWOT satellite data. *Water Resources Research*, 51.
- Peteuil, C., Alliau, D., Wirz, C., Fretaud, T., Decachard, M., Roux, S., Reynaud, S., Boisson, N., Vollant, A., Baux, Y., 2017. Evaluating favorable conditions for sediment transport in reservoirs: Champagneux dam case study, France. *International Commission On Large Dams*.
- Remini, B., Bensafia, D., Nasroun, T., 2015. Impact of sediment transport of the Chellif River on silting of the Boughezoul reservoir (Algeria), 24, 35-40.
- Rocha, G. A., Ianniruberto, M., Baptista, G. M. M., Carneiro, K. B. R., 2017. Identificação de feições geológicas, geomorfológicas e antrópicas do Reservatório de São Simão, utilizando batimetria multifeixe. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69, 401-409.
- Rocha, I., Cabral, J. B., Nogueira, P., Barcelos, A., 2015. Avaliação sazonal das águas do reservatório da usina hidrelétrica Caçu no município de Caçu, Goiás. *Revista do Departamento de Geografia*, 29, 137-160.
- Santos, A. dos., Lopes, P. M. O., Silva, M. V. da., Jardim, A. M. da R. F., Moura, G. B. de A., Fernandes, G. S. T., Silva, D. A. de O., Silva, J. L. B. da., Rodrigues, J. A. de M., Silva, E. A., Oliveira-Júnior, J. F., (2020). Causes and consequences of seasonal changes in the water flow of the São Francisco river in the semiarid of Brazil. *Environmental and Sustainability Indicators*, 8.
- Santos, E. S. dos., Cunha, A. C. da., 2015. Análise de cenários hidrossedimentométricos para estimar taxas de assoreamento e vida útil do reservatório da UHE cachoeira caldeirão no rio Araguari/AP- Brasil. *Biota Amazônia*, 5, 88-97.
- Santos, S. P., 2012. *Morfometria, compartimentação e hidrodinâmica de um reservatório periurbano tropical: prognóstico sobre o tempo de vida útil do reservatório de Vargem das Flores, Minas Gerais – Brasil*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo de Vida Silvestre, do Instituto de Ciências Biológicas, da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- Silva, D. C. C., Sales, J. C. A., Filho, J. L. A., Lourenço, R. W., 2016. Caracterização morfométrica e suas implicações no acúmulo de sedimentos em reservatórios: o caso da Represa Hedberg, Iperó-SP. *Ra'e Ga, Curitiba*, 36, 225-245.
- Sima, S., Tajrishy, M., 2013. Using satellite data to extract volume–area–elevation relationships for Urmia Lake, Iran. *Journal of Great Lakes Research*, 39, 90–99.
- Szatten, D., Habel, M., Pellegrini, L., Maerker, M., 2018. Assessment of Siltation Processes of the Koronowski Reservoir in the Northern Polish Lowland Based on Bathymetry and Empirical Formulas. *Water*, 10.
- Thornton, K. W., Kennedy, J. H., Carroll, W. W., Walker, R. C., Gunkel, R. C., Ashby, S., 1981. Reservoir sedimentation and water quality: An heuristic model. In: H.G. STEFAN, ed. *Proceedings of the Symposium on surface water impoundments*. New York: American Society Civil Engineer, 654-651.
- Výleta, R., Valent, P., Danáčová, Z., 2020. Monitoring changes in the morphology and storage of a small water reservoir: a case study from vrbovce, Slovakia, 28, 30-35.
- Zeng, Y., Yang, Y., Li, Y., Wang, Q., Hou, S., Zeng, J., 2020. Dynamic characteristics of heavy metals in a eutrophic reservoir in

subtropical China. *Journal of Geochemical Exploration*, 208.

Zhang, S., Foerster, S., Medeiros, P., Araújo, J. C. de., Motagh, M., Waske, B, 2016. Bathymetric survey of water reservoirs in north-eastern Brazil based on TanDEM-X satellite data. *Science of the Total Environment*, 571, 575-593.

Zhu, H.; Bing, H., Wu, Y., Zhou, J., Sun, H., Wang, J., Wang, X., 2019. The spatial and vertical distribution of heavy metal contamination in sediments of the Three Gorges Reservoir determined by anti-seasonal flow regulation. *Science of the Total Environment*, 664, 79–88.