ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

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

Estimativa de volume de reservatório de água com software livre através de dados obtidos com embarcação remotamente pilotada

Giovana Moraes Marques¹, Dhonatan Diego Pessi², Marcelo Ricardo Haupenthal³, Máyla Golin Rodrigues⁴, Éder de Souza Rodrigues⁵, Luana Nayara Nascimento⁶, Éric Vieira Cano⁷, Kassia de Souza Corrêa⁸, Antonio Conceição Paranhos Filho⁹

¹Bacharel em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), FAENG, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, R. Ufms, 527 - Universitário, Campo Grande - MS, 79070-900, 78068-600, (67) 98407-5007, engambgmarques@gmail.com (autor correspondente), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3116-0931>. ²Doutorando em Tecnologias Ambientais, PPGTA – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), LabGis - Laboratório de Geoprocessamento para Aplicações Ambientais da FAENG-UFMS, Cidade Universitária, Caixa Postal 549. CEP 79070-900. Campo Grande – MS, dhonatan.pessi@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0781-785X>. ³Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), FAENG, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, R. Ufms, 527 - Universitário, Campo Grande - MS, 79070-900, (67) 98415-4874, haupen@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4679-4259>. ⁴Engenheira Civil e Acadêmica de Mestrado no Programa Recursos Naturais - PGRN, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), FAENG, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, R. Ufms, 527 - Universitário, Campo Grande - MS, 79070-900, mayragolin@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0280-4921>. ⁵Tecnólogo em Redes de Computadores, Mestre em Recursos Naturais pela UFMS, Professor Efetivo do IFMS - Computação, Campus Campo Grande, Rua Taquari, nº831. CEP 79100-510, Campo Grande – MS, eder.rodrigues@ifms.edu.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6256-5080>. ⁶Bacharel em geografia pela UFMS - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campus Campo Grande, Cidade Universitária, Av. Costa e Silva - Pioneiros, MS, 79070-900, Campo Grande - MS, aerodatum@aerodatum.com.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1042-9535>. ⁷Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental pela UCDB, mestrando no Programa de Recursos Naturais - PGRN, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), FAENG, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, R. Ufms, 527 - Universitário, Campo Grande - MS, 79070-900, (67) 981794323, ericvcano@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4954-6138>. ⁸Acadêmica de Geografia pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), FAENG, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, R. Ufms, 527 - Universitário, Campo Grande - MS, 79070-900, 78068-600, (67) 99295-9450, kassiasouzacorrea@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5666-2546>. ⁹Livre-Docente em Geologia pela USP, Professor Titular da UFMS, LabGis - Laboratório de Geoprocessamento para Aplicações Ambientais da FAENG-UFMS, Cidade Universitária, Caixa Postal 549. CEP 79070-900. Campo Grande – MS, antonio.paranhos@ufms.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9838-5337>.

Artigo recebido em 08/04/2021 e aceite em 23/11/2021.

RESUMO

Em projetos de navegação, construção de portos, reservatórios e barragens faz-se necessário o conhecimento da profundidade e volume de um corpo hídrico, como uma seção de um rio ou um reservatório de água, visto que a circulação dos navios requer profundidades suficientes e em barragens com finalidade de captação de água o volume é essencial para gestão e planejamento do abastecimento das atividades dependentes da captação. Para o tal utiliza-se de métodos de obtenção de valores de profundidade, chamados levantamentos batimétricos. Este trabalho tem por objetivo propor técnica para estimativa de volume de reservatórios de água com software livre através da comparação de dois tipos de interpolação de dados batimétricos e de dados obtidos com trena, ou seja, de forma acessível do ponto de vista financeiro e prático. Foi feito um trabalho de campo, com protótipo de barco autônomo construído pelos autores acoplado com ecobatímetro de forma a obter os dados de profundidade ao longo das seções de uma piscina semiolímpica. Com os valores de profundidade levantados, utilizou-se de duas formas de interpolação, IDW e TIN, e os volumes obtidos foram comparados com o calculado pela medição em trena do reservatório de geometria bem definida, uma piscina. Observou-se que a interpolação IDW teve melhor distribuição e uma diferença de apenas 6,24 m³ do volume calculado (1,30 % do volume total), dessa forma a mesma pode ser utilizada como modelagem de reservatórios para fins de outorga, gestão hídrica e projetos executivos de construção de barragens ou portos.

Palavras-chave: batimetria; profundidade; interpolação; software livre.

Water reservoir volume estimation with free software through data obtained with remotely-operated ships

ABSTRACT

On navigation, ports and reservoirs projects, knowledge of the depth and volume of a water stream, like sections of a river or a reservoir, for instance, is necessary since it's essential to have minimum depth for navigation and volume's

management for water distribution in dams or reservoirs. Bathymetric surveys are commonly used as a methodology to extract data on the depth of these streams. The objective of this study is to present a technique to calculate the volume of water reservoirs using an open software by comparing two kinds of interpolation of bathymetric data and depth data measured with a measuring tape. There was a field survey with an autonomous boat prototype attached with an echo sounder so that it could be possible to extract depth data throughout the sections of the reservoir. As a result of two interpolation methodologies, TIN and IDW, the processed data was compared with the volume calculated on the field for a well-shaped reservoir, in this case a pool. It was observed that the IDW interpolation presented a better distribution and a slight difference of 6,24 m³ from the measured volume, therefore it can be used for modeling reservoirs in order to obtain licenses, hydrologic management, and dams or port projects.

Keywords: bathymetry; depth; interpolation; free software.

Introdução

O Brasil tem a maior rede hidrográfica do mundo, com rios, córregos, lagos que se destacam em extensão, largura e profundidade. Um bom exemplo é o rio Amazonas, um dos mais extensos do mundo, se estendendo em aproximadamente 6.280 quilômetros (Garcia, 1998). Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME, 2019), a energia hidrelétrica foi responsável por 27,9% da produção de energia renovável brasileira para atividades de 2018, e com o crescimento da demanda por recursos hídricos, houve a necessidade de estudos mais específicos nas áreas hidrológicas e hidráulicas, a fim de gerenciar e fiscalizar as demandas e tipos de usos dos recursos hídricos. No Estado de Mato Grosso do Sul, o órgão que rege sob as águas de domínio do Estado é o Instituto do Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul – IMASUL, através de resoluções estaduais que confirmam a Lei Nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997 (Planalto, 1997), que estabelece a Política Nacional dos Recursos Hídricos – PNRH.

Um de seus principais instrumentos é a outorga dos direitos de uso dos recursos hídricos, que tem como objetivo assegurar a qualidade e quantidade de água utilizada para diferentes tipos de uso, de forma a garantir que a mesma esteja disponível para as futuras gerações (Planalto, 1997). Diante desse cenário, o estudo do comportamento de corpos hídricos é essencial, como obtenção de volume, vazão, análises físico-químicas e averiguação de regimes de cheia. A batimetria é a metodologia mais utilizada atualmente para medição de profundidade de rios e lagos, que consiste na obtenção de valores de profundidade de um rio, lago ou represa e é expressa cartograficamente por curvas batimétricas que unem pontos de mesma profundidade com equidistâncias verticais, semelhante às curvas de níveis de terreno (DNIT, 2015).

Os levantamentos batimétricos mais comuns, conforme afirma Bilhalva (2013), são os ecobatímetros monofeixes ou multifeixes e réguas.

O ecobatímetro, também conhecido como echosounder, é um equipamento que emite um ou mais pulsos acústicos que chegam até o fundo do reservatório e retorna ao receptor do equipamento, com isso é feito a leitura de profundidade com base na velocidade do pulso e o tempo que levou para retornar ao receptor. Os monofeixes emitem apenas um pulso, enquanto os multifeixes emitem diversos. Muitos estudos mostram que usualmente utilizam-se de ecobatímetros monofeixes ou multifeixes embarcados em embarcações tripuladas, como apresentado por Erena et al. (2019), Minihoni et al. (2017) e Parnum et al. (2009). Entretanto o fato de o levantamento ser realizado com equipe embarcada acarreta em um potencial risco de acidentes durante a execução do levantamento, como riscos de quedas e afogamentos. Segundo Côrrea Filho et al. (2015), o levantamento batimétrico inclui as seguintes etapas: planejamento das seções batimétricas, levantamento de campo, processamento das informações coletadas no campo e a utilização de softwares na geração de mapas e na obtenção de curvas cota x área x volume.

A quantificação de volume através de software livre é abordada por Julian e Nunes (2020) que utilizam do software QGIS para cálculo de solo erodido e volume de erosões com dados extraídos por levantamento com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) bem como a aplicação do interpolador *Triangulated Irregular Network* (TIN) para preenchimento dos dados de cota superficial do terreno anterior a ocorrência dos processos erosivos.

Dessa forma, as opções de mercado de batimetria têm um custo mais elevado, geram riscos aos técnicos que executam o levantamento e grande parte das empresas e órgãos utilizam softwares pagos de processamento. Este estudo visa apresentar uma solução de estimativa de cálculo de volume reservatórios de água de forma prática e baixo custo, através do uso de software

livre. É esperado que o volume obtido por ferramenta em software livre tenha concordância com o volume real de um reservatório.

Portanto, esse trabalho visou confrontar os valores de volume obtidos por dois tipos de interpolações, TIN e IDW, através de software livre QGIS 3.4.12, a partir de dados batimétricos levantados com ecobatímetro monofeixe que foi desenvolvido no âmbito do Acordo de Cooperação n.º 44/2018, processo n.23104.017193/2018-11 entre a Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS e ARATER Consultoria e Projetos Ltda. A validação dos dados foi feita pela comparação do volume calculado pela interpolação de profundidades amostradas com ecobatímetro monofeixe e volume geométrico com dados medidos com uma régua em uma piscina semiolímpica.

Metodologia

Área de estudo

A área de estudo consiste em uma piscina semiolímpica, localizada dentro de um condomínio residencial, no Município de Campo Grande. A mesma foi escolhida para validação do modelo de estimativa de volume, visto que sua geometria é bem definida e é possível tirar uma relação entre área de lâmina d'água e profundidade.

Levantamento batimétrico

O trabalho de campo consistiu em um levantamento batimétrico em uma piscina semiolímpica de um condomínio fechado, cuja geometria de fundo é bem definida. O protótipo utilizado para os levantamentos foi desenvolvido pela ARATER Consultoria e Projetos com a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS, através de um termo de cooperação técnica, e consiste em uma estrutura flutuante de PVC (Figura 1) com dois motores, controladora Raspberry e Ecobatímetro monofeixe acoplado com GPS Glonass.

Figura 1. Protótipo de barco para levantamento batimétrico, desenvolvido por ARATER Consultoria e Projetos e UFMS.

O ecobatímetro acoplado ao barco autônomo foi programado de forma a sincronizar as informações de localização X e Y (obtidas por GPS) com as profundidades Z (ecobatímetro) pelo parâmetro hora (Figura 2).

Figura 2. Ecobatímetro modelo Garmin Intelliducer (Garmin Ltd.), adaptado para protótipo de barco autônomo.

Conforme apresentado acima, cada componente tem uma função específica no processo. O Arduino foi posteriormente substituído pelo Raspberry Pi 3 (Raspberry Pi Foundation), o qual consiste em um minicomputador de placa única com tamanho reduzido com a finalidade de processar os dados e fazer a comunicação entre o sensor e uma tela *touch* para visualização dos dados. O conversor de comunicação foi elaborado pela equipe de apoio para conversão dos dados do sensor Garmin, que utiliza o padrão de comunicação NMEA 2000 (National Marine Electronics Association). E o Garmin Intelliducer, como já mencionado é o ecobatímetro responsável pela emissão de pulsos sonoros e que pelo cálculo do tempo entre a emissão e recepção de cada pulso sonoro, fornece o valor de profundidade da água.

Aquisição de dados

Foram utilizados arquivos em planilha eletrônica dos valores de profundidade dos reservatórios, os quais foram obtidos através do levantamento batimétrico realizado no dia 29 de julho de 2019 na piscina semiolímpica de um condomínio de Campo Grande, MS.

As planilhas eletrônicas foram adequadas para inserção em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) através do programa QGIS v. 3.4.12 (QGIS Development Team, 2019), para posterior transformação em shapefile.

Processamento dos dados de campo

Dados batimétricos

Durante levantamento batimétrico na piscina semiolímpica de 311,25 m² de lâmina d'água, foram amostrados um total de 644 dados de profundidade, os quais foram armazenados em plataforma Micro SD em formato txt. Dessa forma, fez-se necessária a exportação dos dados para planilha csv, compatível com o QGIS (QGIS Development Team, 2019), através de planilha eletrônica, de forma a substituir o separador decimal de vírgula para ponto. Os dados obtidos em campo, com valores de profundidade (em metros) e coordenadas geográficas decimais, assim como a data do levantamento, estão dispostos na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1. Dados de batimetria obtidos durante levantamento batimétrico na piscina semiolímpica. Com destaque para o valor mais frequente, de 1,54m. Fonte: Os autores.

Data	Prof. (m)	Latitude	Longitude
29/07/2019	1,54	-20,405759	-54,567758
29/07/2019	1,54	-20,405759	-54,567754
29/07/2019	1,54	-20,405760	-54,567750
29/07/2019	1,54	-20,405761	-54,567746
29/07/2019	1,54	-20,405766	-54,567738
29/07/2019	1,54	-20,405767	-54,567734
29/07/2019	1,54	-20,405769	-54,567730
29/07/2019	1,54	-20,405815	-54,567731
29/07/2019	1,54	-20,405818	-54,567725
29/07/2019	1,57	-20,405822	-54,567721
29/07/2019	1,54	-20,405822	-54,567716
29/07/2019	1,57	-20,405823	-54,567710
29/07/2019	1,54	-20,405818	-54,567703
29/07/2019	1,54	-20,405818	-54,567698
29/07/2019	1,54	-20,405808	-54,567695
29/07/2019	1,54	-20,405808	-54,567692

Validação dos dados com régua

Para validação dos dados obtidos pelo ecobatímetro na piscina utilizou-se trena comum. Durante o levantamento com o sensor, selecionou-se pontos da borda da piscina (Figura 3), devido a facilidade de medição e considerou-se que seu comportamento por toda sua extensão seja semelhante, podendo haver desníveis desconsideráveis.

Figura 3. Medições com régua para validação na piscina. Fonte: Os autores.

Conforme ilustrado na Figura 3, pela trena foram verificados valores de profundidade como 1,51 m e 1,54 m, assim como no barco, conforme Tabela 1. Contudo, como o valor mais frequente foi de 1,54 m, o mesmo foi utilizado como moda da profundidade para verificação geométrica do volume.

Interpolação dos dados vetoriais para arquivo raster

Com o arquivo *shapefile* feito, para cada ponto XY (latitude e longitude), existe um valor Z (profundidade) correspondente dentro da tabela de atributos do arquivo, dessa forma para compreensão do reservatório foi necessário que os valores de profundidade fossem armazenados em arquivo raster de forma a permitir o cálculo de volume e obtenção das curvas batimétricas.

Como não é possível uma amostragem de 100% da piscina, visto que sempre haverá algum ponto não amostrado, foi necessário o preenchimento dos pontos vazios. Para o tal utilizou-se a ferramenta “interpolação”, presente na aba “raster” do QGIS, pela qual é selecionado o arquivo *shapefile* de entrada com dados de profundidade em formato número decimal, assim como a definição da metodologia de interpolação e tamanho do pixel.

A primeira interpolação testada é chamada de *Inverse Distance Weighting* – IDW ou Ponderação pelo Inverso da Distância, que segundo Li e Heap (2008) assume que objetos próximos possuirão maior semelhança de valores do que objetos distantes. Dessa forma, a previsão da elevação em um local é influenciada pelo inverso da distância da elevação de sua vizinhança. Enquanto a interpolação *Triangulated Irregular Network* – TIN ou Rede Triangular de Triângulos, segundo Lima (2016) consiste na conexão entre os pontos formando triângulos em que cada aresta é interpolada linearmente.

Andes (2017), testou diferentes modelos de interpolação de dados espaciais para levantamentos batimétricos, como TIN, IDW, ou *Ordinary Kriging* - OK e concluiu que os menores erros foram encontrados para as interpolações do tipo TIN e IDW, assim como uma adaptação do IDW, que não será discutida no presente trabalho. Dessa

forma, optou-se por testar os dois interpoladores IDW e TIN em ambiente QGIS 2.18.0, e verificar qual dos dois apresenta melhor resposta espacial.

Interpolação IDW

Para o processo de interpolação utilizou-se o arquivo shapefile extraído da tabela em formato csv com dados de profundidade, levantados em campo. Assim, pela ferramenta “interpolação”, foi selecionado o modelo de interpolação IDW e o tamanho do pixel de 1,0 m, como apresentado na Figura 4.

Interpolação TIN

Da mesma forma, pela ferramenta “interpolação”, foi selecionado o modelo de interpolação TIN e o tamanho do pixel de 1,0 m, como apresentado na Figura 5.

Figura 4. Entrada de dados para interpolação IDW no QGIS, onde foi escolhido o arquivo de dados, tamanho de cada pixel (1m x 1m) e a extensão da camada raster (a partir do entorno da piscina).

Figura 5. Entrada de dados para interpolação TIN, as configurações foram as mesmas da interpolação IDW.

Estimativa de volume do reservatório

Para a obtenção do volume, utilizou-se a ferramenta *r.volume* do complemento GRASS, dentro da plataforma QGIS 3.4.12, o qual permite o cálculo de volume de imagens raster. A metodologia consiste na soma da multiplicação dos valores de cada célula pela área do pixel respectivo, de forma a obter o volume total. Dessa forma, foram feitos processamentos para as duas interpolações acima mencionadas, IDW e TIN e consequentemente suas estimativas de volume. Para validação dos valores de batimetria, foi feito levantamento do volume da piscina, por sua geometria, ou seja, como sua base é retangular foi feita a medição de seu comprimento e largura com trena *in loco*.

Resultados

Interpolação IDW e TIN

Os comandos efetuados para realização das interpolações estão descritos nas Figura 4 e Figura 5. Como resultado foram obtidas duas imagens raster, com valores de elevação da piscina, conforme Figura 6.

É possível observar na Figura 6, que a interpolação IDW resultou em um raster mais

bem distribuído, com valores de altimetria mais coerentes e uniformes, além de permitir um recorte bem alocado dentro do perímetro da piscina (em vermelho nas figuras acima). Enquanto os valores por interpolação TIN se concentraram mais nas regiões onde haviam amostragens de pontos, enquanto os arredores não foram bem preenchidos (pixels com a coloração azul claro uniforme).

Dessa forma, visualmente a distribuição IDW teve um comportamento mais realista e coerente, visto que em levantamentos batimétricos dificilmente serão amostrados todos os pontos de um reservatório, e sim apenas algumas verticais, que a partir das mesmas serão plotados valores de profundidade com base nos pontos amostrados.

Estimativa de volume do reservatório

Verificou-se que os valores de volume para diferentes tipos de interpolação se encontram na mesma centena, entretanto com uma diferença de 49,35 m³, sendo o maior valor observado correspondente à interpolação IDW, enquanto o menor referente à TIN (Tabela 2).

Figura 6. Comparação entre interpolação IDW e TIN, na esquerda é possível observar que os pixels estão mais uniformes (IDW) do que os da direita (TIN). As colorações mais escuras são profundidades mais acentuadas e as mais claras mais rasas. Fonte: Os autores.

Tabela 2. Valores de volumetria estimada. Fonte: Os autores.

Interpolação	Tamanho Pixel	Volume (m³)
TIN	1,00	436,21
IDW	1,00	485,56

Os valores de comprimento, largura e profundidade da piscina aferidos in loco estão apresentados na Figura 7.

Figura 7. Desenho esquemático da geometria do reservatório de validação, onde o valor de profundidade aferido em régua foi de 1,54m, comprimento de 25m e largura de 12,45m, todas medidas internas.

Conforme desenho na Figura 7, com a relação entre área e profundidade, obteve-se um valor de volume através da equação a seguir:

$$V = Ab \times h$$

Onde o Ab corresponde à área da base e h a profundidade encontrada. Deste modo obteve-se um volume de água de 479,32 m³ a partir de validações geométricas. Quando comparado com os dois modelos de interpolação, a aproximação com o TIN e IDW foi de 43,11 m³ e 6,24 m³, respectivamente. Em suma, a aproximação mais adequada foi pela interpolação IDW, visto que esta apresentou desvio de 1,30% acima do valor calculado por geometria da piscina.

Discussões

Assim como apresentado por Parnum et al. (2009), os sonares ou ecobatímetros monofeixes podem ser utilizados em aferição de profundidades para mapeamento de fundo oceânico, visto que os

resultados obtidos por ele mostraram boa acurácia nos dados. É importante ressaltar que o equipamento utilizado neste estudo consiste em um monofeixe e que para resultados ainda mais precisos e acurados seria necessária a implantação de sonares multi-feixe o que acarreta em maiores custos de construção, instalação e manutenção, e que para os fins previstos neste projeto não são justificáveis. Minihoni et al. (2017) também utilizou ecobatímetro monofeixe para levantamento batimétrico de um reservatório a fim de obter a curva cota x área x volume deste, e obteve resultados favoráveis.

Andrade et al. (2020) utilizou como base comparativa de seu estudo de batimetria através de dados de RPA's e NDWI valores de profundidade obtidos por ecobatímetro monofeixe equipado com transdutor de dupla frequência e concluiu que sua metodologia proposta é válida para regiões rasas. Já Khomsin et al. (2021) em sua comparação entre monofeixe e multifeixe observaram diferença vertical de 0,018m entre os dois, sendo que o primeiro amostrou profundidades e volumetrias inferiores ao segundo, e com menor densidade de pontos, entretanto os resultados foram considerados satisfatórios a depender do objetivo do levantamento.

Do mesmo modo que Julian e Nunes (2020) utilizaram ferramentas disponíveis no QGIS, pelos resultados encontrados no presente estudo, pode-se verificar que a utilização de equipamentos monofeixe vinculada com uso de softwares livres como o QGIS são uma boa alternativa para obtenção de dados confiáveis e que não exigem a suscetibilidade do executor ao risco, como ocorre em batimetrias convencionais embarcadas.

Destaca-se que quanto maior a quantidade de pontos amostrados, maior será a acurácia dos dados levantados. Entretanto para fins de outorga de recursos hídricos ou estimativa da capacidade de acumulação do reservatório, lagoa, açude ou barragem a metodologia apresentada é recomendada.

Outrossim o uso de novas tecnologias, como a acoplagem de ecobatímetro em superfície sobrenadante, GPS e controladores computacionais é essencial para melhoria nos resultados, otimização de amostragens in loco e diminuição do risco dos operantes do levantamento. CHO et al (2020) por exemplo, faz uso da integração de veículos não tripulados sobrenadantes e submersos com obtenção de dados hidrológicos. Em conjunto

com o avanço de tecnologias de obtenção de dados de forma remota, também é necessária a evolução nas análises de erros e incertezas destes trabalhos, conforme feito por Ferreira et al. (2021) que avaliou um modelo teórico de incertezas para um sistema monofeixe embarcado em veículo autônomo.

Conclusões

A interpolação IDW foi a mais adequada para estimativa do reservatório (piscina) de estudo a partir de dados de batimetria. A partir dos resultados obtidos observou-se que é possível a utilização de metodologias mais baratas e com bons resultados como a utilização de barco autônomo com ecobatímetro monofeixe e processamento em software livre, especialmente a proposta neste estudo. A diferença entre o volume obtido pela interpolação dos dados no QGIS e o cálculo por valores geométricos foi de 1,30 %, que para fins de outorga de uso de recursos hídricos e avaliações preliminares de projetos podem ser considerados adequados.

Deste modo é possível utilizar desta metodologia para estimativas de volume de barragens de água, reservatórios, açudes e lagoas com utilização de software livre a partir de dados extraídos in loco com intuito de obtenção de outorga de uso de recursos hídricos ou para estudos hidráulicos com outras finalidades.

Como recomendação de complementação deste estudo sugere-se a comparação de dados em mais locais, como em barragens de água ou lagos, bem como a utilização de diferentes métodos de interpolação.

Agradecimentos

Em especial a toda equipe da ARATER Consultoria e Projetos LTDA e à Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul que deram todo o suporte financeiro e técnico para o desenvolvimento do protótipo e formação da equipe multidisciplinar.

Agradecem também o Instituto Federal de Mato Grosso do Sul que forneceu suporte técnico através do professor Éder de Souza Rodrigues e seus orientados.

Aos Programas de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (PPGTA) e em Recursos Naturais (PPGRN), ambos da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). Este estudo foi realizado com o apoio da Universidade

Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS/MEC - Brasil.

A pesquisa também foi apoiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade em pesquisa concedida a A. C. Paranhos Filho (Processo CNPq 305013/2018-1).

Agradecemos ainda à CAPES por nos fornecer acesso ao Portal de Periódicos. Por fim, gostaríamos também de agradecer à CAPES pela bolsa de doutorado concedida ao Dhonatan Diego Pessi (processo número 88887.494036/2020-00).

Referências

- Andes, L. C., Cox, A. L. 2017. Rectilinear Inverse Distance Weighting Methodology for Bathymetric Cross-Section Interpolation along the Mississippi River. University of California. San Diego. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001514>. Acesso em: 09 de novembro de 2019.
- Andrade, L. C. de., Ferreira, I. de O., Medeiros, N. das G., Fonseca, I. G. R. da., 2020. Viabilidade de uso de imagens de RPA's para extração da batimetria em reservatórios de água rasos. Editora Unesc. DOI <http://dx.doi.org/10.18616/geop06>. p. 165-175.
- Caballero, I., Stumpf, R. P., 2020. Towards Routine Mapping of Shallow Bathymetry in Environments with Variable Turbidity: Contribution of Sentinel-2A/B Satellites Mission. Remote Sensing. 1-5.
- Cho, H., Jeong, S.-K., Ji, D.-H., Tran, N.-H., Vu, M.T., Choi, H.-S. 2020. Study on Control System of Integrated Unmanned Surface Vehicle and Underwater Vehicle. Sensors 20, 2633. <https://doi.org/10.3390/s20092633>.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE – DNIT. Batimetria. 2015. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/hidroviarias/hidroviarias-interiores/manutencao-hidroviaria/batimetria>. Acesso em: 15 de novembro de 2019.
- Erena, M., Atenza, J. F., García-Galiano, S., Dominguez, J. A., Bernabé, J. M. 2019. Use of drones for the Topo-Bathymetric Monitoring of the Reservoirs of the Segura River Basin. MDPI. Water. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/11/3/445>>. Acesso em: 31 de outubro de 2020.
- Ferreira, I. et al. 2021. Avaliação da Incerteza de Dados Batimétricos Coletados por meio de Plataformas Autônomas não Tripuladas. Revista Brasileira de Cartografia 73, 88-105. 10.14393/rbcv73n1-53685.
- GARMIN LTD. Garmin Intelliducer. 2020.
- Garcia, E. A. C. 1998. POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS: ALGUMASIMPLICAÇÕES PARA A BACIA AMAZÔNICA. Cadernos de Ciência & Tecnologia, Brasília, 15, 2, 85-112. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct/article/view/8939>. Acesso em: 15 de novembro de 2019.
- Julian, C., Nunes, J. O. R. 2020. Uso de VANT e geoprocessamento para cálculo de solo erodido em voçoroca localizada no distrito de Amadeu Amaral, Marília/SP – Brasil. Revista Brasileira de Geomorfologia 21, 4, 1-11.
- Khomsin, D. G. et al. 2021. Comparative analysis of singlebeam and multibeam echosounder bathymetric data. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1052 012015, 1-11.
- Li, J., e Heap, A. D. A. 2008. Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists. Canberra, Geoscience Australia. 137 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/246546630_A_Review_of_Spatial_Interpolation_Methods_for_Environmental_Scientists. Acesso: 15 de novembro de 2019.
- Minhoni, R. T. D. A., Brito, G. M., de Azevedo, R. F. 2017. Uso de ecobatímetro monofeixe na determinação da curva cota x área x volume do reservatório da PCH Pipoca – Minas Gerais – Brasil. Revista Irriga. Botucatu. São Paulo. Disponível em: <<http://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/2111>>. Acesso em: 31 de outubro de 2020.
- Mateo-Perez, V., Correal-Bobadilla, M., Ortega-Fernández, F., Vergara-González, E. P. 2020. Port Bathymetry Mapping Using Support Vector Machine Technique and Sentinel-2 Satellite Imagery. Remote sensing, 1-5.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Resenha Energética Brasileira do exercício de 2018. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732840/Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasil+edi%C3%A7%C3%A3o+2019+v2.pdf/66a83>

- [7a8-4164-4b37-be4a-59a5ad270c50?version=1.0](#). Acesso em: 15 de novembro de 2019.
- National Marine Electronics Association – NMEA. NMEA 2000.
- Parnum, I., Siwasbessy, J., Gravrilov, A., Parsons, M. 2009. A comparison of single beam and multibeam sonar systems in seafloor habitat mapping. 3rd Internacional Conference and Exhibition on “Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results”. Australia. 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/236859060_A_comparison_of_single_beam_and_multibeam_sonar_systems_in_seafloor_habitat_mapping>. Acesso em 31 de outubro de 2020.
- PLANALTO. Lei nº 2.433 de 08 de janeiro de 1997 – Política Nacional dos Recursos Hídricos. Brasília. 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Acesso em: 15 de novembro de 2019.
- QGIS *Development Team*. QGIS versão 2.18.3 Essen, 2015. Disponível em: <https://www.qgis.org/en/site/forusers/download.html>. Acesso em: Novembro de 2019.