

Capítulo 6

Viabilidade do Uso de Imagens de RPA'S para Extração da Batimetria em Reservatórios de Água Rasos

DOI: <http://dx.doi.org/10.18616/geop06>

Laura Coelho de Andrade

Ítalo de Oliveira Ferreira

Nilcilene das Graças Medeiros

Iann Gomes Rodrigues da Fonseca

VOLTAR AO SUMÁRIO

INTRODUÇÃO

A água é responsável por economias regionais e nacionais que dependem da disponibilidade adequada desse recurso para a geração de energia, a irrigação, o abastecimento público e a produção de alimentos (TUNDISI, 2008).

Bhatia e Bhatia (2006) afirmam que uma das formas mais relevantes de desenvolvimento social e econômico é por meio de uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos. Dentro desse contexto, é necessário o conhecimento do relevo submerso, assim como de informações específicas do reservatório a ser estudado, como a profundidade, a área e o volume.

O levantamento batimétrico é uma técnica antiga que fornece as profundidades dos corpos aquáticos. Atualmente, esse procedimento é utilizado empregando ecobatímetros monofeixe ou multifeixe para a coleta da profundidade e sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite System*) para o posicionamento planimétrico (FERREIRA; RODRIGUES; SANTOS, 2015). Todavia, segundo a *International Hydrographic Organization – IHO* (2005), tradicionalmente, a embarcação era posicionada utilizando-se relações geométricas simples por meio de proporções tomadas a partir de um ponto de apoio em terra, e a batimetria era realizada de forma direta por varas de sondar e fios de prumo.

Em seguimento ao crescente progresso da tecnologia, surgiram, nos últimos anos, sistemas de sondagem autônomos e não tripulados, como USV (*Unmanned Surface Vehicle*), ASC (*Autonomous Surface Craft*) e ASV (*Autonomous Surface Vehicle*), os quais são úteis tanto para barragens de rejeitos e reservatórios como para áreas com baixa profundidade ou locais que oferecem perigo para a navegação superficial (ZHAO; YAN; JIN, 2011; GIORDANO *et al.*, 2015; FERREIRA; NETO; MONTEIRO, 2016).

Por meio do avanço tecnológico também é possível estimar a batimetria através do sensoriamento remoto, com a utilização dos sensores orbitais. Essa estimativa é concebida por meio da aplicação de índices como

o Índice de Diferença Normalizada da Água (*Normalized Difference Water Index – NDWI*), o qual faz uso do sinal refletido nas regiões do infravermelho próximo e do verde visível para destacar a presença de tais feições ao mesmo tempo que subtrai a influência do solo e da vegetação (MCFEETERS, 1996; XU, 2007).

Tal como verificado nos produtos advindos de levantamentos batimétricos, a resultante da batimetria estimada por resposta espectral é uma malha de pontos que não representa o relevo de forma fidedigna e que utiliza a geoestatística para estimar valores não amostrados.

A ponderação nos métodos geoestatísticos (sobretudo a krigagem) é atribuída a amostras distintas, nas quais os pesos são definidos por meio de uma análise espacial, provendo estimativas com variância mínima e sem viés (VIEIRA, 2000).

Hiran, Assine e Silva (2008) utilizaram o sensor ASTER para a estimativa da batimetria em um trecho no rio Paraguai e alcançaram resultados promissores na ordem de 0,36m para o desvio padrão da amostra após a utilização da geoestatística. Ferreira, Neto e Monteiro (2016) utilizaram uma imagem do satélite RapidEYE com cinco metros de resolução espacial e conseguiram também obter resultados satisfatórios na ordem de 0,769 para o RMS (*Root Mean Square*).

Com o surgimento de sensores aéreos RPA's (*Remotely Pilot Aircrafts*), estudos relacionados com essa área também podem ser realizados, sobretudo, no âmbito de levantamentos hidrográficos. Assim, espera-se que com a aquisição de imagens com melhores resoluções espaciais em relação aos sensores orbitais resultados promissores possam ser obtidos, inclusive a custos relativamente menores. Aliado a essa plataforma, o uso de câmeras infravermelho para a aquisição de imagens sobre a superfície abre um leque de possibilidades em termos de análise do comportamento espectral dos alvos, bem como na geração de índices, que na maioria dos casos envolve esse intervalo espectral.

Com o uso de imagens obtidas por RPA's é possível estabelecer uma correlação entre a resposta espectral e a profundidade por meio de uma equação logarítmica, a qual produz cartas batimétricas com base em valores espectrais representativos de áreas submersas da imagem. No entanto, fatores como sedimentos em suspensão, turbidez da água, características do fundo, sombra de vegetação, profundidade, entre outros, alteram a resposta espectral dos corpos d'água e podem influenciar nos resultados.

No presente estudo, foi utilizada uma metodologia alternativa para o alcance de profundidades, com o intuito de suprir a dificuldade nos levantamentos batimétricos em regiões mais rasas. Essa metodologia é baseada na integração de imagens de RPA's e de dados batimétricos obtidos com ecobatímetro de feixe único e posicionamento da embarcação com o GPS Diferencial (DGPS).

Área de Estudo

A área de estudo escolhida foi um dos principais reservatórios situado na Universidade Federal de Viçosa (UFV), no município de Viçosa, zona da mata de Minas Gerais. Tal reservatório está compreendido entre as latitudes $20^{\circ}45'25''$ e $20^{\circ}45'40''$ Sul e longitudes $42^{\circ}52'15''$ e $42^{\circ}52'30''$ Oeste, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Localização da área de estudo

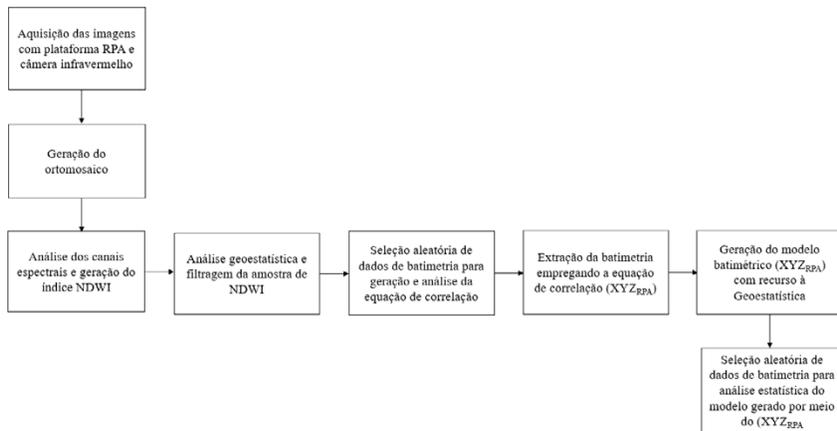


Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

Salienta-se que a área de estudo possui uma profundidade máxima aproximada de 3,5 metros e plantas aquáticas bem distribuídas por toda a área. O voo cobriu todo o local de estudo e durou em torno de seis minutos, a uma altura de 60 metros, para obter a sobreposição adequada. Foram efetuados disparos em um intervalo de dois segundos, cujo tamanho do *pixel* encontrado foi de 2,7cm.

A metodologia pode ser melhor descrita por meio do fluxograma apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

No presente trabalho, foram utilizadas imagens aéreas obtidas por um drone multirrotor com uso de uma câmara infravermelho Mapir – Survey 3. O primeiro passo foi executar o processamento das imagens, depois, possibilitar a geração do ortomosaico no *software* Agisoft (AGISOFT, 2014).

Posteriormente, sabendo-se que a correção geométrica se trata da extração de erros sistemáticos resultantes da distorção presente na imagem, foram utilizados sete pontos de controle situados em torno da área de estudo, coletados através do sistema GNSS Trimble R10, permitindo, assim,

a equivalência entre as coordenadas da imagem referentes aos *pixels* e as coordenadas de um sistema de projeção cartográfica (MENESES; ALMEIDA, 2012). Empregou-se o sistema geodésico SIRGAS2000 e a projeção cartográfica UTM, zona 23s, referenciada em tal sistema.

O sensor utilizado no estudo possui três canais espectrais, sendo eles o verde, o vermelho e o infravermelho próximo (NIR), a partir do intervalo espectral de 520nm a 850nm. Dessa forma, para uma análise adequada do ortomosaico gerado, foi necessária uma verificação a fim de que se efetuasse a correta correlação dessas bandas para uma análise do comportamento espectral dos alvos no *software* ArcGis 10.1 (ESRI, 2012).

A determinação da batimetria por meio do uso de RPA's se fundamenta principalmente na lei de Beer's, a qual menciona que, devido ao espalhamento e à absorção, a luz que penetra na coluna d'água é atenuada pela profundidade (GAO, 2009). Muitos autores como Lyzenga (1978), Benny e Dawson (1983) e Philpot (1989) já usavam essa técnica décadas atrás para o cálculo da batimetria através do sensoriamento remoto orbital.

Um dos índices mais utilizado para a estimação da batimetria é o NDWI (*Normalized Difference Water Index*), proposto inicialmente por McFeeters (1996) com o intuito de delinear locais de águas abertas, permitindo realçar o contraste entre a cobertura vegetal e a água (mediante a utilização infravermelho próximo), além de maximizar a reflectância da água (através do comprimento de onda verde) de tal forma que possibilite a determinação do limiar entre a água e a vegetação terrestre (MCFEETERS, 1996). A geração do índice NDWI é derivada por meio da seguinte equação:

$$NDWI = \frac{\rho(G) - \rho(NIR)}{\rho(G) + \rho(NIR)} \quad (1)$$

Sendo $\rho(G)$ o intervalo espectral correspondente à luz verde do espectro visível (520-590 nm) e $\rho(NIR)$ o intervalo espectral correspondente à região do infravermelho próximo (760- 850 nm).

Para uma melhor conformação dos dados gerados pelo índice NDWI, foi realizada uma análise geoestatística com o recurso da krigagem simples no *software* ArcGis 10.1 (2012), uma vez que essa técnica fornece valores com variância mínima e sem viés (FERREIRA; RODRIGUES; SANTOS, 2013). Além disso, de acordo com Landin (2006), para a verificação de uma possível correlação espacial dos *pixels*, é necessária uma correta modelagem do semivariograma experimental (o qual descreve a variação espacial na Geoestatística). Goovaerst (1997) mostrou que o ajuste correto dessa ferramenta por meio dos dados de imagens orbitais possibilita o dimensionamento dos valores existentes ao comportamento regional a partir da interpolação de valores não amostrados. Por conseguinte, considerou-se viável aplicar esse procedimento nos dados obtidos pelo sensor presente no RPA, uma vez que os elementos que não apresentaram correlação espacial direta com o leito do reservatório foram reduzidos, como, por exemplo, a vegetação e os sedimentos em suspensão.

O levantamento batimétrico seguiu as orientações propostas pela IHO (2008), utilizando-se de um ecobatímetro monofeixe equipado com um transdutor de dupla frequência (33/210 kHz), sendo utilizada somente a frequência alta neste estudo, uma vez que ela não penetra nos sedimentos não consolidados (NETO, 2000). Para a obtenção das coordenadas geodésicas, foi utilizado um par de receptores RTK (*Real Time Kinematic*). Após a coleta, o processamento dos dados foi executado segundo Ferreira, Rodrigues e Santos (2015) através do *software* Hypack 2012.

Posteriormente, foi efetuada uma seleção aleatória de 360 pontos dos dados batimétricos para a geração da equação de correlação entre a batimetria gerada por procedimento convencional e os valores obtidos com o índice NDWI (XYZRPA). Assim, utilizando o *software* Excel, foi estimada a batimetria da lagoa em questão por meio da equação de correlação encontrada.

Tendo em vista a criação do MDP (Modelo Digital de Profundidade), foi empregada novamente a ferramenta da Geoestatística para interpolação pelo método da krigagem, por meio do qual foi escolhido o modelo simples para a modelagem do semivariograma, a validação do modelo, a interpo-

lação dos dados e a predição da incerteza, uma vez que nesse modelo de krigagem assume-se que a função média do processo é conhecida (CARMO; RODRIGUES; SANTOS, 2015).

Para a avaliação da qualidade da batimetria estimada, foram selecionados de forma aleatória pontos da amostra, a qual foi obtida pelo levantamento com ecobatímetro para uma análise estatística do modelo gerado, aplicando-se a técnica da Incerteza Robusta (Φ_{Robst}) proposta por Ferreira *et al.* (2019). Tal método é resistente a *outliers* e independente da distribuição de probabilidades da amostra, uma vez que se adere como estimador a mediana (Q2) para o efeito sistemático. Para contabilizar o efeito aleatório, utilizou-se o NMAD (*Normalized Median Absolute Deviation*), que significa Desvio Absoluto da Mediana Normalizado (MOOD; GRAYBILL; BOES, 1974; HÖHLE; HÖHLE, 2009), descrito na equação 2 abaixo.

$$\Phi_{\text{Robst}} = \sqrt{(Q2)^2 + (\text{NMAD})^2} \quad (2)$$

Sendo Q2 o valor da mediana e o NMAD correspondente a $1,4826 \cdot \text{mediana}\{|x_i - Q2|\}$, em que x_i corresponde a discrepância \hat{I} .

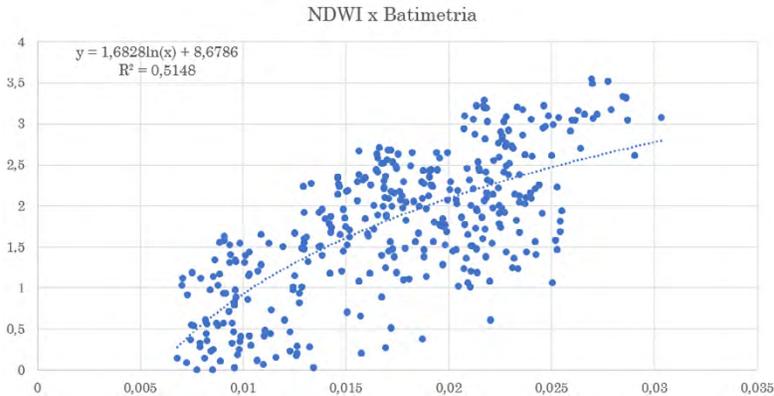
Para o cálculo do volume útil de um reservatório, é necessário o conhecimento do volume compreendido entre os níveis d'água mínimo operacional e máximo operacional, considerando as perdas por evaporação e por infiltração no solo (LOPES; SANTOS, 2002).

Neste estudo, a estimativa do volume foi estabelecida através da utilização dos dados XYZ_{RPA} , possibilitando, dessa maneira, uma comparação do volume estimado com o volume obtido pela batimetria por método convencional.

A partir dos valores digitais interpolados e correlacionados com a batimetria do reservatório, foi possível extrair a equação de correlação necessária para a estimativa da batimetria com o índice NDWI. A Figura 3

mostra o modelo de regressão encontrado, assim como a melhor equação de ajuste ao modelo e o coeficiente de determinação (R^2), o qual demonstra que 51% da variação podem ser explicados pelo modelo proposto.

Figura 3 - Comportamento dos valores digitais do NDWI em relação à variação de profundidade



Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

Os dados de profundidade foram obtidos utilizando-se a equação 3, que para cada pixel alcançou um valor de profundidade, o qual foi relacionado à sua coordenada planimétrica, fornecendo um arquivo XYZ_{RPA}.

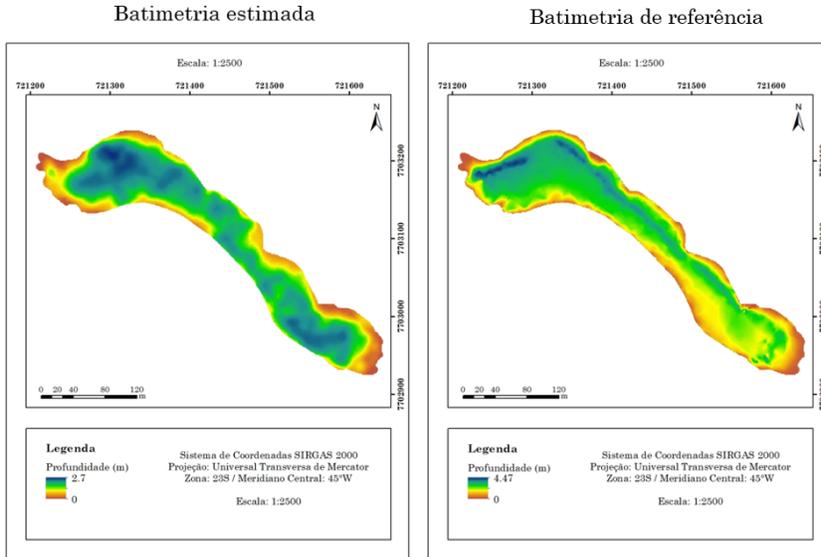
$$Z = 1,6828 \ln \left(\frac{DN(g) - DN(nir)}{DN(g) + DN(nir)} \right) + 8,6786 \quad (3)$$

Sabendo-se que Z representa a profundidade extraída da imagem, estabeleceu-se DN (g), valor do *pixel* referente à luz verde, e DN (nir), valor do pixel do infravermelho próximo.

Seguindo a metodologia proposta, efetuou-se a modelagem geoestatística com base na krigagem simples (SANTOS, 2010), obtendo-se o Modelo Digital de Profundidade (MDP) com melhores estimativas para esse conjunto de dados. Vale ressaltar que para se obter uma ótima interpolação

é necessário, *a priori*, uma modelagem adequada do semivariograma. A seguir, apresenta-se o modelo digital de profundidade obtido pela batimetria estimada e pela batimetria de referência (Figura 4).

Figura 4 - Comparação entre Modelos Digitais de Profundidade



Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

Para a análise do modelo gerado, foi utilizado o estimador da Incerteza Robusta, com o objetivo de avaliar a qualidade da estimação da batimetria, processando-se 75 pontos adquiridos de forma aleatória. Em um primeiro momento, foi efetuada uma análise exploratória das discrepâncias encontradas, apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise exploratória das discrepâncias entre a batimetria estimada e a de referência

Análise Exploratória	
Média (m)	0,597
Erro padrão (m)	0,057
Mediana (m)	0,437
Desvio padrão (m)	0,494
Variância da amostra (m)	0,244
Coefficiente de Curtose(m)	-0,694
Coefficiente de Assimetria(m)	0,622
Mínimo(m)	0,014
Máximo(m)	1,833

Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

O coeficiente de assimetria mensura o desvio da distribuição das discrepâncias em relação a uma distribuição simétrica; já o de curtose avalia o grau de achatamento da distribuição, o que indica, respectivamente, uma distribuição basicamente assimétrica e platicúrtica.

Assim, por conseguinte, foram obtidos os seguintes valores mostrados na Tabela 2 para os parâmetros Q2, NMAD e Φ_{Robst} .

Tabela 2 - Valores dos parâmetros para o cálculo da Incerteza Robusta

Q2 (m)	NMAD (m)	Φ_{Robst} (m)
0,436	0,648	0,815

Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

Baseando-se na análise descritiva dos dados e no teste *Shapiro-Wilk*, considera-se presumível dizer que os dados em questão seguem uma distribuição normal, assim a Q2 e o NMAD são equivalentes, respectivamente, à média e ao desvio padrão, e, conseqüentemente, a Incerteza Robusta também é equivalente ao RMSE isento de *outliers*. Posto isso, pode-se afirmar que os dados obtidos por RPA (XYZ_{RPA}) possuem uma incerteza vertical

de 80cm, que pode ser explicada pela elevada quantidade de sedimentos e plantas aquáticas presentes no local, indicando, conseqüentemente, que o nível de poluição está fora dos limites desejados.

Outro agravante é o fato de a área de estudo possuir vegetação densa próxima às margens, implicando na geração de sombras sobre a região mapeada e, por conseguinte, na implementação de *pixels* incompatíveis com os valores reais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O levantamento batimétrico convencional compõe-se da técnica mais precisa e de grande abrangência para a caracterização detalhada do relevo submerso. Projetos que demandam um elevado grau de exatidão, com dados mais detalhados, devem ser realizados com grande controle de campo, usando essa metodologia descrita.

A utilização de RPA's se apresenta como um procedimento de baixo custo e com um menor tempo de execução para a determinação da batimetria. Todavia, essa ferramenta deve ser realizada com cautela, uma vez que ainda se necessita de mais testes em diferentes áreas ou em reservatórios com outras características a fim de validar sua aplicabilidade. O teste com outros modelos de sensores também possibilitará um melhor ajuste ao procedimento citado.

Assim, conclui-se que a metodologia é válida para regiões rasas, sobretudo para estudos preliminares e de cunho ambiental em locais que não possuem um elevado índice de deposição de sedimentos ou de plantas aquáticas.

REFERÊNCIAS

AGISOFT, L. L. C. **Agisoft Photoscan Pro**. [S.l.:s.n.], 2014.

BENNY, A. H; DAWSON, G. J. Satellite imagery as an aid to bathymetric charting in the Red Sea. **The Cartographic Journal**, [S.l.], v. 20, n. 1, p. 5-16, 1983.

BHATIA, R.; BATHIA, M. Water and poverty alleviation: the role of investments and policy interventions. In: ROGERS, P. P.; LLAMAS, M. R.; CORTINA, L. M. (eds.). **Water crisis: myth or reality?** London: Fundación Marcelino Botín, Taylor & Francis, 2006, p. 197-220.

CARMO, E. J.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, G. R. dos. Avaliação dos interpoladores Krigagem e Topo to Raster para geração de modelos digitais de elevação a partir de um "as built". **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 21, n. 4, p. 674-690, 2015.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI. **ArcGIS Desktop: Release 10.1**. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2012.

FERREIRA, I. O.; EMILIANO, P. C.; SANTOS, A. de P. dos; MEDEIROS, N. das G.; OLIVEIRA, J. C. de. Proposição de um Estimador Pontual para Incerteza Vertical de Levantamentos Hidrográficos. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 1, p. 1-30, 29 mar. 2019.

FERREIRA, I. O.; NETO, A. A.; MONTEIRO, C. S. O uso de embarcações não tripuladas em levantamentos batimétricos. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 68, n. 10, p. 1885-1903, 2016.

FERREIRA, I. O.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, G. R. **Coleta, processamento e análise de dados batimétricos**. Vol. 1. 1. ed. Saarbrucken: Novas Edições Acadêmicas, 2015. 100 p.

FERREIRA, I. O.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, G. R. Estudo Sobre a Utilização Adequada da Krigagem na Representação Computacional de Superfícies Batimétricas. **Revista Brasileira de Cartografia [On-line]**, Rio de Janeiro, n. 65/5, p. 831-842, set./out. 2013.

GAO, J. Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. **Progress in Physical Geography**, [S.l.], v. 33, n. 1, p. 103-116, 2009.

GIORDANO, F.; MATTEI, G.; PARENTE, C.; PELUSO, F.; SANTAMARIA, R. Integrating Sensors into a Marine Drone for Bathymetric 3D Surveys in Shallow Waters. **Sensors**, [S.l.], v. 16, n. 1, p. 41, 2015.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for Natural Resources Evaluation**. New York, Oxford: Oxford University Press, 1997. 496 p.

HIRAN, Z. A. N. I.; ASSINE, M. L.; SILVA, A. Batimetria fluvial estimada com dados orbitais: estudo de caso no Alto Curso do rio Paraguai com o sensor ASTER. **Geociências**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 555-565, 2008.

HÖHLE, J.; HÖHLE, M. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.l.], v. 64, n. 4, p. 398-406, 2009.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION - IHO. **Manual on Hydrography**. Mônaco: International Hydrographic Bureau, 2005. 540 p.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION - IHO. **S-44: IHO Standards for Hydrographic Surveys**. Special Publication n. 44. 5. ed. Mônaco: International Hydrographic Bureau, 2008. 36 p.

LANDIN, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e Didática**, Campinas, SP, v. 2, p. 19-33, 2006.

LOPES, J. E. G.; SANTOS, R. C. P. **Capacidade de reservatórios**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002. 64 p.

LYZENGA, D. R. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. **Applied Optics**, [S.l.], v. 17, n. 3, p. 379-383, 1978.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, [S.l.], v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

MENESES, P.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Vol. 1. 1. ed. Brasília: UnB/CNPq, 2012. 266 p.

MOOD, A. M.; GRAYBILL, F. A.; BOES, D. C. **Introduction to the Theory of Statistics**. London: McGraw-Hill International, 1974. 577 p.

NETO, A. A. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. **Brazilian Journal of Geophysics**, [S.l.], v. 18, n. 3, p. 241-256, 2000.

PHILPOT, W. D. Bathymetric mapping with passive multispectral imagery. **Applied Optics**, [S.l.], v. 28, n. 8, p. 1569-1578, 1989.

SANTOS, G. R. **Hierarquização geométrica dos preditores geoestatísticos**. 2010. 200 f. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2010.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, [S.l.], v. 22, n. 63, p. 7-16, 2008.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. *In*: NOVAES, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; SCHAEFER, C. E G. R. **Tópicos em ciências do solo**. Vol. 1. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, p. 2-54.

XU, H. Extraction of Urban Built-up Land Features from Landsat Imagery Using a Thematicoriented Index Combination Technique. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, [S.l.], v. 73, n. 12, p. 1381-1391, 2007.

ZHAO, J.; YAN, W.; JIN, X. Brief review of autonomous surface crafts. **ICIC Express Letters**, [S.l.], v. 5, n. 12, p. 4381-4386, 2011.