



Revista Brasileira de Cartografia (2013) N<sup>o</sup> 65/5: 907-922  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **MODELAGEM BATIMÉTRICA NO RESERVATÓRIO DE SOBRADINHO: I – GERAÇÃO E AVALIAÇÃO DE SUPERFÍCIES BATIMÉTRICAS UTILIZANDO INTERPOLADORES ESPACIAIS**

*Bathymetric Modeling at Sobradinho Reservoir: I - Generation and Assessment of  
Bathymetrical Surfaces by Means of Spatial Interpolators*

**Hélio Leandro Lopes<sup>1</sup> (*in memoriam*); Alfredo Ribeiro Neto<sup>2</sup>  
& José Almir Cirilo<sup>3</sup>**

**<sup>1</sup>Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF**  
Centro de Ciências Agrárias - Colegiado de Agronomia - Laboratório de Tecnologias da Geoinformação  
Endereço: Rodovia BR 407 - KM 12 - Lote 543 PSNC, s/n<sup>o</sup> - C1, 56300-990, Petrolina-PE, Brasil

**<sup>2</sup>Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**  
Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Engenharia Civil - Laboratório de Hidráulica  
Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n - Cidade Universitária, 50.740-530, Recife-PE, Brasil  
alfredoribeiro@ufpe.br

**<sup>3</sup>Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**  
Centro Acadêmico do Agreste – Núcleo de Tecnologia  
Rodovia BR-104 km 59 - Nova Caruaru, 55002-970, Caruaru-PE  
almir.cirilo@gmail.com

### **RESUMO**

Historicamente o reservatório de Sobradinho não possui levantamento batimétrico após a sua implantação. Os dados batimétricos são relevantes para estudos sedimentológicos e de perdas de volumes em corpos hídricos. Para a modelagem desses parâmetros é fundamental a geração de uma superfície com interpolador espacial que obtenha melhores resultados estatísticos referente à superfície batimétrica. Nesse sentido, foi realizado levantamento ecobatimétrico do reservatório de Sobradinho localizado no norte do Estado da Bahia, que faz parte da bacia do rio São Francisco. Para a determinação da superfície batimétrica no reservatório de Sobradinho, foram testados seis interpoladores e avaliados em função de estatísticas descritivas, erro médio, coeficiente de correlação e raiz do desvio médio quadrático - RMSD. Para a validação das superfícies interpoladas, foram separados 10% das amostras. Os interpoladores que apresentaram melhores desempenhos estatísticos foram a rede triangular irregular linear (RTIL) e o spline mitasova (SM). Para esses interpoladores, o coeficiente de correlação foi de 0,92 para o RTIL e 0,91 para o SM. Em relação ao RMSD, a superfície gerada a partir do RTIL obteve valor de 2,07 m enquanto que a superfície obtida pelo interpolador SM apresentou valor de 2,16 m.

**Palavras chaves:** Interpolação Batimétrica, Reservatório de Sobradinho, Validação Estatística.

## ABSTRACT

Historically, Sobradinho reservoir has no bathymetric survey after its construction. Bathymetric data are relevant for sedimentological studies and analysis of loss of storage capacity in water bodies. To model these parameters, it is fundamental to generate a surface taking into account a spatial interpolator that has better statistical results regarding bathymetrical surface. In this sense, it was conducted bathymetric survey at the Sobradinho reservoir, located in the northern state of Bahia, which is part of the São Francisco River basin. To determine the bathymetric surface at Sobradinho reservoir, six interpolators were tested and evaluated in terms of descriptive statistics, mean error, coefficient of correlation and root mean square deviation - RMSD. To validate interpolated surfaces, were separated 10% of samples. The interpolators that had better statistical performance were linear triangular irregular network (RTIL) and spline Mitasova (SM). For these interpolators, the coefficient of correlation was 0.92 and 0.91 for the RTIL and SM, respectively. In relation to RMSD, the surface generated from RTIL obtained value of 2.07 m, whereas the surface modeled by SM interpolator had a value of 2.16 m.

**Keywords:** Bathymetric Interpolation, Sobradinho Reservoir, Statistical Validation.

## 1. INTRODUÇÃO

O requerimento e frequência de realização de levantamentos de dados e o tamanho da base de dados batimétricos estão aumentando ano a ano (COVE & HOGGARTH, 2010). Essa atenção é decorrente, principalmente, devida à intensificação de mudanças do uso e cobertura do solo na bacia, aumentando a produção de sedimentos (CHANG et al., 2003), causando impacto na profundidade devido à sedimentação. Com densificação espaço-temporal de dados batimétricos, há a necessidade de desenvolvimento de ferramentas para armazenamento e tratamento das bases de dados (COVE & HOGGARTH, 2010), que permitem a determinação de volumes de sedimento e água, assim como a representação física dos corpos d'água para a modelagem hidrodinâmica do escoamento (MERWADE et al., 2006). Assim, um dos objetivos da batimetria é a quantificação de volume de água, valor fundamental na determinação da quantidade de espécies aquáticas, além de ser dado de entrada em hidrologia na computação de modelos distribuídos (AJAMI et al., 2004; TURCOTTE et al., 2001), na estimativa do balanço de água, na avaliação de água subterrânea e inter-relações com a água de superfície (DEMLIE et al., 2007). Para a determinação do volume, realizam-se amostragens da profundidade em pontos representativos do relevo submerso.

A superfície contínua da batimetria de um rio é realizada por interpolação de pontos discretos ou dados de seção cruzada (MERWADE, 2009). Diversos métodos de interpolação

especializados em hidrologia não consideram a variação anisotrópica natural do leito do rio na espacialização batimétrica dos dados (MERWADE et al., 2006). Merwade et al. (2006) testaram diversos métodos para interpolar pontos batimétricos em rios. Os métodos avaliados foram os mais comuns, como: inverso da distância ponderada, spline, vizinho natural, TopoGrid, e krigagem ordinária (isotrópica e anisotrópica). Souza et al., (2003) também realizaram avaliação de três interpoladores entre os quais o inverso da distância obteve melhor resultado estatístico. Em análise de dados batimétricos do fundo marinho por meio de três interpoladores geostatísticos, Souza e Machado (2003) mostraram que a krigagem ordinária produziu as melhores estimativas, com o desvio padrão mais baixo e maior coeficiente de correlação. No entanto, os resultados apresentados por Gomes et al. (2007) mostram que o grid gerado por interpolação com krigagem Ordinária mostrou maior eficiência na qualidade de representação da superfície em relação a rede triangular, com dados batimétricos e continentais na costa do estado do Rio Grande do Norte. De acordo com os resultados de Merwade et al. (2005), os métodos que não levam em conta a anisotropia dos dados (TopoGrid, vizinho natural e krigagem ordinária) apresentaram melhor desempenho que krigagem anisotrópica. Goff & Nordfjord (2004) enfatizam a importância da anisotropia em rios e a necessidade de se trabalhar com esse fenômeno apropriadamente quando da interpolação de dados batimétricos.

A modelagem batimétrica de reservatórios de grandes dimensões traz dificuldades adicionais

e características particulares que devem ser investigadas. Isso pode significar, por exemplo, a necessidade de avaliação dos métodos de interpolação que melhor se adequam a esses reservatórios bem como à disposição e densidade de amostras. A determinação precisa da batimetria em lagos, oceanos e rios fornece informações para a estimativa da capacidade do reservatório e controle do volume de assoreamento (LANE et al., 1994; VAN RIJN, 1997). NOIVA et al. (2010) afirmam que para geração de uma superfície batimétrica, há a necessidade de aplicar interpoladores que apresentam melhores resultados estatísticos. Souza et al. (2003) identificaram qual seria o melhor interpolador para a densidade e arranjo espacial das amostras disponíveis, utilizando para isso o desvio padrão. Dessa forma se tem informação de qual seria o interpolador que geraria da forma mais confiável a superfície a ser modelada e como consequência o volume a ser calculado (SOUZA et al., 2003), aplicado ao local onde se realiza a modelagem do relevo. Assim, a modelagem mais precisa significará a determinação com maior segurança da capacidade do reservatório, controle do volume de assoreamento e, por consequência, na tomada de decisão quanto a recuperação de áreas que contribuem para as perdas de solo na bacia envolvente, como também na operação do reservatório.

O objetivo do artigo é avaliar técnicas de interpolação espacial para determinação do Modelo Numérico do Terreno (MNT) do reservatório de Sobradinho a partir de dados obtidos com levantamento batimétrico.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

O reservatório de Sobradinho faz parte do sistema Chesf de geração de energia, construído na década de 1970. Está localizado no Estado da Bahia, distando cerca de 40 km a montante das cidades de Juazeiro/BA e Petrolina/PE, com coordenadas geodésicas da barragem de 40° 50' de longitude oeste e 9° 35' de latitude sul (WGS84). O reservatório possui extensão por volta de 320 km, com uma superfície de espelho d'água de 4.214 km<sup>2</sup> e uma capacidade de armazenamento de 34,1 bilhões de metros cúbicos em sua cota nominal

de 392,50 m. O reservatório está localizado em uma região com características de clima semiárido, com precipitação média anual de 551 mm e evaporação potencial anual de 2.187 mm (RIBEIRO et al., 2007). Na Figura 1, mostra-se a localização geográfica do reservatório.

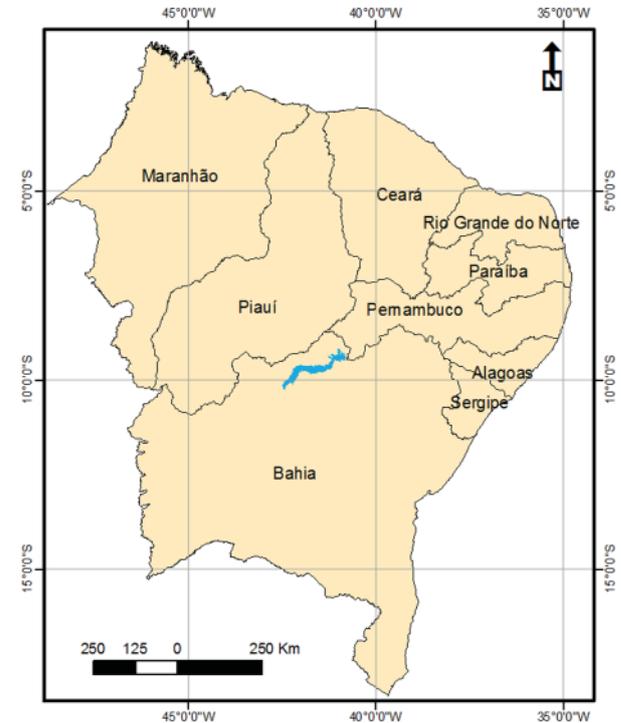


Fig. 1 - Localização do reservatório de Sobradinho na região Nordeste.

### 2.2 Instrumentação ecobatimétrica e geodésica

Atualmente os levantamentos batimétricos são conduzidos com GPS em conjunto com ecobatímetros (KRUEGER, 1999; RAMOS e KRUEGER, 2009; SOUZA et al, 2003; BARBOSA et al., 2006; GÜRBÜZ e GÜRER, 2008; WHEELER et al., 2010; WRIGHT et al., 2000; SOUZA-VIEIRA & HARTMANN, 2008).

A embarcação estava equipada com um sistema de ecobatimetria digital constituído por uma Ecossonda Multifrequência Bathy 500MF, com precisão centimétrica e saída no formato NMEA; GPS DGPSMax da Hemisphere, com precisão de 1 a 5 metros, no posicionamento das coordenadas X,Y, obtida pela correção diferencial em tempo real via satélite Oministar e Laptop com 03 portas seriais, de forma que, através dos softwares Bat1, adaptado especialmente para o levantamento, e TRACKMAKER, se realizasse a navegação, coleta e armazenamento de dados

de ecossondagem e de posição DGPS.

### 2.3 Levantamento dos dados

Para a execução do levantamento batimétrico utilizou-se uma barca de casco de ferro (Figura 2) com 0,70 m de calado e com velocidade média de 10 km/h (5,40 nós), e um barco auxiliar (tipo regata) usado no levantamento de locais do reservatório com muita vegetação aquática. A coleta de dados batimétricos foi realizada no período de abril a junho de 2009. A ferramenta Bat1 registra coordenadas, profundidade, data e hora de cada ponto levantado.



Fig. 2 - Embarcação e instrumentação utilizada no levantamento batimétrico.

Durante o levantamento, em função das condições topográficas do fundo, moderadamente declivoso, e dos tributários dos vales inundados com mudanças abruptas de profundidades, foi necessário ajustar o intervalo de aquisição dos pontos (variação de 0,5 a 3,5 km). Mas um dos principais fatores, durante toda a realização da navegação, que impossibilitava percorrer o caminho programado, foi a ocorrência de macrófitas e marolas, obrigando a equipe a realizar a navegação na direção predominante da mesma ou ter que procurar abrigo em função dos fortes ventos que ocorrem, principalmente,

nos meses de maio e junho.

### 2.4 Programação do caminhoamento batimétrico

Para execução do levantamento batimétrico do reservatório de Sobradinho, foram predefinidas as linhas de navegação com base em imagens de satélite (BARBOSA et al. 2006). A extensão total das linhas de navegação batimétrica definidas no projeto foi de aproximadamente 2.686,44 km (Figura 3A), sendo que o total de linhas efetivamente navegadas na execução do levantamento foi de 2.040,06 km (Figura 3B). Esta diferença é explicada devido à ocorrência de macrófitas, no trecho superior do reservatório, que impediam a navegação pelo acúmulo junto ao transdutor da ecossonda e à hélice do barco e, principalmente, pelas ondas que se formavam, preferencialmente, em trechos das zonas Fluvial-lacustre e Lacustre (a montante do barramento até as ilhas; na frente da entrada do tributário de Casa Nova-BA).

A partir da definição do caminhoamento batimétrico, o levantamento se iniciou no local denominado Pedras Brancas, na localidade de Taquari, que dista aproximadamente 7,46 km da estação fluviométrica de Fazenda das Pedras com coordenadas geográficas de  $10^{\circ}19'00,91''$  de latitude sul e  $42^{\circ}27'55,54''$  de longitude oeste (Figura 3). O critério adotado para determinar o limite do lago onde começou a navegação batimétrica foi a ausência de fluxo da água, que define a declividade do Nível da Água (N.A).

### 2.5 Réguas limnimétricas

Na consistência dos dados batimétricos, quanto à correção da variação da flutuação do nível da água, foram utilizados os dados limnimétricos dos postos fluviométricos da barragem de Sobradinho, Sento Sé, Remanso, Pilão Arcado

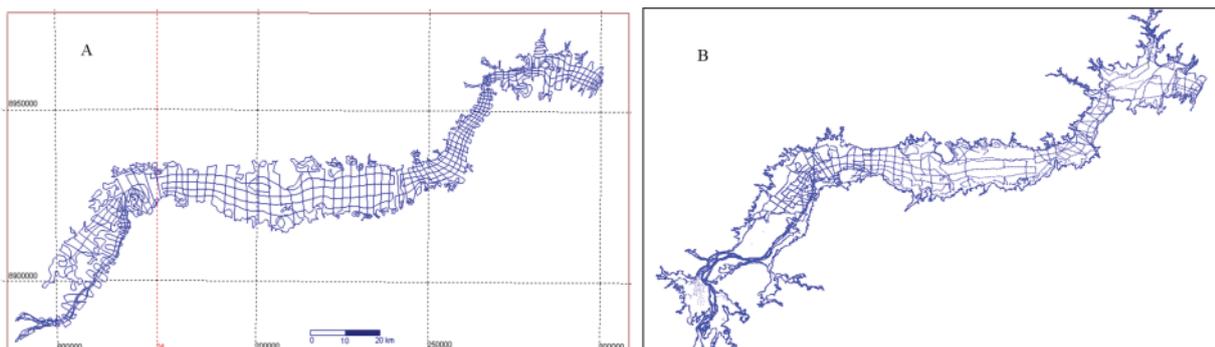


Fig. 3 - Linhas de navegação batimétrica projetadas (A) e efetivamente executadas (B).

e Fazenda das Pedras. Complementarmente, foram instalados três linígrafos de pressão com registrador de dados (Figura 4).

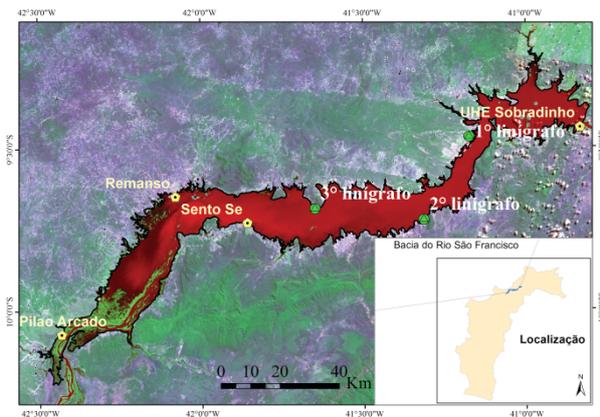


Fig. 4 - Distribuição dos linígrafos no reservatório de Sobradinho para suporte ao levantamento batimétrico.

Esses linígrafos foram instalados nos seguintes locais: 1) margem esquerda do reservatório a aproximadamente 24 km da cidade de Casa Nova-BA, com coordenadas geodésicas de 09°28'08,04" de latitude sul e 41°10'24,53" de longitude oeste; 2) margem direita da barragem, entre a localidade de Piçarrão e Píri, distando 32 km do primeiro linígrafo, com coordenadas geodésicas de 09°43'28,58" de latitude sul e 41°18'50,68" de longitude oeste; 3) O último linígrafo foi instalado a 36 km à montante do segundo, com coordenadas 09°41'24,00" de latitude sul e 41° 38' 57,42" de longitude oeste.

### 2.6 Cálculo da altitude ortométrica.

A tabela de dados do levantamento foi organizada no formato ASCII, contendo as informações em colunas de data, hora, latitude, longitude e profundidade. As informações de coordenadas geodésicas foram determinadas através do DGPS conectado ao ecobatímetro. Com esses dados, foram geradas as altitudes do levantamento de acordo com a localização na região das réguas linimétricas (Figura 3). Os valores foram interpolados entre leituras das duas réguas e diminuídos do valor da profundidade encontrada para cada ponto levantado. O limite superior do levantamento foi a curva de nível de valor 392,5 m.

### 2.7 Pontos de teste

Um grupo dos dados foi interpolado para geração do mapa batimétrico e outro grupo (~10%) (Figura 5) foi separado, baseado nos valores extremos e desvio padrão, para avaliar o desempenho dos diversos métodos de interpolação por meio da validação cruzada. CERRI et al. (2004) utilizaram estatística clássica para separar os dados amostrais em dois grupos, sendo um para interpolação geostatística e outro para validação.

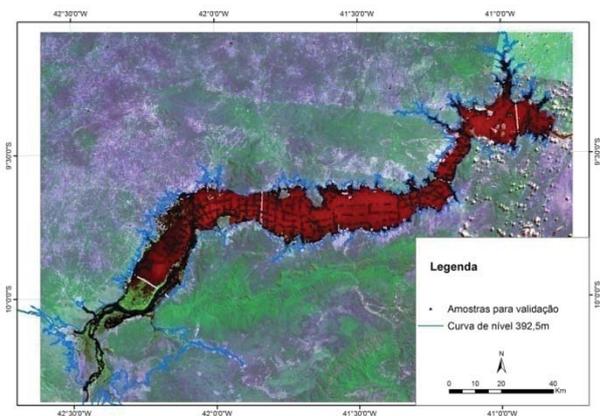


Fig. 5 - Distribuição espacial das amostras para validação das superfícies.

Para a comparação de diferentes métodos de interpolação espacial, os dados originais são divididos em dois sub-grupos: dados para treinamento e dados para teste (MERWADE et al., 2006; MACHADO e SOUZA, 2003; SOUZA et al., 2006). Os dados para treinamento são usados para criar a superfície interpolada, e a performance do método de interpolação é avaliada por comparação dos valores interpolados com os valores separados para teste (separados aleatoriamente). Dessa forma, a escolha do melhor método de estimação dos valores de profundidade foi realizada com base em três critérios:

$$DM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \hat{z}_i) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \hat{z}_i)^2} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sigma_{z_i \hat{z}_i}}{\sigma_{z_i} \sigma_{\hat{z}_i}} \quad (3)$$

em que:

DM é a discrepância média (m)

RMSD (root mean square deviation) é a raiz do desvio médio quadrático (m)

R é o coeficiente de correlação

$\sigma_{z_i \hat{z}_i}$  é a covariância entre as profundidades medidas e as interpoladas (m)

$\sigma_{z_i}$  é o desvio padrão das profundidades medidas (m)

$\sigma_{\hat{z}_i}$  é o desvio padrão das profundidades interpoladas (m)

$z_i$  é o valor da batimetria interpolado (m)

$\hat{z}_i$  é o valor da profundidade batimétrica medida (m)

## 2.8 Interpoladores

Para a interpolação dos dados batimétricos, foram inseridos pontos cotados em ilhas e a curva 392,5 m, que corresponde à cota máxima da barragem, de modo a evitar interpolação com erros na borda do reservatório. Conforme du Bois (2011), um método de evitar erros na interpolação da borda de um corpo hídrico, é levar em conta a linha de cota limite da área em estudo e pontos topográficos situados em terra. Assim, uma técnica para resolver erros de interpolação e consequentemente a criação de declives irreais consiste em usar a linha de costa junto com os dados batimétricos, em que a elevação corresponde ao nível médio do mar ou o mais alto nível da maré. Com isso a declividade próxima ao limite do corpo hídrico terá uma representação mais real, mesmo que dados intermediários não existam (du BOIS, 2011).

As altitudes batimétricas foram importadas no SPRING 5.1, visando a aplicação das diferentes técnicas de interpolação: média ponderada por quadrante, rede triangular linear (Delaunay), vizinho mais próximo, spline mitasova e krigagem ordinária (isotrópica e anisotrópica). A krigagem ordinária foi executada no ArcGis 9.2, devido o Spring apresentar um limite de resolução da grade. A seguir, tem-se uma breve descrição de cada método.

### 2.8.1 Média Ponderada por Quadrante

Este interpolador calcula a altitude batimétrica utilizando a função de interpolação por média ponderada (Eq. 4).

$$f(x,y) = \frac{(\sum_1^n \lambda(x,y) * z)}{(\sum_1^n \lambda(x,y))} \quad (4)$$

em que:  $\lambda(x,y)$  = função de ponderação

$f(x,y)$  = função de interpolação

n = número de vizinhos

É considerada uma amostra por quadrante (total de 4 amostras) e o número de pontos amostrados é igual para cada um dos quadrantes (Figura 6). Sugere-se a utilização deste interpolador quando as amostras são todas do tipo ponto (INPE, 2011).

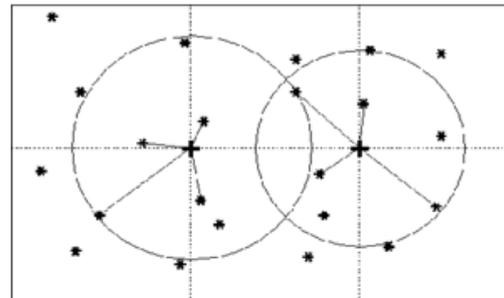


Fig. 6 - Esquema do interpolador média ponderada por quadrante, considerando o vizinho mais próximo por quadrante (INPE, 2011).

Souza et al. (2003) e Souza et al. (2006) utilizaram com sucesso esse interpolador, respectivamente, em uma zona costeira do estado do Paraná e nas águas oceânicas da Irlanda.

### 2.8.2 TIN Linear

Na geração da rede triangular, os pontos amostrados são utilizados para criar a grade irregular. O método utilizado é o incremental, onde os pontos são inseridos um a um na triangulação, modificando a triangulação existente, executando testes de Delaunay nos triângulos gerados e modificados com seus vizinhos. Na última fase do processo, todos os triângulos são testados e modificados, se necessário, para respeitar as restrições de Delaunay. Nessa modelagem da superfície por meio de grade irregular triangular, cada polígono que forma uma face

do poliedro é um triângulo. Nesse caso, os vértices do triângulo são os pontos amostrados da superfície batimétrica. Esta modelagem, considerando as arestas dos triângulos, permite que as informações morfológicas importantes, como as descontinuidades representadas por feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales), sejam consideradas durante a geração da grade triangular, possibilitando assim, modelar a superfície do terreno preservando as feições geomórficas da superfície do reservatório (INPE, 2011). Assim, para a representação do relevo há necessidade de levantamento dessas áreas submersas baseado no mapa topográfico gerado antes do enchimento do reservatório.

A partir da grade irregular triangular, gerou-se a grade regular da superfície batimétrica. A conversão da grade **triangular** para a grade **retangular** pode ser necessária quando se deseja uma forma matricial para o modelo numérico de terreno. Deste modo, as informações do terreno que foram modeladas por um interpolador de grade triangular podem ser analisadas por outras informações do tipo matricial. Nesse sentido, aplicou-se nos dados de batimetria, o modelo linear.

Nesse modelo de interpolação, um plano é ajustado para cada retalho triangular da grade, para determinar os valores de H em cada posição (X,Y). dentro do triângulo. O cálculo envolvendo uma superfície plana pode ser expressa conforme Eq. 5.

$$Xa + Yb + c = H \quad (5)$$

em que X, Y e H são as coordenadas e a, b, e c são os coeficientes.

### 2.8.3 Vizinho mais próximo

Nessa técnica de interpolação, para cada ponto (x,y) da grade, o sistema atribui a cota da amostra mais próxima ao ponto (Figura 7). Este interpolador deve ser usado quando se deseja manter os valores de cotas das amostras na grade, sem gerar valores intermediários.

### 2.8.4 Spline Mitasova

Na interpolação por spline Mitasova, o parâmetro *Tensão* ajusta o resultado da superfície em que o valor 0 indica baixa tensão formando uma superfície rígida, e valores maiores tendem

a formar superfícies mais suaves

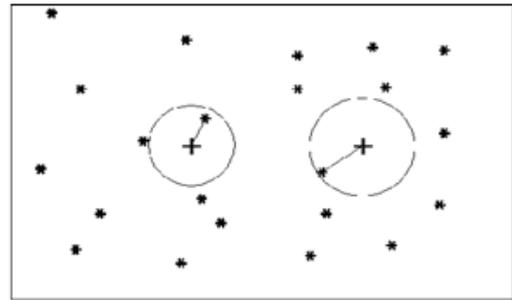


Fig. 7 - Esquema de operação do interpolador vizinho mais próximo (INPE, 2011).

(MERWADE et al., 2006). Assim, altos valores de Tensão reduzem as ações quando na superfície ocorre uma mudança rápida do gradiente. O parâmetro *Suavização* ameniza dados com ruídos, a Suavização com valor zero significa a não suavização, ou seja, a superfície resultante passa exatamente sobre os pontos da amostra. O valor de entrada *Mínimo de Pontos*, informa a quantidade mínima de pontos necessária para calcular a Grade (INPE, 2011). Esse interpolador tem sido usado para modelagem e análise de superfície como por exemplo, para avaliação de risco de erosão (MITASOVA & HOFIERKA, 1993).

### 2.8.5 Krigagem ordinária (isotrópica e anisotrópica)

A krigagem é um dos métodos mais utilizados na interpolação de dados espaciais (DEUTSCH & JOURNAL, 1992). Segundo MERWADE et al. (2006), a krigagem ordinária é um método geoestatístico de interpolação similar ao inverso da distância ponderada devido também à designação de pesos aos valores observados para a estimação de valores em locais arbitrários que é usualmente uma grade (OLIVER & WEBSTER, 1990). No entanto, diferente do método do inverso da distância ponderada, os pesos são atribuídos baseados na correlação espacial entre os pontos e nas distâncias entre as amostras e o ponto interpolado. A correlação espacial é caracterizada através do modelo do semivariograma (empírico), que traz as medidas de diferenças de variância em função das distâncias entre os pontos observados ou “lag”. A krigagem utiliza parâmetros geoestatísticos como termos de entrada no seu sistema de equações lineares, estima o valor máximo

da auto-correlação espacial do atributo a ser espacializado e o valor do semivariograma. Um número de funções (esférica, exponencial, Gaussiana, Bessel, etc.) está disponível para ajustar o modelo teórico em semivariogramas empíricos (CRESSIE, 1991). Os parâmetros dessas funções são otimizados para produzir o melhor ajuste dos semivariogramas empíricos. A superfície predita é então computada de forma a satisfazer as condições estatísticas de mínima tendência e mínima variância, isto é, para minimizar a esperança estatística da Eq. 6.

$$\sigma^2 = E[(z^* - \hat{z}^*)^2] = E\left[\left(z^* - \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i\right)^2\right], \quad (6)$$

$$\text{sendo: } \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i = 1 \quad (7)$$

em que  $\hat{z}^*$  é a predição em  $z^*$  (validação),  $z_i$  é o valor amostrado,  $\lambda_i$  é o peso associado a observação  $i$ , e  $E[\ ]$  é o operador esperança. A solução das equações 6 e 7 para  $\lambda_i$  é encontrada através da solução de um conjunto de equações lineares, conforme expressão a seguir:

$$\begin{aligned} \lambda_1 S(d_{11}) + \lambda_2 S(d_{12}) + \lambda_3 S(d_{13}) + \varpi &= S(d_{1p}) \\ \lambda_1 S(d_{21}) + \lambda_2 S(d_{22}) + \lambda_3 S(d_{23}) + \varpi &= S(d_{2p}) \\ \lambda_1 S(d_{31}) + \lambda_2 S(d_{32}) + \lambda_3 S(d_{33}) + \varpi &= S(d_{3p}) \end{aligned} \quad (8)$$

em que  $S(d_{nn})$  são os valores do semivariograma e  $\varpi$  representa os multiplicadores de Lagrange (usados na krigagem ordinária).

Este cálculo envolve matrizes N por N, que é computacionalmente complexo para grandes áreas e efetivamente limita o tamanho de N. TRAUTH (2010) afirma que o software e a memória física do computador pode ser fatores limitantes quando as amostras ultrapassam 3.000 pontos. A condição dada pela Eq. 7 produz uma predição sem tendência; em que a krigagem ordinária é frequentemente referenciada por ser o melhor estimador linear sem tendência (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989). Uma vez determinado o valor de  $\lambda_i$  para cada ponto amostrado, a Eq. 9 a seguir pode ser usada para determinar  $\hat{z}^*$ .

$$\hat{z}^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i, \quad (9)$$

em que  $z_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) são as elevações observadas em N pontos, e  $\lambda_i$  são os pesos conforme Eq 10.

$$\lambda_i = \frac{1}{d_i^p} \bigg/ \sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^p} \quad (10)$$

em que  $d_i$  é a distância entre  $i$  pontos amostrados ( $z_i$ ) e pontos não amostrados ( $z^*$ ), e  $p$  é o expoente.

A Figura 8 esboça o esquema de procedimento geoestatístico, referente ao processamento da krigagem ordinária, utilizado nesse trabalho.

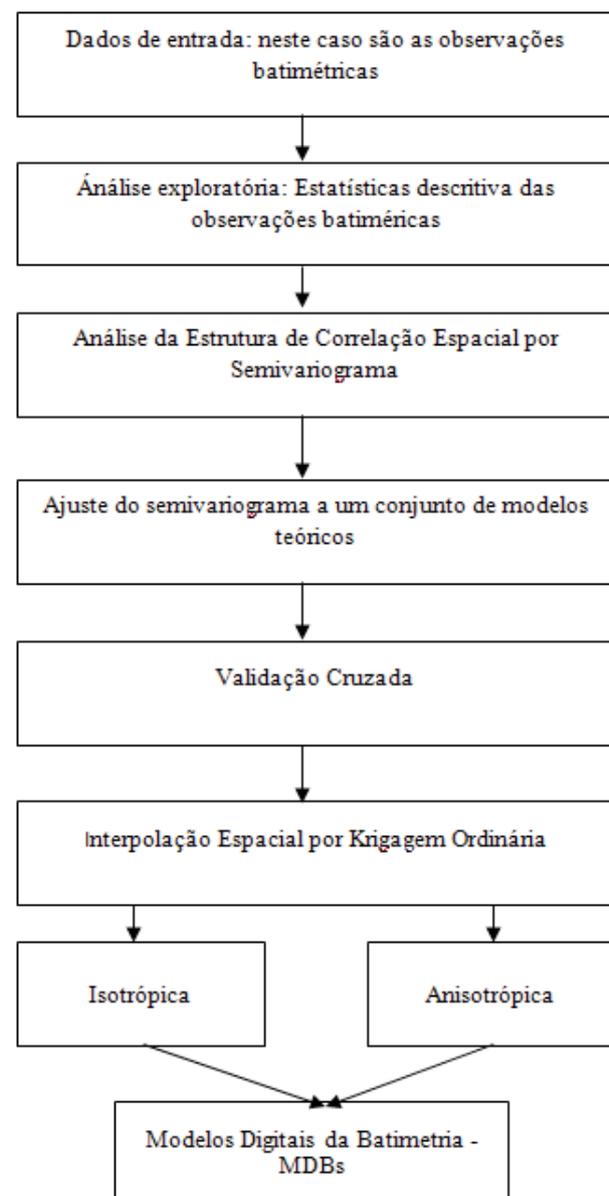


Fig. 8 - Esquema metodológico dos procedimentos geoestatísticos para interpolação das amostras dos dados batimétricos do reservatório de Sobradinho, Bahia. (Adaptado de FELGUEIRAS et. al., 2009) .

Os dados de entrada são as altitudes ortométricas da batimetria georreferenciadas, obtidas pelas profundidades diminuídas das réguas linimétricas localizadas no reservatório. Os Modelos Digitais da Batimetria (MDBs) se referem a duas superfícies decorrentes da krigagem Ordinária, considerando o comportamento isotrópico (mesma continuidade em todas as direções) e anisotrópico (apresenta continuidade diferenciada, sendo maior numa direção e menor em outra), que representam a continuidade da superfície do fundo do lago dentro dos limites da cota máxima da barragem de Sobradinho.

### **2.9 Checagem das discrepâncias**

Os erros grosseiros foram eliminados por meio de rotina de verificação dos valores máximos e mínimo, permitindo identificar valores fora desse intervalo. Segundo du Bois (2011), quando há uma grande quantidade de dados, somente os erros grosseiros podem ser identificados. Após a eliminação dos erros grosseiros foi gerada a interpolação de forma a identificar outros erros dentro da área do reservatório. O resultado dessa operação indica ausência de erros discrepantes. Depois do tratamento dos dados e incorporação de novos, é aconselhável checar se há erros subsequentes à interpolação (du BOIS, 2011).

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Aborda-se aqui a apresentação e avaliação dos procedimentos realizados para geração da superfície tridimensional do reservatório de Sobradinho. O método que apresentar melhor desempenho conforme a estatística da discrepância, poderá ser utilizado para futuros estudos hidrogeomorfológicos relacionados a volume de água e sedimentação e visando melhores resultados dos modelos, já que, conforme Warmink et al. (2011) os dados batimétricos e topográficos tem maior contribuição nas incertezas dos resultados gerados em modelos hidrodinâmicos.

Foram geradas seis superfícies batimétricas considerando os modelos de interpolação aplicados neste trabalho, visando representar as características do fundo do reservatório e avaliação dos métodos. A Figura 9 mostra a superfície batimétrica dos seis modelos.

Para realizar o recorte das superfícies batimétricas, foram utilizadas imagens Landsat TM de 2009, do mesmo ano do levantamento batimétrico. O Índice de água por diferença normalizada (NDWI) (McFEETERS, 1996) foi modelado no Spring 5.1.8 por meio de Linguagem LEGAL. Esse índice também foi utilizado por Alcântara et al. (2010) em um reservatório hidroelétrico para gerar uma máscara do corpo hídrico.

Observa-se que na região à montante, a superfície interpolada não obteve bons resultados devido ao levantamento esparsa de informações batimétricas. Isso é constatado por meio da presença de formas geométricas. O levantamento esparsa foi devido ao reservatório apresentar a montante alta densidade de macrófitas que impossibilitou a navegação. Analisando visualmente o resultado dos diferentes métodos de interpolação é possível verificar a existência de diferenças nas superfícies resultantes. As superfícies geradas a partir da krigagem se apresentam mais suaves e contínuas, enquanto que as superfícies batimétricas obtidas pelos interpoladores vizinho mais próximo, spline mitasova e média ponderada por quadrante apresentam superfícies mais truncadas sem continuidade espacial. O modelo digital da batimetria determinado a partir da rede triangular irregular e interpolador linear apresenta uma superfície mais suave e contínua, se assemelhando com as superfícies geradas por meio de interpolação geoestatística.

Diversos autores usaram algum tipo de interpolador na geração de modelo digital de elevação a partir de dados ecobatimétricos, porém sem uma justificativa para a aplicação do método em função de qual é o mais adequado para a área em estudo (HAYASHI & KAMP, 2000; WILCOX & HUETOS, 2005). HAYASHI & KAMP (2000) aplicaram o interpolador Krigagem, enquanto que WILCOX & HUETOS (2005) utilizaram o método da rede triangular irregular. Além dos algoritmos apresentado por cada modelo (Figura 9), um outro fator que pode incrementar essa diferença é o arranjo espacial dos dados batimétricos que, a depender do interpolador, pode gerar uma superfície com figuras geométricas ou mais suavizada. Em dados da superfície marítima, Noiva et al. (2010) . verificaram que o interpolador inverso

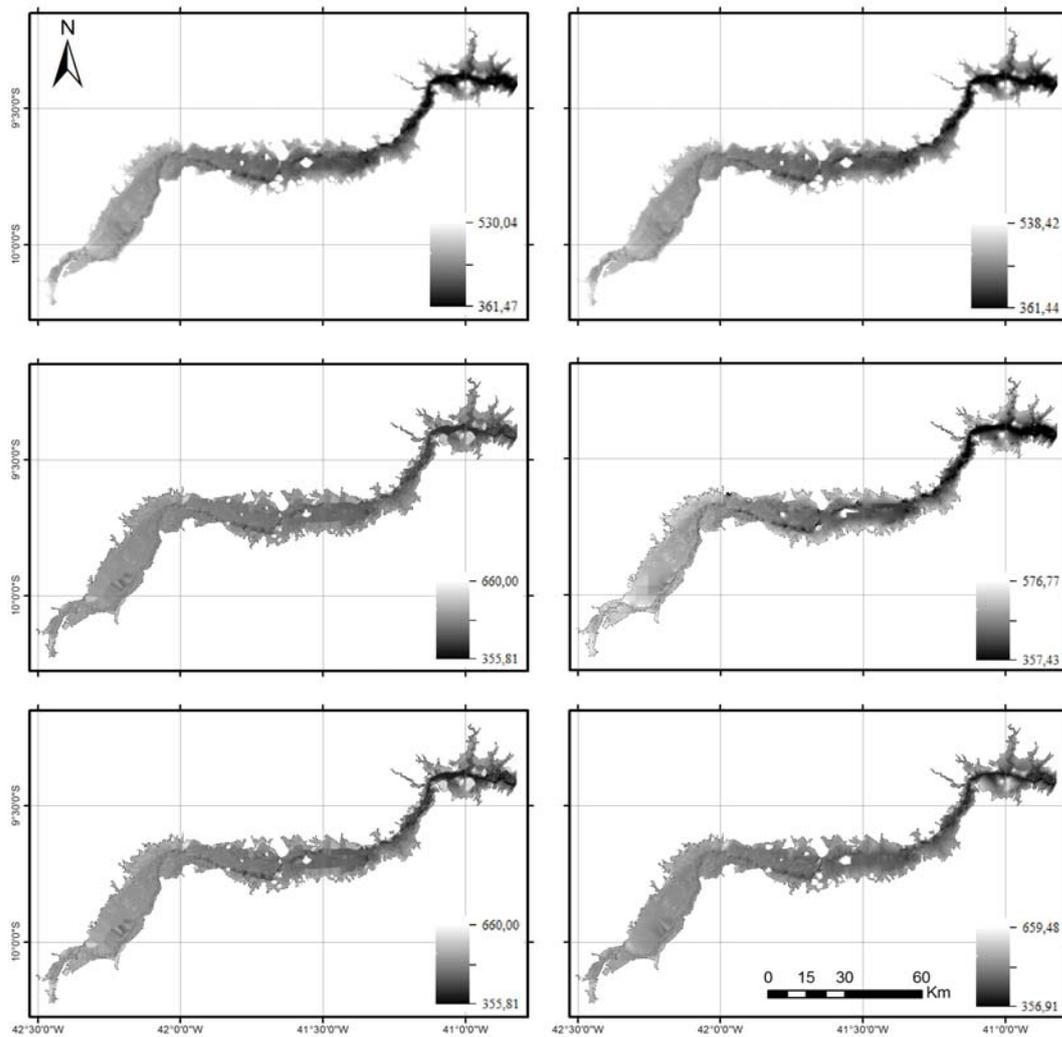


Fig. 9 - Modelos digitais da batimetria do reservatório de Sobradinho: (A) Krigagem ordinária isotrópica-KOI, (B) Krigagem ordinária anisotrópica-KOA; (C) Vizinho mais próximo-VP; (D) Spline Mitasova-SM; (E) Média ponderada por quadrante-MPQ; e (F) Rede triangular irregular linear-RTIL.

da distância ponderada gerou formas típicas denominadas de “bull’s eye” as quais ocorreram principalmente nas regiões onde o terreno apresenta maior declividade, comportamento apresentado também pelo interpolador spline. Merwade (2009) afirma que áreas circulares são causadas pela ocorrência de pontos batimétricos isolados que tem vizinhos insuficientes para gerar uma superfície razoável.

Quanto ao coeficiente de correlação, o método de interpolação que apresentou menor valor foi a krigagem ordinária anisotrópica com R de 0,76, seguido da krigagem isotrópica com R de 0,85. Em estudos batimétricos no reservatório de Itumbiara localizado entre os estados de Minas Gerais e Goiás (Brasil), com aplicação de krigagem ordinária, ALCÂNTARA

et al. (2010) obtiveram um R de 0,98. Esse valor pode estar associado à distribuição espacial dos pontos como também ao relevo suave do fundo do reservatório e a existência de forte correlação espacial.

WILCOX & HUETOS (2005) afirmam que o uso de técnicas de regressão permite determinar o quanto precisa foi a predição da batimetria. Os melhores valores do coeficiente de correlação foram em ordem decrescente da rede triangular irregular (linear) (0,92), spline mitasova (0,91), média ponderada por quadrante (0,89) e vizinho mais próximo (0,89) (Tabela 1). Conforme GOMES et al. (2007), a rede triangular irregular possui uma estrutura favorável à utilização e obtenção de valor de elevação, bem como de cálculo de áreas e distâncias. Isso pode justificar

a obtenção do melhor coeficiente de correlação desse interpolador.

A Figura 10 mostra os diagramas das amostras retiradas para validação no eixo x contra os valores estimados pelos interpoladores no eixo y.

Souza et al (2006) utilizaram 30% das amostras para quantificar o erro com base no cálculo das diferenças do desvio padrão e da média entre a interpolação e a verdade de campo. Neste estudo, é avaliado o desvio padrão, o coeficiente de correlação, a média e a raiz do erro médio quadrático, além de outras variáveis

estatísticas (Tabela 1). A Tabela 1 esboça os resultados referentes a essas variáveis em relação aos seis métodos de interpolação avaliados nesse estudo.

Os métodos de Krigagem ordinária anisotrópico e isotrópico apresentaram os valores mínimos maiores que os demais. Quanto à cota máxima, os interpoladores RTIL, MPQ e VP obtiveram valores elevados. Uma possível justificativa é que esses métodos de interpolação não geram uma equação modelada a partir do comportamento das amostras, verificando que as cotas topográficas da borda do reservatório

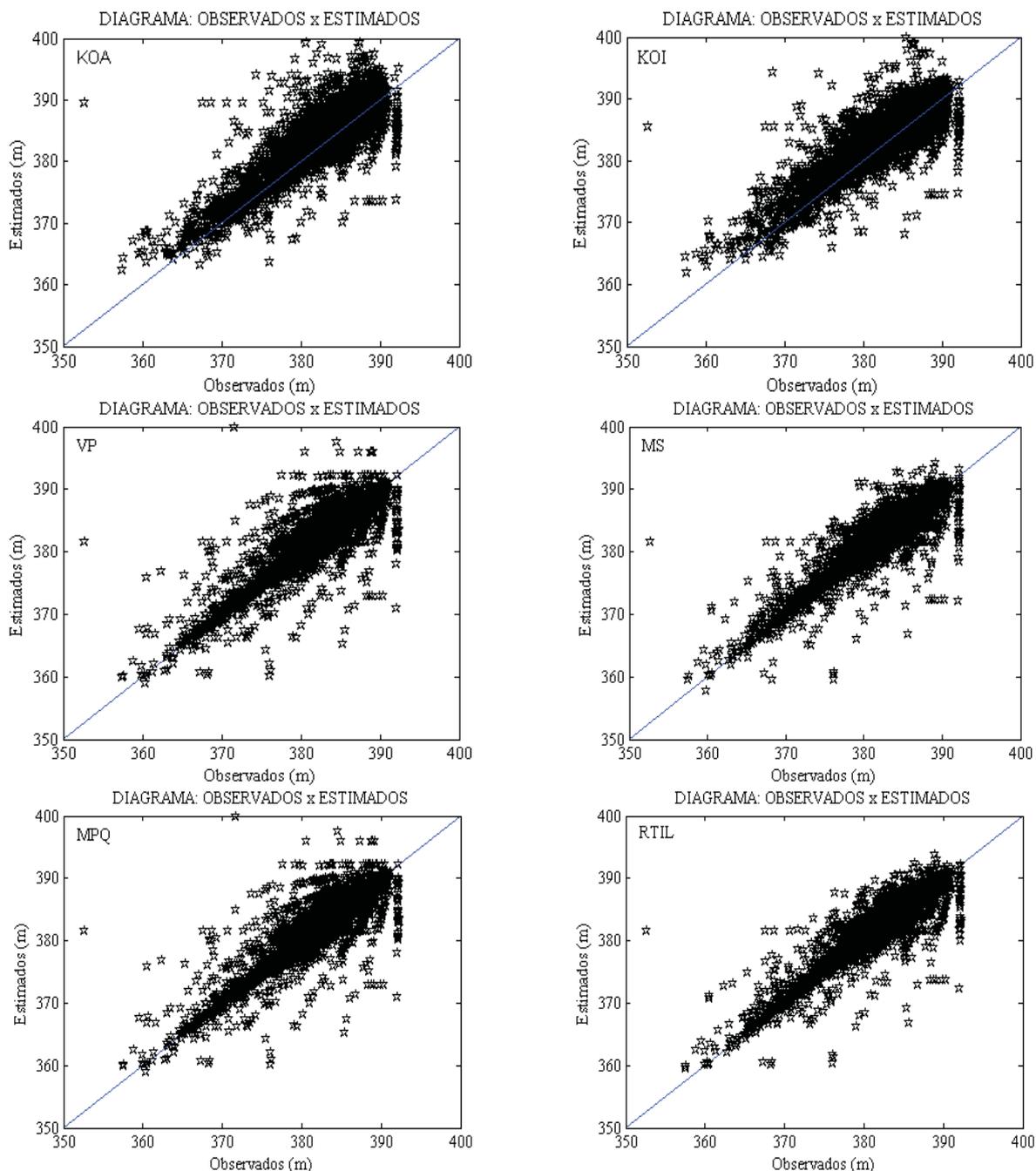


Fig. 10 - Diagramas dos dados batimétricos observados e estimados.

Tabela 1: Estatísticas dos métodos de interpolação

Interpolador	Variáveis Estatísticas				
	CMin	Cmáx	Média	R	RMSD
KOA	361,44	538,42	382,89	0,76	4,06
KOI	361,47	530,04	382,89	0,85	3,01
RTIL	356,91	659,48	383,19	0,92	2,07
SM	357,43	576,77	381,81	0,91	2,16
MPQ	355,81	660,00	382,80	0,89	2,49
VP	355,81	660,00	382,94	0,89	2,49

e de ilhas influenciaram os resultados desses modelos. Ramos & Krueger (2009) afirmam que há uma necessidade maior de integração de dados batimétricos com informações altimétricas em terra, que nesse estudo foram utilizadas para uma melhor interpolação das bordas do reservatório. As cotas máximas com menores valores foram observadas nos resultados dos métodos geoestatísticos (Tabela 1) que pode estar relacionado com o alcance espacial do interpolador. Em relação ao RMSD o método que obteve melhor resultado foi o RTIL seguido do SM com valores de 2,07 e 2,16, respectivamente, enquanto que o KOI obteve a quinta colocação apresentando RMSD igual a 3,01, e o KOA ficou na última classificação com valor de RMSD de 4,06. MERWADE (2009) em avaliação de sete interpoladores, verificou que o interpolador KOA apresentou-se na terceira classificação com RMSE de 17,12, enquanto que o método KOI ficou na quinta colocação com valor de RMSE igual a 23,91. O método que obteve menor RMSE, conforme os estudos de MERWADE (2009), foi o Spline com RMSE de 9,85. A classificação das técnicas de interpolação ficou próxima da obtida por MERWADE (2009) apesar das áreas de estudo serem diferentes no que diz respeito às dimensões dos corpos d'água e à densidade de pontos coletados.

A Tabela 2 descreve a estatística da validação aplicada aos métodos de interpolação.

Observa-se na Tabela 2 que o método RTIL e SM apresentam os melhores valores apesar da média da discrepância ser pouco maior que os métodos MPQ e VP, assemelhando com a Tabela

1, os quais obtiveram melhores coeficientes de correlação.

A Figura 11 apresenta os histogramas da distribuição da discrepância para cada método de interpolação avaliado.

Os diagramas do erro foram gerados automaticamente na validação de cada superfície resultante dos interpoladores aplicados nesse estudo com 20 intervalos e os dados exportados para ASCII. A Figura 11 mostra os erros referentes aos métodos KOA (A) e KOI (B), em que os erros médios de cada interpolador foi de 0,99 e 0,93, respectivamente, conforme Tabela 2. Por conseguinte, apresentaram maior variância e maior desvio padrão. Na Figura 11A, observa-se que por volta de 4.300 pontos de validação apresentaram erro entre -3,55 e 3,88 m, enquanto que o método RTIL (Figura 11F) classificou 3330 pontos com erro entre -0,20 e 2,23 m. Os métodos que apresentaram menores valores relacionados ao erro médio, foram MPQ e VP, sendo 0,04 para ambos. No entanto, os valores de variância e de desvio padrão, foram maiores que os apresentados pelos métodos RTIL e SM. O erro médio para o método RTIL foi de 0,088, se assemelhando com o resultado apresentado pelo interpolador SM, que foi de 0,087. Com efeito, verifica-se que esses dois últimos interpoladores apresentaram os melhores resultados.

#### 4. CONCLUSÕES

Aplicaram-se nesse estudo seis métodos de interpolação para dados batimétricos, sendo os métodos que obtiveram melhores resultados, conforme variáveis estatísticas foram o RTIL

Tabela 2: Estatísticas de validação dos métodos em relação ao erro

Variáveis Estatísticas	Interpoladores					
	KOA	KOI	RTIL	SM	MPQ	VP
Discrepância Média	0,9947	0,9313	0,0887	0,0876	0,0446	0,0446
Variância	15,5549	8,2457	4,2994	4,6919	6,2221	6,2221
$\sigma$	3,9440	2,8715	2,0735	2,1661	2,4944	2,4944

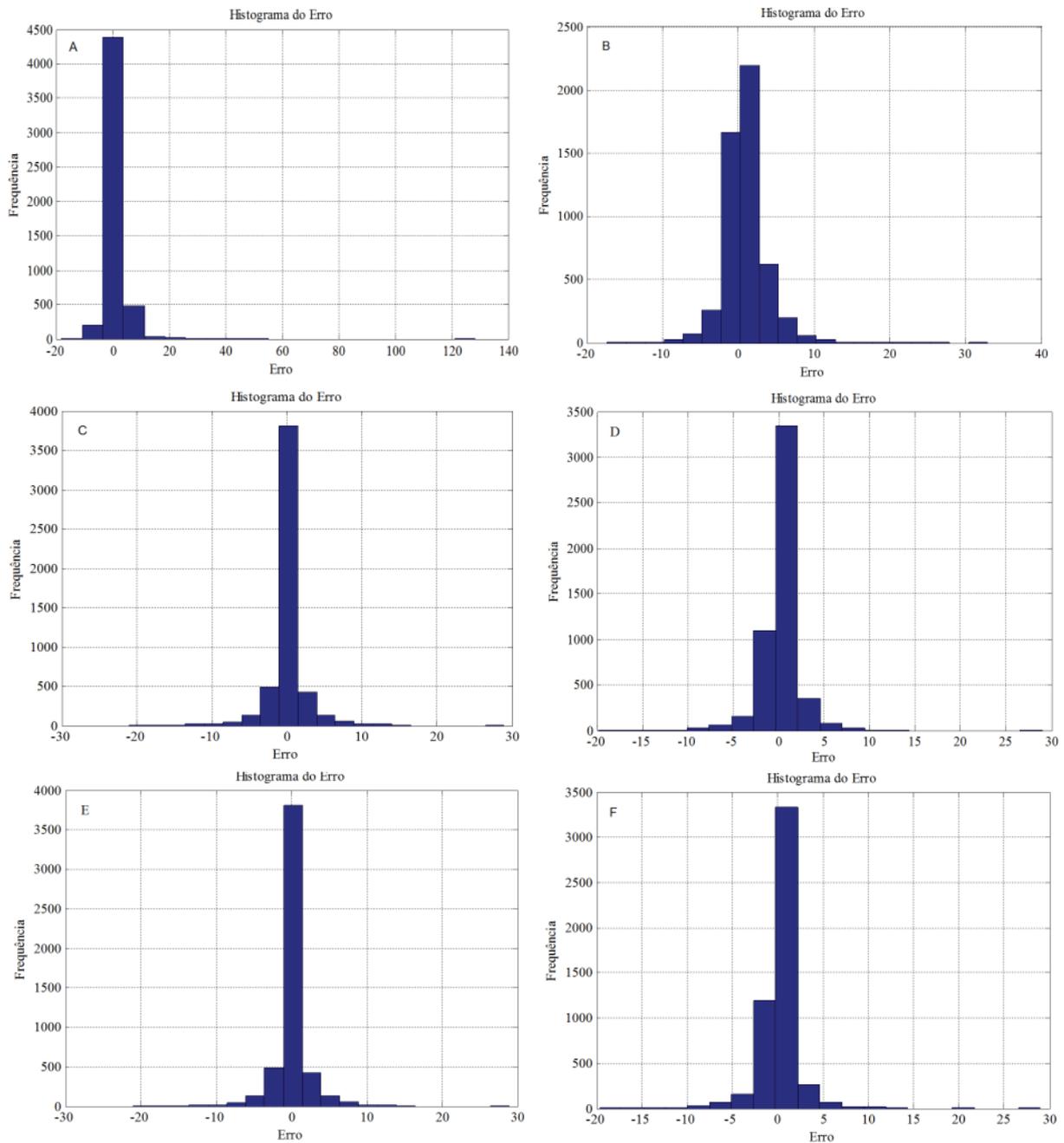


Fig. 11 - Gráficos da distribuição da discrepância (m) originada dos dados observados e estimados gerados no software Spring 5.1.8 (INPE, 2011): (A) Krigagem ordinária isotrópica-KOI, (B) Krigagem ordinária anisotrópica-KOA; (C) Vizinho mais próximo-VP; (D) Spline Mitasova-SM; (E) Média ponderada por quadrante-MPQ; e (F) Rede triangular irregular linear-RTIL.

e SM. Verificou-se que esses interpoladores apresentaram melhor coeficiente de correlação e menor erro médio quadrático, que possibilitará aplicação dessas superfícies em futuras modelagens de forma a maximizar a precisão dos resultados. Com esses interpoladores, pode-se produzir superfícies batimétricas do fundo do reservatório para estudos de volume e sedimentologia, que permitirão caracterizar geomorfologicamente, determinar taxa de sedimentação e verificar a perda da capacidade

de armazenamento.

Os métodos geoestatísticos KOA e KOI apresentaram desempenho ruim muito provavelmente devido à distribuição espacial das amostras coletadas no trabalho de batimetria e forma do reservatório. A baixa densidade de pontos em algumas áreas e a irregularidade do terreno resultou em uma baixa correlação espacial, que comprometeu o desempenho dos dois métodos. Assim, em um próximo levantamento batimétrico se deve considerar como pré-requisi-

to as cartas topográficas de antes do fechamento da barragem visando o melhor delineamento das linhas, que poderá mudar o desempenho estatístico de cada interpolador.

Verificou-se que, apesar do RTIL apresentar melhor desempenho estatístico, há ocorrência de figuras geométricas que levam a concluir pela necessidade de testes com outros métodos de tratamento dessa superfície para geração de um dado mais realístico.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é afetuosamente dedicado ao excelente profissional e grande amigo Hélio Leandro Lopes que nos deixou precocemente em abril de 2013.

Os autores agradecem à Companhia Hidroelétrica do São Francisco pelo financiamento do projeto e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão de bolsa de Desenvolvimento Científico Regional para o segundo autor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCÂNTARA, E.; NOVO, E.; STECH, J.; ASSIREU, A.; NASCIMENTO, R.; LORENZZETTI, J.; SOUZA, A. Integrating historical topographic maps and SRTM data to derive the bathymetry of a tropical reservoir. **Journal of Hydrology**, v. 389, p. 311–316, 2010.
- AJAMI, N. K.; GUPTA, H., WAGENER, T., SOROOSHIAN, S. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. **Journal of Hydrology**, v.298 n. 1–4, p. 112–135, 2004.
- BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. DE M.; MELACK, J. M.; FREITAS, R. M. DE; PEREIRA FILHO, W. Metodologia de análise da dinâmica de área e volume inundável: o exemplo da várzea do lago grande de Curuai. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 58, v. 03, p. 201-210, 2006.
- CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; CHAPLOT, V.; VOLKOFF, B.; VICTORIA, R. L.; MELILLO J. M.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. C. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. **Geoderma**, v. 123, p. 51-68, 2004.
- CHANG T.J.; BAYES T. D.; McKEEVER S. Investigating reservoir sediment and watershed erosion using a geographical information system. **Hydrological Processes**, v.17 n.5, p. 979-987, 2003.
- COVE, K.; HOGGARTH, A. Bathymetry data and metadata migration techniques. **IEEE Oceans**, p. 1-7, 2010.
- CRESSIE, N. A. C. **Statistics for Spatial Data**. Wiley, New York, 900p. 1991.
- DEMLIE, M.; AYENEW, T.; WOHNLICH, S. Comprehensive hydrological and hydrogeological study of topographically closed lakes in highland Ethiopia: The case of Hayq and Ardibo. **Journal of Hydrology**, v. 339, p. 145– 158. 2007.
- DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **GSLIB: Geostatistical software library and user's guide**. Oxford University Press, New York. 1992. 340 p.
- du BOIS, P. B. Automatic calculation of bathymetry for coastal hydrodynamic models. **Computers & Geosciences**, v. 37, 1303-1310, 2011.
- FELGUEIRAS, C. A.; CAMARGO, E. C. G.; ORTIZ, J. de A. Geoestatística e Aplicações em Geoprocessamento: Laboratório I - Geoestatística Linear, Laboratório II - Geoestatística Não Linear. INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2009. 83p.
- GOFF, J. A.; NORDFJORD, S. Interpolation of fluvial morphology using channel-oriented coordinate transformation: A case study from the New Jersey Shelf. **Mathematical Geology**, v. 36, n. 6, p. 643–658, 2004.
- GOMES, M. P.; VITAL, H.; MACEDO, J. W. de P. Aplicação da geoestatística na filtragem de dados batimétricos e altimétricos na Bacia Potiguar. **Revista de Geologia**, v. 20, n. 2, p. 243-254, 2007.
- GÜRBÜZ, A.; GÜRER, Ö. F. Anthropogenic affects on lake sedimentation process: a case study from Lake Sapanca, NW Turkey. **Environmental Geology**, v. 56, p.299–307, 2008.
- HAYASHI, M.; KAMP, G. van der. Simple equations to represent the volume–area–

- depth relations of shallow wetlands in small topographic depressions. **Journal of Hydrology**, v. 237, p. 74–85, 2000.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. SPRING 5.1.8, **Software para processamento de imagens** (Ajuda), 2011.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. R. **Applied Geostatistics**. Oxford University Press, New York. 1989.
- KRUEGER, C.P. Integração do GPS e da Ecobatimetria. **Boletim Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 5, p.55-68, 1999.
- LANE, S. N.; CHANDLER, J. H.; RICHARDS, K. S. Developments in monitoring and modeling small-scale river bed topography. **Earth Surface Processes Landform**. v.19, p.349–368, 1994.
- MACHADO, P.B.; SOUZA, A. J. A geoestatística como ferramenta de estudo da batimetria na vertente continental portuguesa. **Finisterra**, v. XXXVIII, n. 76, p 95-107, 2003.
- 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, p. 1425–1432, 1996.
- MERWADE, V. M.; MAIDMENT, D. R.; GOFF, J. A. Anisotropic considerations while interpolating river channel bathymetry. **Journal of Hydrology**, v. 331, p. 731– 741, 2006.
- MERWADE, V.M.; MAIDMENT, D.R.; HODGES, B.R. Geospatial representation of river channels. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 10, n. 3, p. 243–251, 2005.
- MERWADE, V. Effect of spatial trends on interpolation of river bathymetry. **Journal of Hydrology**, v. 371, p. 169–181, 2009.
- MITASOVA, H.; HOFIERKA, J. Interpolation by Regularized Spline with Tension: II. Application to Terrain Modeling and Surface Geometry Analysis: **Mathematical Geology**, v. 25, p. 657-669, 1993.
- NOIVA, J. G., 2009. Caracterização de estruturas tectónicas activas da região sul de Portugal com recurso a ferramentas SIG: O caso da falha de São Marcos-Quarteira. Lisboa, 98p. **Dissertação (Mestrado)** - Universidade Nova de Lisboa.
- OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. Kriging: A method of interpolation for geographical information systems. **International Journal of Geographic Information Systems**, v. 4, 313–332, 1990.
- RAMOS, A. M.; KRUEGER, C. P. Aplicação de reduções batimétricas GPS em levantamentos hidrográficos. **Boletim Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 4, p. 615-635, 2009.
- RIBEIRO NETO, A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MOURA, A. R. C.; E CIRILO, J. A. Estimativa da Evaporação no Lago de Sobradinho com o Método do Balanço de Energia. **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. São Paulo.
- SOUZA, E. C. B. de; KRUEGER, C. P.; RIBEIRO, S. R. A.; SLUTER, C. R. Método para modelagem do relevo oceânico usando redes neurais artificiais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 12, no 2, p.195-214, 2006.
- SOUZA, E. C. B. de; KRUEGER, C. P.; SLUTER; C. R. Determinação das variações volumétricas no istmo da ilha do mel utilizando PDGPS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 9, p.53-74, 2003.
- SOUZA-VIEIRA, S. R. de; HARTMANN, C. Modificação marginal das ilhas estuarinas usando ferramentas de aerofotografia, sedimentologia e batimetria. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 60, n.04, p.307-318, 2008.
- TRAUTH, M. H. **MATLAB: Recipes for Earth Sciences**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 2010. 336p.
- TURCOTTE, R.; FORTIN, J. P.; ROUSSEAU, A. N.; MASSICOTTE, S.; VILLENEUVE, J. P. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. **Journal of Hydrology**, v. 240, n.3–4, p. 225–242, 2001.
- Van RIJN, L. C. Sediment transport and budget of the central coastal zone of Holland. **Coastal Engineering**, v.32, p.61–90, 1997.
- WHEELER, p. j.; PETERSON, J. A.; GORDON-BROWN, L. Channel dredging trials at Lakes Entrance, Australia: A GIS-Based approach form monitoring and assessing bathymetric change. **Journal of Coastal Research**, v.26, n. 6, p. 1085-1095, 2010.

WILCOX, C.; HUERTOS, M. L. A simple, rapid method for mapping bathymetry of small wetland basins. **Journal of Hydrology**, v. 301, p. 29–36, 2005.

WARMINK, J. J.; H. KLIS, V. DER; BOOIJ, M. J.; HULSCHER, S. J. M. H. Identification and Quantification of Uncertainties in a Hydrodynamic River Model Using Expert Opinions.

**Water Resources Management**, v. 25, p. 601–622, 2011.

WRIGHT, D. J.; BLOOMER, S. H.; MacLEOD, C. J.; TAYLOR, B.; GOODLIFE, A.M. Bathymetry of the Tonga trench and Forearc: a map series. **Marine Geophysical Researches**, v. 21, p. 489-511, 2000.