

Revista Brasileira de Cartografia (2016), N° 68/7: 1331-1340
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

VIABILIDADE DO USO DE IMAGENS DO SISTEMA RAPIDEYE NA DETERMINAÇÃO DA BATIMETRIA DE ÁGUAS RASAS

Feasibility of Using RapidEye System Images in Determining Shallow Water Bathymetry

**Ítalo Oliveira Ferreira, Juliette Zanetti, Jéssica Sathler Gripp
& Nilcilene das Graças Medeiros**

**Universidade Federal de Viçosa - UFV
Departamento de Engenharia Civil**

Av. Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário - Cep: 36570-000 - Viçosa-MG
{italo.ferreira, juliette.zanetti, jessica.gripp, nilcilene.medeiros}@ufv.br

*Recebido em 12 de Janeiro, 2016/ Aceito em 23 de Julho, 2016
Received on January 12, 2016/ Accepted on July 23, 2016*

RESUMO

O conhecimento da profundidade de um corpo d'água é de extrema importância para o estudo e gestão dos recursos hídricos. No entanto, levantamentos batimétricos, com o uso de ecobatímetros, apesar de fornecerem elevada precisão, são demorados e de alto custo. Por outro lado, imagens orbitais podem oferecer mapas batimétricos a baixo custo cobrindo grandes áreas, inclusive de difícil acesso. O presente trabalho teve como principal objetivo verificar a aplicabilidade de imagens RapidEye como alternativa para extração da batimetria de águas opticamente rasas. Para tal foi utilizado o Índice NDWI em uma imagem do município de Viçosa-MG, contendo lagoas utilizadas como área de estudo, onde foi feita a comparação com um levantamento batimétrico tradicional. Os resultados obtidos mostraram que a metodologia proposta, de custo relativamente baixo e reduzido tempo de execução, pode ser empregada para a elaboração preliminar de projetos na área de gestão de recursos hídricos. Porém, deve-se ressaltar que o NDWI ainda requer testes a serem realizados em locais com diferentes características da água.

Palavras chaves: Sensoriamento Remoto, Batimetria, NDWI, RapidEye.

ABSTRACT

Knowing the depth of a body of water is extremely important for the study and management of water resources. However, bathymetric surveys, using echo sounders, despite providing high precision, are time consuming and costly. Moreover, satellite images can provide low cost bathymetric maps covering large areas, including areas that are difficult to access. This study aimed to verify the applicability of RapidEye images as an alternative to extraction of shallow water bathymetry. For this we used the NDWI index in an image of Viçosa-MG, containing ponds used as a study area, where the comparison with a traditional bathymetric survey was made. The results showed that a study like this is a powerful tool for preliminary design of projects in the water management area, however, the NDWI still requires tests to be performed in places with different water features.

Keywords: Remote Sensing, Bathymetry, NDWI, RapidEye.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui em termos gerais uma grande oferta hídrica, apresentando 12% da água doce disponível no globo, sendo que há um aumento de 6% quando se considera apenas as águas superficiais. Elas são utilizadas para diversos fins, como geração de energia, transporte, aquicultura, turismo, esportes, entre outros (CANDELA, 2013). Para uma melhor gestão dos recursos hídricos é indispensável realizar desenvolvimento de alternativas que visem à modelagem do relevo submerso, possibilitando estimar o grau de assoreamento, calcular volumes de armazenamento e atualizar as curvas de capacidade (FERREIRA *et al.*, 2012).

As profundidades dos corpos aquáticos são obtidas através dos levantamentos batimétricos. Segundo IHO (2005) a batimetria era historicamente realizada utilizando-se varas de sondar e fios de prumo para a medição direta da profundidade, enquanto que a embarcação era posicionada através de medidas tomadas a partir de um ponto de apoio em terra, utilizando-se relações geométricas simples. Atualmente, os levantamentos batimétricos são realizados empregando-se sistemas diferenciais de posicionamento GNSS (Global Navigation Satellite System) para o posicionamento planimétrico e ecobatímetros monofeixe ou multifeixe para a coleta das profundidades (FERREIRA, *et al.*, 2015). O uso de ecobatímetros em substituição às varas de sondar e fios de prumo, possibilitou uma melhora quanto a precisão dos dados, no entanto, apesar dos crescentes avanços tecnológicos, a coleta ainda é dispendiosa e em alguns casos muito demorada.

À primeira vista o levantamento batimétrico pode parecer semelhante ao levantamento topográfico, porém, essa semelhança se limita a representação por linhas de igual cota e ao tratamento computacional das superfícies. Os procedimentos seguidos no planejamento, coleta e análise dos dados são diferentes dos usados na topografia terrestre. No levantamento batimétrico, a superfície a ser mapeada é dividida em uma malha de linhas equidistantes que são percorridas pela plataforma de sondagem

permitindo a coleta de dados de profundidade e posição. Pode-se perceber que a metodologia é demorada e de alto custo. Além disso, quando se opera com ecobatímetros monofeixe o procedimento torna-se menos eficiente (FERREIRA, *et al.*, 2015).

Através do sensoriamento remoto é possível obter informações de um determinado elemento terrestre através de análises dos dados adquiridos por um sensor sem contato físico com o mesmo (ROTUNNO FILHO; ZEILHOFER, 2003). Assim, informações sobre a cobertura da terra, pedologia, rede de drenagem, fatores topográficos, entre outros, podem ser obtidas com rapidez, precisão e relativo baixo custo, com uso de imagens orbitais. Além disso, devido a periodicidade com que são obtidas, processos de atualização e monitoramento podem ser realizados de forma permanente.

Neste sentido, diversos autores propuseram o uso do sensoriamento remoto, geralmente através de índices, para a obtenção estimada de profundidade, especificamente para águas rasas.

Krug e Noernberg (2007) avaliaram o potencial da geração de mapas batimétricos de águas rasas com o uso de imagens do sensor ETM+ do sistema Landsat através do Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI, do Inglês: Normalized Difference Water Index), obtendo-se resultados otimistas. GAO (2009) apresentou um resumo dos métodos, precisões e limitações da extração de batimetria por sensoriamento remoto baseado nas bandas do infravermelho próximo e do infravermelho médio do sensor TM do sistema Landsat, concluindo que o método passivo, com o uso de imagens orbitais, é mais flexível, podendo mapear uma enorme área muito rapidamente, mas sendo limitado a águas rasas. Cheng *et al.* (2015) propôs uma nova abordagem para extração de batimetria também utilizando imagens do sensor TM do sistema Landsat, aliada a dados esparsos coletados por um ecobatímetro. Gautam *et al.* (2015) realizaram um estudo para quantificar o impacto da urbanização sobre as águas superficiais de Bangalore na Índia, calculando diversos índices de banda para extração de água, incluindo o NDWI com imagens do sensor ETM+ do sistema Landsat.

De acordo com Li (2013), o NDWI tem sido aplicado com sucesso para o mapeamento de corpos d'água, e pode ser calculado a partir de algumas combinações de bandas, como verde (G), infravermelho próximo (NIR), ou ondas curtas do infravermelho (SWIR).

As bandas utilizadas neste trabalho para o estabelecimento do NDWI foram as bandas da luz Verde e da região do Infravermelho Próximo. A seleção destes comprimentos de onda visa maximizar a refletância de corpos d'água com comprimento de onda da luz verde, bem como, minimizar a baixa reflexão dos corpos d'água na banda NIR, e aproveitar a alta reflexão da região NIR em relação as características terrestres da vegetação e do solo (MCFEETERS, 1996; XU, 2007).

Deve-se ressaltar que, em relação aos estudos supracitados, a base de dados utilizada foram imagens do sistema Landsat. Neste estudo buscou-se como alternativa utilizar imagens do sensor REIS do satélite RapidEye, visando analisar a influência do uso de uma fonte de dados com melhor resolução espacial.

Assim, com o objetivo de avaliar o uso do sensoriamento remoto para a obtenção da profundidade de águas rasas, esse estudo utiliza imagens do satélite RapidEye para extração da batimetria de uma das lagoas da Universidade Federal de Viçosa através do Índice NDWI, comparando os resultados obtidos com uma batimetria realizada por sondagem tradicional.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os dados que serviram de base para este estudo foram coletados em dezembro de 2010, através de um levantamento batimétrico realizado em um dos principais represamentos do Ribeirão São Bartolomeu, no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), no município de Viçosa na zona da mata mineira (Figura 1), as lagoas são apresentadas na a Figura 2 e na Figura 3 a composição colorida da imagem RapidEye.

3. METODOLOGIA

A fim de facilitar a compreensão da metodologia empregada, um fluxograma das atividades realizadas é apresentado na Figura 4.



Fig. 1- Localização da área de estudo. Sistema de Projeção UTM - Fuso 23s / datum SIRGAS 2000.

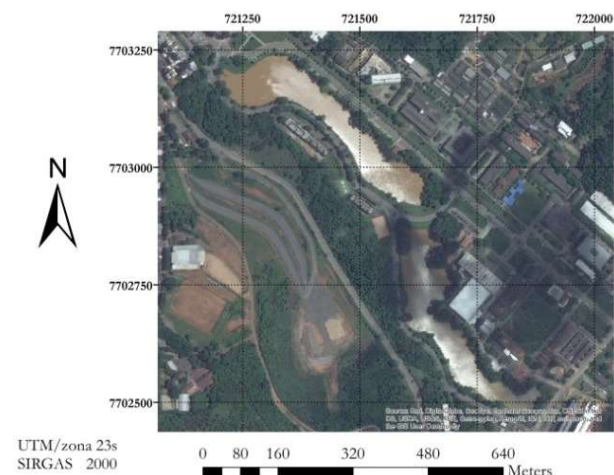


Fig. 2 - Localização das Lagoas. Fonte: ESRI (2014).

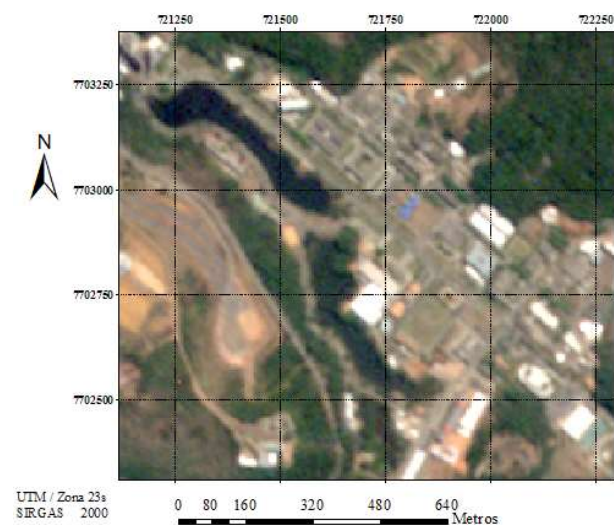


Fig. 3 – Composição colorida da imagem RapidEye da área de estudo.

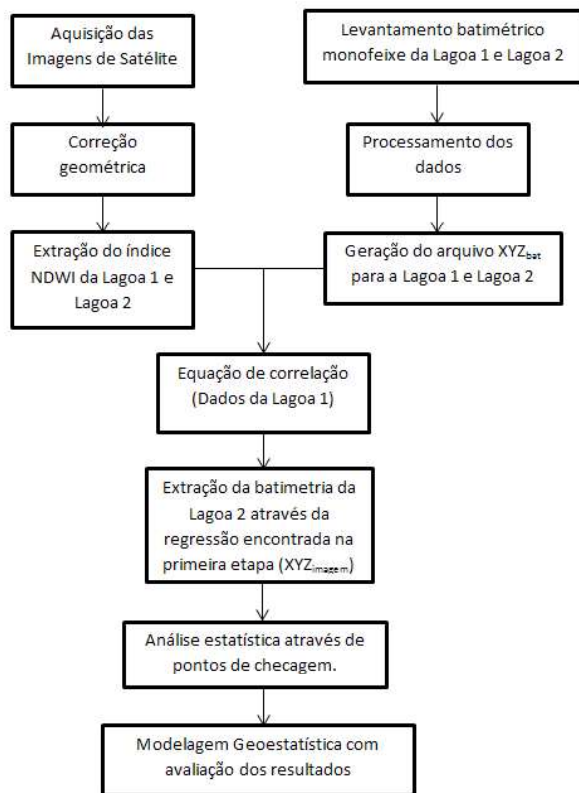


Fig. 4 - Fluxograma com atividades da metodologia proposta.

No presente estudo foi utilizada uma imagem do sensor REIS do satélite RapidEye, com resolução espacial de 5 m, referente ao dia 03 de setembro de 2011 onde, em um primeiro instante, foi realizada a correção geométrica dessa imagem. Salienta-se que a diferença de datas entre as sondagens batimétricas e a imagem, a priori, não afetou os resultados, devido, principalmente, à baixa dinâmica de fundo dos reservatórios em estudo.

A correção geométrica é um processo de correção de erros sistemáticos, que ocorrem no momento de tomada das imagens, e que permite o relacionamento de coordenadas de um sistema de projeção cartográfica (E-W ou latitude e longitude) equivalentes às coordenadas imagem referentes a seus pixels (MENESES; ALMEIDA, 2012). Na correção geométrica foram utilizados seis pontos de controle coletados através do sistema GNSS RTK da JAVAD, modelo TRIMPH-1. Adotou-se a projeção cartográfica UTM/zona 23s referenciada ao sistema geodésico SIRGAS 2000. Em seguida, foi realizada a extração da batimetria a partir do Índice NDWI.

Em suma, a extração da batimetria utilizando imagens orbitais baseia-se no princípio

de que a intensidade da energia radiante, refletida por uma coluna de água e recebida pelo sensor é função da profundidade da água, ou seja, da porção de radiação solar que penetrou na coluna d'água. Com este método pode-se coletar os dados rapidamente sobre grandes áreas com um baixo custo, no entanto, a profundidade máxima atingida é de, aproximadamente, 25 m em águas límpidas e bem menor em águas turvas (CANDELA, 2013).

A utilização do Índice NDWI é um método de extração proposto pela primeira vez por McFeeters em 1996. Este índice derivou do índice de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), proposto por Rouse *et al.* (1973), que baseia-se na característica da vegetação verde e sadia mostrar um evidente contraste nas combinações das bandas do vermelho e do infravermelho próximo (LEIVAS, 2013).

No caso do NDWI às feições na água são delineadas e realçadas em uma imagem orbital com o uso da radiação refletida nas regiões do infravermelho próximo e do verde visível, aumentando a presença de tais feições enquanto elimina a influência do solo e vegetação terrestre (MCFEETERS, 1996). A geração do Índice NDWI foi realizada através da equação 1:

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

sendo:

$\rho(G)$: Intervalo espectral correspondente a luz verde do espectro visível (520 – 590 nm), e;

$\rho(NIR)$: Intervalo espectral correspondente a região do infravermelho próximo (760 – 850 nm).

Neste índice, os corpos d'água água apresentarão valores positivos, enquanto as informações de vegetação e solo terão valores nulos ou negativos, devido à sua reflectância mais elevada na região NIR do que a luz verde.

A coleta dos dados batimétricos foi realizada em 2010 e seguiu as recomendações de IHO (2002). O processamento, bem como a análise seguiu a metodologia proposta por Ferreira *et al.* (2015). Os levantamentos foram conduzidos a bordo da embarcação EAM-01 cedida pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, onde

coletou-se os dados batimétricos através de um ecobatímetro monofeixe equipado com um transdutor de dupla frequência (33/210 kHz). Foi utilizado um par de receptores RTK para prover as coordenadas geodésicas às sondagens. Após a coleta, os dados foram processados e analisados no software Hypack 2012 gerando um arquivo com pontos contendo as coordenadas planimétricas e as respectivas profundidades (XYZbat). Em uma etapa posterior os dados foram exportados em formato compatível com os softwares ArcGIS 10.2.2 e R 3.2.2 visando efetuar análises estatísticas e geoestatísticas. Apesar de se ter utilizado um ecobatímetro de dupla frequência, neste estudo apenas a frequência alta foi considerada (210kHz). A escolha da frequência de 210kHz, baseou-se nos princípios apresentado por Ferreira *et al.* (2015), onde pode-se citar o fato das frequências mais elevadas possuírem maior exatidão nas medições de profundidade, maior resolução (menor comprimento de onda) e não penetrarem nos sedimentos não consolidados do leito submerso, ao contrário das baixas frequências.

Os dados de profundidade do levantamento batimétrico referente à Lagoa 1, foram correlacionados com o Índice NDWI. Nesta análise, à equação de correlação encontrada através dos dados da lagoa 1 foi utilizada para extrair a batimetria da lagoa 2 (doravante denominado XYZimagem).

Obtida a batimetria através da imagem, foram utilizados pontos de checagem coletados na lagoa 2 para efetuar uma análise estatística do modelo proposto. Selecionaram-se pontos de forma aleatória para comparar as profundidades extraídas da imagem (XYZImagem) com as profundidades coletadas pelo sistema de sondagem (XYZbat).

Através das discrepâncias podem-se gerar índices estatísticos que permitem, a priori, avaliar estatisticamente os resultados. Nesta etapa, seguiu-se as recomendações de Ferreira *et al.* (2015) e Santos (2015). Assim, efetuou-se uma análise exploratória dos dados de discrepâncias (detecção de outliers, análise de independência e normalidade). Após uma análise criteriosa, se detectados outliers, os mesmos deveriam ser eliminados. Então, submeteu-se a amostra a uma análise de independência e posteriormente a um teste de normalidade.

Para amostras de discrepâncias independentes e que seguem uma distribuição normal, pode-se estimar a acurácia teórica dos dados, ao nível de confiança de 95%, através da equação 2.

$$\text{Acurácia}_{95\%} = 1,96 \cdot \sqrt{\sigma_{\text{Aleatórios}}^2 + \sigma_{\text{Sistemáticos}}^2} \quad (2)$$

Na metodologia proposta neste estudo, bem como em uma batimetria tradicional, o produto resultante é uma malha de pontos amostrais que não representa o relevo submerso de forma espacialmente contínua sendo necessário, antes de qualquer análise (ex.: cálculo de volumes), o uso de interpoladores para estimar o valor da profundidade em locais não amostrados (CAMARGO, 1998; FERREIRA *et al.*, 2013). Até o momento existem mais de 40 métodos de interpolação disponíveis na literatura, classificados em determinísticos e probabilísticos (CURTARELLI, 2015; FERREIRA, 2015). Nota-se, no entanto, uma preferência pelo uso do TIN (Triangulated Irregular Network). Entretanto, segundo Vicente (2011), em estudos de dinâmica sedimentar a preferência é dada à modelagem com recurso a algoritmos probabilísticos, que permitam modelar a dependência espacial do fenômeno em estudo, tal como realizado por Ferreira *et al.* (2013).

De acordo com Ferreira *et al.* (2013) os levantamentos batimétricos apresentam características ideais para a aplicação da geoestatística, sobretudo a interpolação, denominada Krigagem. Isso se dá devido à natureza do estudo, da variável (profundidade) e pela grande quantidade de pontos amostrais. Sendo assim, neste estudo optou-se por utilizar o interpolador Krigagem para geração do Modelo Digital de Profundidade (MDP).

A análise geoestatística visando a geração do MDP foi realizada seguindo as recomendações de Vieira (2000) e consistiu das seguintes etapas: análise exploratória dos dados, geração e modelagem dos semivariogramas, validação do modelo e interpolação e predição da incerteza.

A partir da modelagem geoestatística obteve-se dois MDPs para a lagoa 2. O primeiro, a partir da imagem RapidEye (MDPimagem) e o segundo a partir dos dados coletados pelo sistema de sondagem (MDPbat).

Comparando-se o MDPimagem e o MDPbat pode-se realizar uma análise mais eficiente da metodologia proposta. Em suma, realizou-se uma subtração dos modelos visando espacializar às discrepâncias, podendo-se, desta forma, verificar os locais onde as incertezas são maiores e aprimorar a metodologia, especificadamente, na fase de seleção de pontos batimétricos para geração da equação de correlação, selecionando pontos de forma aleatória e bem distribuídos por toda a cena, evitando agrupamentos, o que pode dificultar a análise (SANTOS, 2015).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visando extrair a batimetria utilizando o Índice NDWI, os valores digitais foram correlacionados com os valores de profundidade obtidos através da sondagem batimétrica. A Figura 5 ilustra o modelo de regressão encontrado neste estudo, bem como a equação que explica o modelo e o coeficiente de determinação no valor de 0,829, significando que aproximadamente 83% da variação de resposta pode ser explicada pelo modelo proposto.

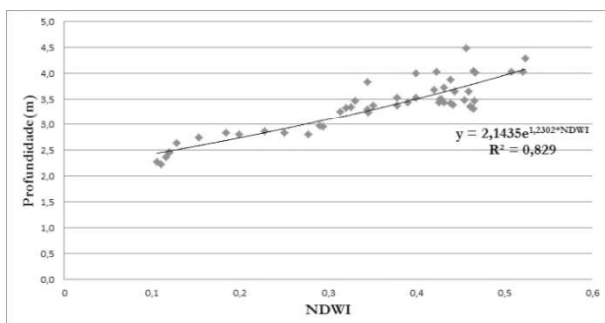


Fig. 5 – Comportamento dos valores digitais do NDWI em relação à variação de profundidade.

Para cada pixel extraiu-se um valor de profundidade, e esta foi atribuída a sua respectiva coordenada planimétrica, gerando ao final um arquivo XYZImagem com 7.605 pontos. Os dados de profundidade foram obtidos a partir da equação 3, onde Z representa a profundidade extraída da imagem.

$$Z = 2,1435 \cdot \exp(1,2302) \cdot \left(\frac{DN_2 - DN_5}{DN_2 + DN_5} \right) \quad (3)$$

Seguindo a metodologia proposta, na análise estatística selecionaram-se no arquivo

XYZImagem e no arquivo XYZbat 272 pontos homólogos (seleção aleatória). Através destes pontos foi gerado o arquivo de discrepâncias.

Seguindo as recomendações de Ferreira *et al.* (2015) e Santos (2015) foi realizada a análise exploratória da amostra de discrepâncias. Através de análises via gráfico boxplot foram identificados 58 outliers. Estes, após uma análise criteriosa, foram eliminados. O gráfico boxplot foi novamente gerado, podendo-se constatar a ausência de outliers (Figura 6).

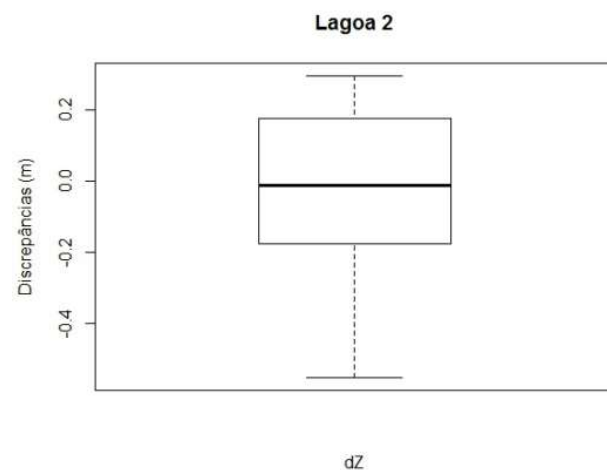


Fig. 6 - Boxplot das discrepâncias referente a Lagoa 2.

Através da análise do semivariograma experimental pode-se inferir sobre a independência da amostra de discrepâncias. Constatada a independência foi aplicado o teste de normalidade Shapiro-Wilk, conforme recomenda Santos (2015). Os dados apresentaram-se com uma distribuição não normal e, desta forma, o uso de estatísticas paramétricas fica comprometido. Uma alternativa nestes casos é o uso do Teorema Central do Limite, no entanto, devido às características dos dados, optou-se por aplicar uma transformação. Segundo Paes (2009) a principal dificuldade em usar transformações é a interpretação de dados transformados e a volta à escala original que não é direta.

Através do teste Shapiro-Wilk pode-se constatar que a amostra transformada assumiu uma distribuição aproximadamente normal. A Figura 7 apresenta o histograma da amostra de discrepâncias transformada.

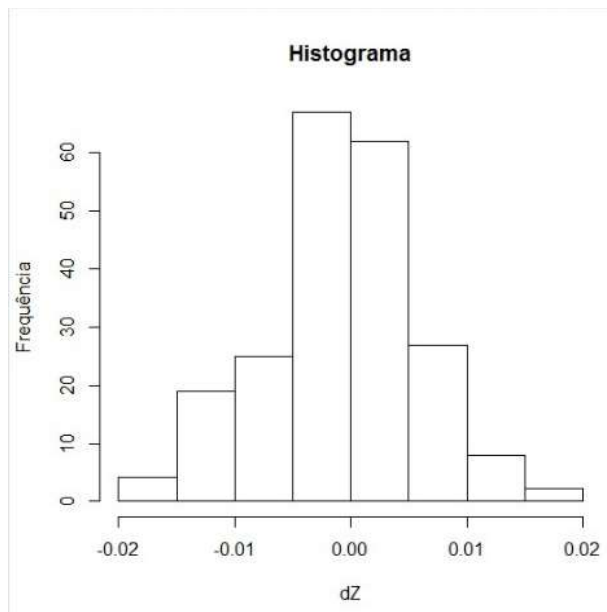


Fig. 7 - Histograma das discrepâncias referente a Lagoa 2.

Assumido os pressupostos e com a amostra na escala original, utilizou-se a Equação 2 para estimar a acurácia teórica do modelo proposto. De acordo com USACE (2002) e Ferreira *et al.* (2015) em um levantamento batimétrico os efeitos aleatórios variam com a profundidade observada e podem ser quantificados através do desvio padrão das discrepâncias entre as profundidades, enquanto que os efeitos sistemáticos, parcela que não depende da profundidade, podem ser quantificados através da média das discrepâncias entre as profundidades. A Tabela 1 sumariza os resultados.

Tabela 1: Cálculo da acurácia teórica do modelo proposto

Estatísticas	Lagoa 2
Número de pontos	214
Média das discrepâncias (m) (efeito sistemático)	0,000
Desvio padrão das discrepâncias (m) (efeito aleatório)	0,190
Acurácia (m) (95%)	0,372

Na Tabela 1 pode-se perceber que o viés da amostra é nulo, indicando a ausência de efeito sistemático. Podendo-se, então, afirmar que a amostra apresenta apenas efeitos aleatórios. Todavia, tomando o arquivo XYZbat como referência, a acurácia teórica do modelo proposto, ao nível de confiança de 95% ($1,96\sigma$),

é de, aproximadamente, 37,0 cm, que, para levantamentos batimétricos com finalidade de elaboração de projetos na área de gestão de recursos hídricos, é mais que suficiente.

Por último, efetuou-se a modelagem geoestatística obtendo-se os dois MDPs propostos (MDPbat e MDPimagem). Os mesmos foram então comparados visando espacializar às incertezas. Acredita-se que as incertezas apresentadas até o momento se referem ao processo de obtenção dos dados. As demais englobam, além daquelas apresentadas na Tabela 1, às incertezas referentes à modelagem geoestatística.

Os MDPs foram gerados com base na Krigagem Simples que, conforme demonstrado por Santos (2010), possui melhores estimativas. Como sabido, antes da interpolação deve-se gerar e modelar o semivariograma. Sendo assim, procedeu-se com o ajuste do semivariograma, após muitas tentativas, conseguiu-se um ajuste bastante realista para o semivariograma omnidirecional de ambas as amostras (XYZbat e XYZimagem). Deve-se atentar que neste estudo, fundamentado em Ferreira *et al.* (2013), a anisotropia foi desconsiderada.

O modelo teórico que melhor se ajustou ao modelo experimental da amostra XYZimagem foi o stable, com efeito pepita de $0,079 \text{ m}^2$, patamar de $0,783 \text{ m}^2$ e um alcance de $37,062 \text{ m}$. O modelo stable é uma combinação dos modelos exponencial e gaussiano. Neste modelo deve-se definir um parâmetro de ajuste, que varia de 0 a 2, sendo que o valor nulo torna o modelo stable idêntico ao modelo exponencial, e se o parâmetro é definido como 2, o modelo passa a ser o gaussiano. O valor do parâmetro de ajuste do modelo stable definido para a amostra XYZimagem foi de $1,658984$ (Ferreira *et al.*, 2015).

Segundo Ferreira *et al.* (2013) o patamar é teoricamente igual a variância de amostragem, e desta forma, pode-se, em um primeiro momento, aferir sobre a qualidade do ajuste do semivariograma, que é melhor estimado pelo RMS (Root Mean Square) obtido através da validação cruzada. Para a amostra XYZimagem a variância e o RMS foram, respectivamente, $0,769 \text{ m}^2$ (\sim patamar) e $0,386 \text{ m}$. Salienta-se que um RMS pequeno indica que a modelagem geoestatística funcionou de forma adequada.

Para a amostra XYZbat o modelo teórico que melhor se ajustou ao modelo experimental também foi o stable (parâmetro de ajuste foi 1,557901), com efeito pepita de 0 m², patamar de 0.511 m² e um alcance de 70.854 m. A variância e o RMS foram, respectivamente, 0.540 m² (~patamar) e 0.163 m.

A seguir apresentam-se os modelos digitais de profundidade para ambas as amostras (Figuras 8 e 9).

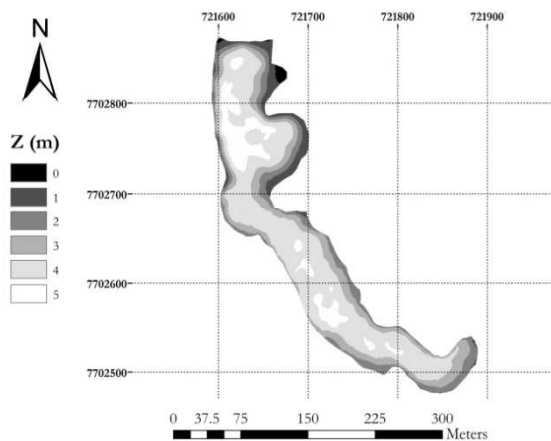


Fig. 8 – Mapa Batimétrico da lagoa 2 obtido por meio da equação de correlação (MDPimagem).

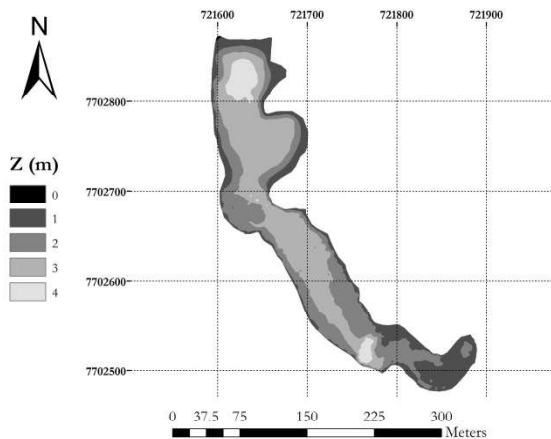


Fig. 9 – Mapa Batimétrico da lagoa 2 obtido por meio do levantamento batimétrico (MDPbat).

Percebe-se pela Figura 8 que a profundidade do MDPimagem variou de 0 m (borda) atingindo uma profundidade de 4,56 m. Já a profundidade obtida pelo levantamento batimétrico convencional variou de 0 m a 3,43 m. No geral, as profundidades apresentadas no MDPimagem foram sempre maiores que aquelas fornecidas pela batimetria convencional.

A Figura 10 apresenta a espacialização das

discrepâncias. Realizou-se uma subtração entre os modelos batimétricos encontrados na etapa anterior. Nota-se que as discrepâncias variaram de -3,17 m até 1,62m.

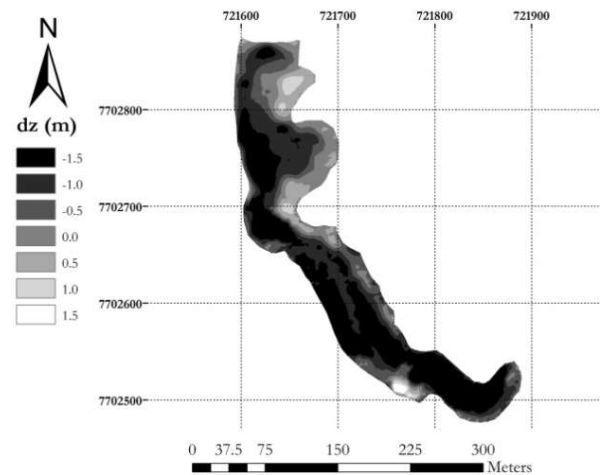


Fig. 10 - Mapa de discrepâncias.

Entretanto, a maioria das discrepâncias foram, em módulo, menores que 1 m, mostrando que o método é válido para algumas aplicações, principalmente em estudos ambientais. Pode-se perceber através da interpolação que a incerteza do modelo gerado não condiz com aquela apresentada na Tabela 1, indicando que a amostra de checagem não representou de forma adequada a população, recomendando-se para trabalhos futuros, além a seleção aleatória, uma espacialização dos pontos, visando-se verificar se os mesmos encontram-se bem distribuídos por toda a área de estudo. Uma análise de tendência na amostra de checagem também é recomendada.

Todavia, as maiores discrepâncias ocorreram nas profundidades maiores que 3 m e nas áreas onde não foi possível efetuar a coleta de sondagens, devido principalmente, a baixa profundidade (bordas) e a presença de vegetação (aguapés), fatores que levaram a falhas na amostra de correlação e de checagem. Outro condicionante neste estudo foi a alta turbidez da água observada na área de estudo (Figura 2).

4. CONCLUSÃO

Levantamentos batimétricos tradicionais são, em quase sua totalidade, de altos custos e demorados.

Técnicas de sensoriamento remoto têm sido empregadas para obter informações batimétricas

a baixo custo. O presente estudo foi conduzido com a intenção de avaliar a aplicabilidade de imagens RapidEye na extração de profundidade utilizando o Índice NDWI.

Os resultados obtidos mostraram-se confiáveis dentro do limite de profundidade estabelecido, podendo prover uma contribuição valiosa no conhecimento preliminar do relevo subaquático da região de interesse, no entanto, o método NDWI ainda requer testes a serem realizados em locais com diferentes tipos de ambientes, a fim de validar a aplicabilidade do mesmo.

Desta forma, conclui-se que a metodologia é válida e pode ser aplicada em áreas rasas e/ou áreas de difícil acesso visando-se gerar mapas batimétricos para estudos preliminares e ambientais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Viçosa, em especial ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil com área de concentração em Informações Espaciais por permitir que este estudo fosse realizado e ao laboratório de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica por ceder o sistema de sondagem. E agradecem também à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA por disponibilizarem as imagens RapidEye.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: Fundamento e Aplicações. In: CAMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento em Projetos Ambientais**. 2ª ed. São José dos Campos: INPE, 1998. Cap 5, 36p.

CANDELA, C, R. **Estimativa da profundidade de corpos de água com o uso de dados de sensoriamento remoto**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 141p., 2013.

CHENG, L.; MA, L.; CAI, W.; TONG, L.; LI, M.; DU, P. Integration of Hyperspectral Imagery and Sparse Sonar Data for Shallow Water Bathymetry Mapping. **Geoscience and Remote Sensing**. IEEE Transactions on, v. 53, n. 6, p. 3235-3249, 2015.

CURTARELLI, M.; LEÃO, J.; OGASHAWARA,

I.; LORENZZETTI, J.; STECH, J. Assessment of spatial interpolation methods to map the bathymetry of an Amazonian hydroelectric reservoir to aid in decision making for water management. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 4, n. 1, p. 220-235, 2015.

FERREIRA, I. O.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, A. P. Levantamento batimétrico automatizado aplicado à gestão de recursos hídricos. Estudo de caso: Represamento do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa–Mg. In: **Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, v. 4, p. 1-8, 2012.

FERREIRA, Í. O. ; SANTOS, G. R. ; RODRIGUES, D. D. Estudo sobre a utilização adequada da krigagem na representação computacional de superfícies batimétricas. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 65, n.5, p. 831-842, 2013.

FERREIRA, Í. O.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, G. R.; **Coleta, processamento e análise de dados batimétricos**. 1ª ed. Saarbrücken: Novas Edições Acadêmicas, v. 1, 100p., 2015.

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

GAUTAM, V.; GAURAV, P.; MURUGAN, P.; ANNADURAI, M. Assessment of Surface Water Dynamics in Bangalore using WRI, NDWI, MNDWI. Supervised Classification and K-T Transformation. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 739-746, 2015.

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

KRUG, L. & NOERNBERG, M. O sensoriamento remoto como ferramenta para determinação de batimetria de baixios na Baía das Laranjeiras, Paranaguá – PR. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, p. 101-105, 2007.

LEIVAS, J.; ANDRADE, R.; VICENTE, L.; TORRESAN, F.; VICTORIA, D.; BOLFE, E. Monitoramento da seca de 2011/12 a partir do NDWI e NDVI padronizado do SPOT-

- Vegetation. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**, p. 364-370, 2013.
- Li, W.; Du, Z.; Ling, F.; Zhou, D.; Wang, H.; Gui, Y.; Sun, B.; Zhang, X. A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALI. **Remote Sensing**, v. 5, n. 11, p. 5530-5549, 2013.
- MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.
- MENESES, P; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. 1 ed. Brasília: UnB/CNPq, v.1, 266p., 2012.
- NOERNBERG, M. A.; LAUTERT, L. F. C.; ARAÚJO, A. D.; MARONE, E.; ANGELOTTI, R.; NETTO Jr., J. P. B.; KRUG, L. A. Remote Sensing and GIS Integration for Modelling the Paranaguá Estuarine Complex – Brazil. **Journal of Coastal Research**. Special Issue 39, p. 1627-1631, 2004.
- PAES, A. T. O que fazer quando a distribuição não é normal?. **Einstein. Educação Continuada em Saúde**, v. 7, n. 1, p. 3 - 4 2009.
- ROTUNNO FILHO, M; ZEILHOFER, P. Modelagem da Poluição não Pontual na Bacia do Rio Cuiabá Baseada em Geoprocessamento. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8 n. 4, p. 115-135, 2003.
- SANTOS, A. P. **Controle de qualidade cartográfica: metodologias para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 188p., 2015.
- SANTOS, G. R. **Hierarquização geométrica dos preditores geoestatísticos**. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 200p., 2010.
- USACE - U.S. Army Corps of Engineers. **HIDROGRAPHIC SURVEYING**. Engineer Manual No 1110-2-1003. Department of the Army. Washington, D. C., 30 Nov. 2002.
- 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**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1. p.2-54, 2000.
- VILELA, L. C. **Comparação entre as redes neurais artificiais e o método de interpolação krigagem aplicados à pesquisa agrônômica**. Tese (Doutorado). UNESP. Faculdade de Ciências Agrônômicas. Campus de Botucatu, 124p., 2004.
- XU, H. Extraction of Urban Built-up Land Features from Landsat Imagery Using a Thematic-oriented Index Combination Technique. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 73, n. 12, pp. 1381–1391, 2007.