UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL

ARTUR JOSÉ SOARES MATOS

Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional "CAV-NH"

São Carlos – SP

2012

ARTUR JOSÉ SOARES MATOS

Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional "CAV-NH"

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo – EESC/USP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental.

ORIENTADOR: Professor Dr. Frederico Fabio Mauad

São Carlos – SP

2012

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M433m

Matos, Artur José Soares
Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional CAV-NH. / Artur José Soares Matos; orientador Frederico Fabio Mauad, 2012.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia Ambiental)— Escola Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Batimetria. 2. Reservatório. 3. Cota-área-volume. 4. IMP. 5. CAV-NH. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ARTUR JOSÉ SOARES MATOS.**

Título da tese: "Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional CAV-NH".

Data da defesa: 23/08/2012

Comissão Julgadora:	**Resultado:**
Prof. Dr. **Frederico Fabio Mauad (Orientador)** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	Aprovado
Prof. Associado **Francisco Arthur da Silva Vecchia** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	Aprovado
Prof. Dr. **Augusto Nelson Carvalho Viana** (Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI)	Aprovado
Prof. Dr. **Alexandre Augusto Barbosa** (Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI)	Aprovado
Prof. Dr. **João Luiz Boccia Brandão** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental:
Prof. Dr. **Frederico Fabio Mauad**

Suplente do Presidente da Comissão de Pós-Graduação em Exercício:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Agradecimentos

Agradeço à Deus.

Ao meu orientador Frederico Fabio Mauad pela oportunidade e pela confiança.

Ao amigo Marcus Vinícius Estigoni por toda ajuda e apoio.

À minha esposa Mariana de Freitas Matos por todo apoio, compreensão e ajuda.

À Elizabeth Guelman Davis e ao Marcio de Oliveira Candido por todo apoio e compreensão.

Aos amigos do Núcleo de Hidrometria e do CRHEA pela amizade.

Ao Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada – CRHEA pela oportunidade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ pela concessão da bolsa de doutorado para realização desta pesquisa

Ao Serviço Geológico do Brasil – CPRM pelo apoio.

Muito Obrigado!

"Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil - e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos".

Albert Einstein

RESUMO

MATOS, A. J. S. **Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional "CAV-NH".** 2012. 125p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos – SP, 2012.

A água doce é um recurso mineral finito e essencial para sustentar a vida na terra. Para um bom gerenciamento dos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica é importante que se conheça a curva Cota-Área-Volume (CAV) dos reservatórios. Concessionárias de energia e empresas públicas se pautam nesta relação em suas tomadas de decisões considerando os usos múltiplos que os reservatórios apresentam atualmente. Devido ao processo de assoreamento que o reservatório apresenta, é necessário que esta relação seja atualizada com certa frequência, tendo como base os levantamentos batimétricos atualizados. Entretanto, quanto maior o espaçamento entre as seções batimétricas maiores são as falhas que a modelagem do terreno apresenta e maiores os erros que as curvas CAV apresentam. Este estudo visa aprimorar os procedimentos realizados para modelagem de dados batimétricos em reservatórios, apresentando o método denominado Inserção de Malha de Pontos (IMP), que gera uma malha de pontos entre as seções levantadas corrigindo os efeitos de borda gerados pelo interpolador TIN. Com o intuito de otimizar e reduzir o tempo de obtenção dos resultados também é apresentada a ferramenta computacional CAV-NH, desenvolvida em linguagem Python, que utiliza a biblioteca do Arcgis 9.3 para realizar a modelagem do terreno e calcular a curva CAV como resultado final. Para a avaliação e validação do método foi realizada uma batimetria detalhada do reservatório do Lobo-SP, com intervalos entre as seções batimétricas de 10 metros, a qual foi comparada com diferentes espaçamentos até o intervalo de 600 metros. O método também foi aplicado aos reservatórios de Bariri e Ibitinga para a verificação de sua eficácia. Para todos os 1830 casos analisados houve uma melhora significativa na precisão, tendo uma redução no erro do volume calculado maior que 50% para o caso do distanciamento de 200 metros entre as seções, para a cota 703 metros. As análises indicam que o método IMP provê uma modelagem mais condizente com o relevo do terreno de fundo, obtendo-se uma maior acurácia e possibilitando a diminuição do trabalho de coleta de dados em campo sem prejudicar o cálculo do volume do reservatório. O CAV-NH foi utilizado em todas as simulações e se mostrou uma ferramenta de fácil utilização, proporcionando uma maior agilidade em todo processo. Conclui-se que o método IMP juntamente com a ferramenta computacional CAV-NH são importantes contribuições para a definição de uma curva Cota-Área-Volume de qualidade, sendo esta de grande importância para sistemas de suporte à decisão e para um bom gerenciamento dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Batimetria. Reservatório. Cota-Área-volume. IMP. CAV-NH.

ABSTRACT

MATOS, A. J. S. **Qualitative improvements in the modeling of bathymetric survey in reservoirs through computational tool "CAV-NH".** 2012. 125p. Thesis (Ph.D.) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo. São Carlos – SP, 2012.

Freshwater is a finite mineral resource and essential for sustaining life on earth. For proper water resource management in the watershed, it is important to know the reservoir's Elevation-Area-Volume (EAV) curve. Energy companies and government agencies use this curve for their decision-making, considering the multiple uses of the reservoirs. Due to the reservoir sedimentation process, it is necessary to update this curve frequently, based on the bathymetric surveys. However, a greater space between transects causes failures in the terrain model and also in the EAV curve. This study aims to improve the procedures used for modeling reservoir survey data, introducing the method called Insertion of Mesh Points (IMP), that generates a mesh of points between transects correcting the edge effects caused by TIN interpolation. In order to optimize and reduce work time for obtaining the results, a computational tool CAV-NH, which was developed in Python language, is also presented. It employs the Arcgis 9.3 library to generate the terrain model and obtain the EAV table. For the evaluation and validation of the method, a detailed bathymetry of the Lobo reservoir was carried out, with 10 meter intervals of survey lines, which was compared with different survey lines spacing up to 600 meters. To verify its effectiveness the method was also applied to Bariri and Ibitinga reservoirs. For all 1830 cases analyzed there was a significant accuracy improvement. For the case of 200 meter line spacing and 703 meters elevation, the error of volume obtained was reduced by more than 50%. The analysis showed that the IMP method provides a terrain model more suited, resulting in greater accuracy and allowing the work reduction of reservoir survey without affecting the volume calculation. The CAV-NH was used in all simulations and proved an easy tool to use, providing greater agility in the whole process. It is concluded that the IMP method and the computational tool CAV-NH are important contributions to achieve a quality relationship of elevation-area-volume.

Keywords: Bathymetry . Reservoir. Elevation-Área-volume. IMP. CAV-NH.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Planejamento de seções batimétricas (HEINEMANN, 1963).....25

Figura 2 - Equipamentos utilizados na década de 1930 (EAKIN, 1939). 26

Figura 3 - Esquema de operação de equipamentos considerados modernos em 1985 para levantamento hidrográfico (BRUK, 1985).....27

Figura 4 - Ecobatímetro multifeixe e de feixe único (FURNANS; AUSTIN, 2008b).....28

Figura 5 – Número de transectos versus a área do reservatório (BLANTON, 1982). 30

Figura 6 - Exemplo da alocação de seções batimétricas (BLANTON, 1982).....31

Figura 7- Self Similar Interpolation – (A) TIN gerado somente com os transectos; (B) Pontos coletados (preto) e seções interpoladas (vermelho); (C) TIN gerado com as seções interpoladas. (Fonte: FURNANS; AUSTIN, 2008b).....37

Figura 8 - Detalhes do modelo digital de terreno e TIN gerados para o reservatório de Bariri entre duas seções batimétricas (MATOS et al., 2011).....38

Figura 9 - Vista da barragem da represa do Lobo.....41

Figura 10 - Reservatório do Lobo – UGRH 13 – SP.....42

Figura 11 - Localização do reservatório de Bariri. 43

Figura 12 - Barragem da usina de Bariri.....44

Figura 13 - Localização do reservatório de Ibitinga.....45

Figura 14 - Construção do reservatório de Ibitinga. 46

Figura 15 - Ecobatímetro modelo BATHY-500MF da fabricante SyQwest. Inc.....47

Figura 16 – (a)Transdutor modelo P/N P01540 e (b) barco com ecobatímetro realizando varredura. 48

Figura 17 - Tela do Hypack durante a coleta de dados.....50

Figura 18 - Receptor GPS GS20 e antena externa AT 201. 51

Figura 19 - Planejamento do levantamento batimétrico com distanciamento entre as seções transversais de 10 metros. 52

Figura 20 - Anteparo utilizado no Bar check.....53

Figura 21 – Correção dos erros do sinal do ecobatímetro no Hypack. 54

Figura 22 - Imagem CBERS do reservatório do Lobo. 56

Figura 23 - Contorno do reservatório obtido pela imagem CBERS. 57

Figura 24 – Diferentes espaçamentos entre os transectos para o reservatório de Bariri, de 500m (A), 1000m (B), 1500m (C). 58

Figura 25 – Diferentes espaçamentos entre os transectos para o reservatório de Ibitinga, de 500m (A), 1000m (B), 1500m (C). 59

Figura 26 - Polígono gerado (B) a partir dos pontos do contorno da batimetria (A). 60

Figura 27 - Batimetria (A) e TIN gerado (B). 60

Figura 28 - TIN (A) e Raster (B). 61

Figura 29 - Raster (A) e Raster delimitado pelo contorno da batimetria (B). 61

Figura 30 - Raster delimitado pelo contorno da batimetria (A) e malha de pontos (B). 62

Figura 31 – MDT final do reservatório utilizando o método IMP. 62

Figura 32 - Dispersão das coordenadas geodésicas no dia 17/05/2010 das 14:23h às 14:33h. 65

Figura 33 - Dispersão das coordenadas geodésicas no dia 20/05/2010 das 16:03h às 16:48h. 66

Figura 34 - Dispersão das coordenadas geodésicas no dia 20/05/2010 das 16:52h às 17:20h. 66

Figura 35 - Configurações da ferramenta computacional CAV-NH. 68

Figura 36 - Módulo 1 da ferramenta computacional CAV-NH. 68

Figura 37 - Módulo 2 da ferramenta computacional CAV-NH. 69

Figura 38 - Módulo 3 da ferramenta computacional CAV-NH. 70

Figura 39 - Módulo 4 da ferramenta computacional CAV-NH. 71

Figura 40 - Distanciamento entre as seções batimétricas. (A)10 metros; (B) 100 metros; (C) 200 metros; (D) 300 metros; (E) 400 metros; (F) 500 metros; (G) 600 metros. 73

Figura 41 - Faces dos triângulos gerados pelo TIN para os diferentes distanciamentos entre as seções batimétricas resultantes do método tradicional. (A)10 metros; (B)

100 metros; (C) 200 metros; (D) 300 metros; (E) 400 metros; (F) 500 metros; (G) 600 metros. 74

Figura 42 - TIN resultante da batimetria com distanciamentos de 10 metros (A) e 100 metros (B) utilizando o método tradicional 75

Figura 43 - TIN resultante da batimetria com distanciamentos de 200 metros (A) e 300 metros (B) utilizando o método tradicional 75

Figura 44 - TIN resultante da batimetria com distanciamentos de 400 metros (A); 500 metros (B) e 600 metros (C) utilizando o método tradicional 76

Figura 45 - Variação do volume calculado com o método TIN tradicional para os diferentes distanciamentos em relação ao nível do reservatório para as cotas 703, 701 e 699 m. 78

Figura 46 - Variação do volume calculado com o método TIN tradicional para os diferentes distanciamentos em relação ao nível do reservatório para as cotas 697, 695 e 693 m. 79

Figura 47 - Variação percentual do volume, para as cotas 703, 699 e 695 metros, calculado pelo método TIN tradicional. 79

Figura 48 - Faces dos triângulos gerados pelo TIN para os diferentes distanciamentos entre as seções batimétricas resultantes do método IMP. (A) 10 metros; (B) 100 metros; (C) 200 metros; (D) 300 metros; (E) 400 metros; (F) 500 metros; (G) 600 metros. 80

Figura 49 - TIN resultante da batimetria com distanciamento de 10 metros (A) e 100 metros (B) utilizando o método IMP 81

Figura 50 - TIN resultante da batimetria com distanciamento de 200 metros (A) e 300 metros (B) utilizando o método IMP 81

Figura 51 - TIN resultante da batimetria com distanciamento de 400 metros (A); 500 metros (B) e 600 metros (C) utilizando o método IMP 82

Figura 52 - Variação do volume calculado com o método IMP para os diferentes distanciamentos em relação ao nível do reservatório para as cotas 703, 701 e 699 metros. 84

Figura 53 - Variação do volume calculado, com o método IMP, para os diferentes distanciamentos em relação ao nível do reservatório para as cotas 697, 695 e 693 metros. 84

Figura 54 - Variação percentual do volume, para a cota 703 metros, gerado pelo método IMP. 85

Figura 55 - Variação percentual do volume, para a cota 699 metros, gerado pelo método IMP. 85

Figura 56 - Variação percentual do volume, para a cota 695 metros, gerado pelo método IMP. 86

Figura 57 – Comparação da variação dos volumes calculados com o método IMP e TIN tradicional para os diferentes distanciamentos em relação ao nível do reservatório para as cotas 703, 701 e 699 metros. 87

Figura 58 – Comparação da variação dos volumes calculados com o método IMP e TIN tradicional para os diferentes distanciamentos em relação ao nível 697 metros do reservatório. 87

Figura 59 – Comparação da variação dos volumes calculados com o método IMP e TIN tradicional para os diferentes distanciamentos em relação ao nível 695 metros do reservatório. 88

Figura 60 – Comparação da variação percentual do volume, para a cota de 703 metros, calculados pelos métodos IMP e TIN tradicional..... 89

Figura 61 – Comparação da variação percentual do volume, para a cota de 699 metros, calculados pelos métodos IMP e TIN tradicional..... 89

Figura 62 – Comparação da variação percentual do volume, para a cota de 695 metros, calculados pelos métodos IMP e TIN tradicional..... 90

Figura 63 - Correlação entre o método IMP e TIN tradicional para os 1830 diferentes casos para a cota 703 metros. 91

Figura 64 - Correlação entre o método IMP e TIN tradicional para os 1830 diferentes casos para a cota 695 metros. 92

Figura 65 - Curva Cota-Área-Volume do reservatório do Lobo calculado pelo método IMP. 93

Figura 66 - Detalhes dos MDTs gerados para o reservatório de Bariri com espaçamento entre os transectos de 500m, pelo método TIN tradicional (A) e pelo o método IMP (B). 95

Figura 67 - Detalhes dos MDTs gerados para o reservatório de Bariri com espaçamento entre os transectos de 1000m, pelo método TIN tradicional (A) e pelo o método IMP (B). 96

Figura 68 - Detalhes dos MDTs gerados para o reservatório de Bariri com espaçamento entre os transectos de 1500m, pelo método TIN tradicional (A) e pelo o método IMP (B). 96

Figura 69 - TIN obtido para diferentes distanciamentos entre os transectos para o reservatório de Ibitinga. A) 500 metros. B) 1000 metros. C) 1500 metros. D) 1500 metros com método IMP. 98

Figura 70 - Detalhes dos MDTs gerados para o reservatório de Ibitinga com espaçamento entre os transectos de 500m, pelo método TIN tradicional (A) e pelo método IMP (B)..99

Figura 71 - Detalhes dos MDTs gerados para o reservatório de Ibitinga com espaçamento entre os transectos de 1000m, pelo método TIN tradicional (A) e pelo método IMP (B). 100

Figura 72 - Detalhes dos MDTs gerados para o reservatório de Ibitinga com espaçamento entre os transectos de 1500m, pelo método TIN tradicional (A) e pelo método IMP (B). 100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distanciamento das seções transversais (CARVALHO et al., 2000). 32

Tabela 2 - Máximo erro permitido em levantamentos batimétricos (FERRARI; DOROUGH, 1996 apud WMO, 2003). 33

Tabela 3 - Variação do volume para diferentes configurações de espaçamento utilizando o método tradicional para a cota 703,0 m.....77

Tabela 4 - Variação do volume para diferentes configurações de espaçamento utilizando o método de Inserção da Malha de Pontos (IMP) para a cota 703,0 m. 83

Tabela 5 - Comparação dos volumes calculados pelos métodos TIN tradicional e IMP.....92

Tabela 6 - Características morfométricas do reservatório do Lobo.....94

Tabela 7 - Variação dos volumes obtidos pelo método TIN tradicional (1) e método IMP (2) para os diferentes distanciamentos entre os transectos 97

Tabela 8 - Variação de volume sem a inserção da malha de pontos (1) e com a inserção da malha de pontos (2) para os diferentes distanciamentos entre os transectos.....101

Tabela 9 - Área e extensão dos reservatórios. 102

Tabela 10 - Distanciamento entre as seções batimétricas. 102

Tabela 11 – Volume calculado com espaçamento de 200 metros para o reservatório do Lobo. 103

Tabela 12 – Variação percentual do volume calculado com espaçamento de 200 metros para o reservatório do Lobo. 104

Tabela 13 - Relação Cota-Área-Volume para o reservatório do Lobo-SP (continua) 115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CAV - Cota-Área-Volume

CAV-NH - Cota-Área-Volume Núcleo de Hidrometria

CRHEA - Centro de Recursos Hidricos e Ecologia Aplicada

DGPS - Sistema de Posicionamento Global Diferencial

DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil

DOP - Dilution of precision

EESC - Escola de Engenharia de São Carlos

Esri - Environmental Systems Research Institute

GNSS - Global Navigation System Satellite

IMP - Inserção de Malha de Pontos

MDT - Modelo Digital de Terreno

ODEC - Ocean Data Equipament

ONS - Operador Nacional do Sistema

PCH - Pequena Central Hidroelétrica

PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos

SIG - Sistema de Informações Geográficas

SSD - Sistema de Suporte a Decisão

TIN - Triangulated Irregular Network

UHE - Usina Hidroelétrica

UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

USACE - United States Army Corps of Engineers

USBR - Bureau of Reclamation, U. S. Departament of the Interior, Denver, Colorado/USA

USGS - United States Geological Survey

USP - Universidade de São Paulo

UTM - Universal Transverse Mercator

WMO - World Meteorological Organization

SUMÁRIO

1. Introdução 15
2. Objetivos 20
2.1. Objetivo geral 20
2.2. Objetivos específicos 20
3. Revisão Bibliográfica 21
3.1. Assoreamentos de reservatórios 21
3.2. Levantamento batimétrico em reservatórios 24
3.2.1. Método de Levantamento do contorno 24
3.2.2. Método de Levantamento de linhas topobatimétricas 24
3.2.3. Tecnologias aplicadas 26
3.2.4. Planejamento das seções batimétricas 29
3.2.5. Métodos de cálculo do volume 35
3.3. Legislação Brasileira 38
3.3.1. Resolução ANEEL Nº 396 de 1998 38
3.3.2. Resolução conjunta ANEEL-ANA Nº 003 de 2010 39
4. Materiais e Métodos 41
4.1. Reservatório do Lobo 41
4.2. Reservatório de Bariri 43
4.3. Reservatório de Ibitinga 45
4.4. Equipamentos e Softwares utilizados 47
4.4.1. Ecobatímetro 47
4.4.2. Arcgis 9.3 48
4.4.3. Python 49
4.4.4. Hypack Hydrographic Survey 50
4.4.5. Global Navigation System Satellite – GNSS 51
4.5. Levantamentos Batimétricos 52
4.5.1. Reservatório do Lobo 52
4.5.2. Levantamento do contorno do reservatório 55
4.5.3. Reservatório de Bariri 57
4.5.4. Reservatório de Ibitinga 58
4.6. Inserção de Malha de Pontos (IMP) 59
5. Resultados e discussão 65

5.1. Global Navigation System Satellite – GNSS 65
5.2. Ferramenta computacional CAV-NH 67
5.3.1. Método de modelagem TIN tradicional 73
5.3.2. Método de Inserção de Malha de Pontos (IMP) 80
5.3.1. Comparação das modelagens pelo método IMP e pelo método TIN tradicional 86
5.3.2. Resultado da batimetria do reservatório do Lobo 93
5.4. Bariri 94
5.5. Ibitinga 98
5.6. Análise da Orientação ANA (2011) 101
6. Conclusões 106
7. Recomendações 109
8. Referências 110
Apendice A - Relação Cota-Área-Volume para o Reservatório do Lobo-SP ... 115
Apendice B - Código Fonte CAV-NH 117

1. Introdução

A água doce é considerada um recurso mineral finito, vulnerável, essencial para sustentar a vida e um bem econômico, a partir da Conferência Internacional sobre a Água e o Meio Ambiente realizada em Dublin em 1992 (THE DUBLIN..., 1992).

O Brasil, detentor de 20% da água doce do planeta, tem sua primeira legislação sobre o assunto, o "Código das Águas", datado de 1934 (BRASIL, 1934). Mas somente a partir de 1997, com a criação da "Política Nacional de Recursos Hídricos" (PNRH) instituída pela Lei Nº 9.433/97 (BRASIL, 1997), foram incorporados os conceitos de gestão de demanda, gestão da qualidade das águas nos modelos de gerenciamento de recursos hídricos e gestão ambiental de bacias hidrográficas. Tundisi (2003) afirma que a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos representa um avanço conceitual muito importante.

Um elemento a ser considerado no gerenciamento de recursos hídricos são os reservatórios de água, tanto de usinas hidroelétricas como de abastecimento de água e/ou de usos múltiplos. Estes atuam na bacia hidrográfica, reservando água da estação chuvosa para ser usada em estações onde a chuva é menos pronunciada, proporcionando assim um aumento na oferta deste recurso. No caso do uso para geração de energia elétrica, o armazenamento de água pode ser considerado como um armazenamento de energia. O volume útil do reservatório, que é efetivamente destinado à geração de energia, é avaliado e definido na fase de seu pré-enchimento, sendo esta relação cota/volume utilizada durante sua operação.

A intervenção humana, ao construir reservatórios, transforma ambientes lóticos em ambientes lênticos. Consequentemente o fluxo de água que chega ao reservatório perde energia cinética e ganha energia potencial, num processo onde a velocidade diminui gradualmente. Com a diminuição de velocidade, materiais em suspensão que antes eram carreados pelo fluxo começam a se depositar, primeiro os materiais maiores e mais pesados, e posteriormente os mais finos e leves. Estes materiais depositados no fundo do

reservatório são provenientes de processos erosivos, naturais e/ou antrópicos, que ocorrem dentro da sua bacia de contribuição.

Os reservatórios atuam como verdadeiros filtros de sedimentos e iniciam assim o seu processo de assoreamento. Com o passar do tempo, o acúmulo de sedimento muda o seu relevo de fundo e este não mais condiz com o levantamento realizado na fase de pré-enchimento, sendo necessária a reavaliação destes dados. Portanto, a curva Cota-Área-Volume (CAV) deve ser atualizada periodicamente.

A relação CAV é uma variável básica para a definição de regras operacionais de reservatórios, de análises de disponibilidade e demanda, de modelos de otimização e de sistemas de suporte a decisão (SSD) dentro da bacia hidrográfica. É também utilizada para a determinação de volume de reservatórios em sistemas de controle de cheias e abastecimento de água.

As concessionárias de energia, ou o próprio ONS (Operador Nacional do Sistema), tendo em mãos o binômio Cota-Volume desatualizado, podem avaliar erroneamente algumas informações, como a estimativa de vida útil do aproveitamento hidroelétrico, a sua capacidade de gerar energia em certos períodos, dentre outras variáveis. Distorções na determinação do volume, tanto em seu volume morto quanto no volume útil, impactam diretamente o gerenciamento do reservatório e representam variações na capacidade de geração de energia e nas receitas geradas.

Alguns procedimentos, para o controle e monitoramento do processo de assoreamento a serem adotados pelas concessionárias de energia elétrica, são estabelecidos pela Resolução Conjunta Nº 03 de 10/08/2010 da Agência Nacional de Energia Elétrica e a Agência Nacional das Águas (ANEEL/ANA, 2010). Dentre estes, ela estabelece que devam ser atualizadas as curvas cota-área-volume para fins de avaliação do processo de assoreamento de reservatórios, onde estabelece também que estas curvas devem ser atualizadas a cada 10 anos.

A ANEEL também disponibiliza um livro eletrônico abordando a avaliação de assoreamento em reservatórios, discorrendo sobre os métodos, especificações e os cálculos deste levantamento (CARVALHO et al., 2000). Estes procedimentos são baseados principalmente em referências como Vanoni (1977), Icold (1989) e Carvalho (1994). Estes

autores abordaram com muita propriedade o assunto, entretanto o uso de novas tecnologias, equipamentos, softwares e um grande avanço na capacidade de processamento de dados requerem que estes procedimentos sejam mais bem avaliados e readaptados à nova realidade.

A ANA também disponibilizou um documento de orientação para a atualização das curvas cota-área-volume (ANA, 2011), contudo este também possui lacunas que devem ser observadas e preenchidas.

A determinação do número de seções batimétricas a serem levantadas e a posterior metodologia para o cálculo do volume aliada a utilização de novas tecnologias é um tema ainda a ser discutido. Autores e instituições de pesquisa que são tomados como guias no assunto apresentam métodos distintos. Estes serão apresentados nas subseções 3.2.4 e 3.2.5.

No que tange ao cálculo do volume utilizando softwares atuais de geoprocessamento o método mais amplamente utilizado e recomendado pela literatura atual faz uso do método TIN (Triangulated Irregular Network). Entretanto, baseado na experiência prática do Núcleo de Hidrometria do CRHEA/EESC/USP foi observado que este método não representa bem as regiões próximas às bordas do reservatório causando uma perda de volume no cálculo final.

Tendo em vista os problemas citados, este trabalho apresenta uma ferramenta computacional para a obtenção da relação Cota-Área-Volume denominada “CAV-NH”. Também é apresentado um novo método denominado IMP – Inserção de Malha de Pontos – que visa reduzir os erros de bordas na modelagem do reservatório.

A ferramenta CAV-NH possui quatro módulos. Cada módulo tem como produto a tabela cota-área-volume (CAV) calculada de maneira distinta. Os dois primeiros fazem uso da forma convencional de cálculo do TIN e os dois últimos fazem uso do método IMP, diferindo por exigirem diferentes dados de entrada.

Este estudo visa avaliar também a representatividade que os diferentes espaçamentos das linhas batimétricas possuem quanto ao relevo real do terreno. A obtenção de dados primários para um estudo desta natureza corresponde a um levantamento extremamente detalhado do fundo do reservatório para se adotar como referência de relevo para

comparações e análises, sendo este o mais próximo possível do relevo real. Com este propósito, foi realizado um levantamento batimétrico no reservatório do Lobo, situado na cidade de Itirapina-SP utilizando um espaçamento de 10m entre as seções, onde o método IMP foi aplicado e validado. Após sua validação este foi também aplicado aos reservatórios de Bariri e Ibitinga, situados na bacia do rio Tiête-SP, exemplificando a melhoria dos resultados mesmo utilizando uma menor quantidade de dados coletados.

Os dados da batimetria foram pós-processados utilizando o software HYPACK Hydrographic Survey, onde foram tratados erros grosseiros, sistemáticos e aleatórios, do sinal do ecobatímetro e erros relativos ao processo de medição.

Os MDTs (Modelos Digitais de Terreno) foram gerados com a utilização do software Arcgis 9.3. Esta modelagem vale-se do método de interpolação TIN que faz uso do método *Constrained Delaunay Triangulation*, o qual permite uma melhor representação de feições como fundos de vale, drenagens, divisores de água e feições mais agudas, sendo também empregado para melhor representar o relevo do canal do leito do rio submerso no reservatório.

Posteriormente, foram gerados 3660 MDTs para os diversos distanciamentos dos transectos e calculadas as relações Cota-Área-Volume, com e sem o uso do método IMP, utilizando a ferramenta computacional CAV-NH. Verificou-se que a método de modelagem proposto apresentou uma redução no erro maior que 50% em relação ao volume obtido pela modelagem tradicional, que faz o uso somente da geração do TIN sem nenhum tratamento adicional.

O método foi também aplicado aos reservatórios de Bariri e Ibitinga, onde também foi verificada a sua eficácia.

O método IMP (Inserção de Malha de Pontos) melhora consideravelmente a geração do MDT do reservatório, e consequentemente diminuem os erros na determinação da relação cota-área-volume. Deste modo, a ferramenta computacional CAV-NH processa os dados da batimetria de maneira prática e eficaz reduzindo o tempo de trabalho.

O presente texto está organizado em seis seções. A primeira é a parte introdutória onde é apresentada uma visão geral do trabalho. Em seguida, na segunda seção, são

apresentados os objetivos gerais e específicos. O terceiro é a revisão bibliográfica, onde é apresentada uma revisão dos métodos utilizados, desde 1939 até os dias atuais, na determinação de volume e assoreamento de reservatórios. Posteriormente, na quarta seção, são apresentados os materiais e os métodos utilizados, onde são expostos a ferramenta computacional CAV-NH, o método IMP e a batimetria do reservatório do Lobo, local onde foi aplicado este estudo. Na sexta seção são revelados os resultados e na sétima as conclusões sobre o trabalho. Posteriormente são exibidos as referências utilizadas na elaboração do texto e os apêndices com informações complementares ao trabalho.

2. Objetivos

2.1. Objetivo geral

Avançar no conhecimento sobre a ciência da batimetria em reservatórios e aperfeiçoar o processo de modelagem dos levantamentos batimétricos e da obtenção da relação Cota-Área-Volume (CAV).

2.2. Objetivos específicos

- Desenvolver um método simples, eficiente, de fácil aplicação e de domínio público, para modelagem digital de terreno utilizando levantamentos de seções batimétricas em reservatórios.
- Desenvolver uma ferramenta computacional visando dar agilidade ao processo de obtenção da curva CAV.
- Avaliar a representatividade que os diferentes espaçamentos das linhas batimétricas possuem quanto ao relevo real do reservatório.
- Determinar a curva CAV atual do reservatório do Lobo e atualizar suas características morfométricas.
- Analisar qualitativamente a curva CAV utilizando o espaçamento entre as seções transversais sugerido pela Agência Nacional de Águas.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Assoreamentos de reservatórios

Segundo WMO (2003), o nível de desenvolvimento de uma sociedade está relacionado com a sua habilidade em utilizar os seus recursos naturais disponíveis. Assim, com o crescimento da população, a crescente exploração de recursos tem levado à sua degradação, principalmente da água e do solo. A erosão do solo e a consequente sedimentação apresentam-se como um dos maiores problemas ambientais atualmente.

A erosão corresponde à desagregação do solo ou material rochoso decorrente da ação de agentes erosivos. Este processo pode ocorrer de forma natural, devido à ação da água, dos ventos, das gotas de chuva, dentre outros, sendo responsável pelo perfil natural dos solos. A erosão pode ser intensificada pelas atividades humanas que causam impactos negativos sobre o meio ambiente, como desmatamento, uso incorreto da terra para cultivo e pastagem. A água é o agente erosivo mais importante a ser considerado, pois seu escoamento transporta o sedimento erodido para os corpos de água (WMO, 2003).

Os corpos hídricos possuem a propriedade de transportar sedimentos de forma natural (BRANCO; ROCHA, 1977), como partículas de rocha, solo e matéria orgânica, decorrentes da sua bacia de drenagem. Existe um equilíbrio no transporte de sedimentos em um corpo aquático (GLYMPH, 1973), havendo um equilíbrio entre o aporte e a saída de sedimentos em um determinado trecho de um rio (MORRIS; FAN, 1997). Os sedimentos se depositam ao longo do percurso do rio e quando em excesso podem trazer problemas, agravando inundações por exemplo.

A intervenção humana no ambiente, ao construir uma barragem, altera as condições naturais do rio reduzindo a velocidade do fluxo de água, o que favorece a deposição dos sedimentos transportados e leva a modificações no equilíbrio sedimentológico tanto a montante como a jusante do reservatório formado (GLYMPH, 1973; CARVALHO et al., 2000). Com isto, há um acúmulo de sedimentos no reservatório, o que caracteriza o seu

assoreamento e com o passar do tempo os reservatórios perdem uma porcentagem da sua capacidade de armazenamento de água.

Os reservatórios possuem uma importância significativa, sendo construídos atualmente para usos múltiplos, incluindo o controle de cheias, abastecimento de água, geração de energia, irrigação, navegação, pesca, recreação, dentre outros. No Brasil, praticamente todos os grandes reservatórios são construídos com o objetivo principal de geração de energia elétrica. O assoreamento gera como principal problema a perda da capacidade de armazenamento de água, vindo a diminuir a vida útil dos reservatórios, ou seja, o tempo decorrido até que o reservatório tenha sua operação impedida pelo sedimento depositado.

Alguns fatores que influenciam a produção de sedimentos incluem o uso da terra, a cobertura vegetal, o tamanho dos sedimentos e a vazão do rio, sendo que a taxa de assoreamento de um reservatório depende da sua morfologia e do seu regime de operação (WMO, 2003).

Com a diminuição da velocidade do fluxo, as partículas mais grossas tendem a se sedimentar logo no início do reservatório, enquanto as mais finas adentram o lago. Com o desenvolvimento do assoreamento, a extensão dos depósitos em regiões de remanso do reservatório pode causar uma elevação no leito do rio, aumentando sua influência a montante. Com o leito do reservatório assoreado a velocidade da água aumenta, possibilitando que maiores quantidades de sedimentos escoem para jusante (WMO, 2003; CARVALHO, 2008). Porém, cada reservatório possui variáveis diferentes que interferem na formação do assoreamento, como geometria do lago, topografia, sinuosidade do curso d'água, drenagem, rios afluentes, operação do reservatório, granulometria dos sedimentos, vazão afluente, velocidade no lago, dentre outros (CARVALHO, 2008).

Segundo Carvalho (2008) os depósitos de sedimentos podem ser classificados em função da sua região de deposição. Depósitos de remanso ocorrem na região inicial do lago, caracterizados por sedimentos de maior granulometria. Já na parte interna do lago podem ocorrer: os depósitos de delta, que com diferentes granulometrias chegam a reduzir a capacidade útil do reservatório; os depósitos de leito, com sedimentos mais finos, próximos à barragem, reduzindo o volume morto; os depósitos de margem, com sedimentos provenientes da erosão dos taludes das margens. Também há os depósitos de várzea, ou

planície de inundação, devido a enchentes, os depósitos em camada uniforme e em cunha, característicos de rios encaixados e em garganta, respectivamente.

Segundo Carvalho (1994) dentre as principais consequências do assoreamento estão a redução do volume de água armazenado; a formação de bancos de areia, interferindo na navegação; efeitos sobre as estruturas, como maior pressão nas barragens, corrosão de canais e turbinas; dificuldade ou impedimento da entrada de água em estruturas hidráulicas de sistemas de captação; alteração do ecossistema aquático. Os sedimentos que chegam ao reservatório trazem consigo uma grande carga de nutrientes e poluentes que podem inviabilizar os seus usos múltiplos, podendo ser considerados sumidouros de carbono pela deposição de matéria orgânica (DEAN; GORHAN, 1998; COLE et al., 2007; TRANVIK et al., 2009). Quanto aos efeitos à jusante, o fluxo de água após a barragem possui menor concentração de sedimentos em suspensão do que a carga natural, o que aumenta o potencial erosivo da água, propiciando a erosão das margens e leito do rio à jusante do reservatório (CARVALHO, 2008; COIADO, 2001).

A redução do volume de armazenamento causa perda da capacidade de regularização, ou seja, o volume de água que era armazenada no período chuvoso para utilização no período de estiagem não será mais o mesmo, resultando em uma menor capacidade de geração de energia e menor disponibilidade para seus usos múltiplos.

Além disso, o assoreamento também pode causar problemas de manobras de operação em estruturas hidráulicas, gastos com dragagem dos sedimentos (MAIA; VILLELA, 2009; ANA, 2009) e maior frequência e intensidade de inundações na área a montante da barragem (PAIVA et al., 1998).

A obtenção de dados precisos é a base para a gestão eficiente de reservatórios quanto ao aspecto de sedimentação e sua modelagem numérica.

3.2. Levantamento batimétrico em reservatórios

O levantamento batimétrico em reservatórios é a determinação de seu relevo submerso. Eakin (1939) coloca que o objetivo imediato de cada batimetria é a determinação do volume e da distribuição do sedimento acumulado durante um período de tempo específico e apresenta três métodos para este fim: método do contorno, método das seções e a combinação dos dois.

Quando o objetivo é avaliar a taxa de assoreamento deve-se encontrar a diferença entre duas batimetrias. Este processo faz com que a taxa de assoreamento seja extremamente sensível a pequenos erros na obtenção do volume. Pequenas taxas de erro na estimativa do volume podem acarretar grandes erros na taxa de assoreamento. Todas as técnicas incorporam erros e estes devem ser minimizados. (MORRIS; FAN, 1997).

3.2.1. Método de Levantamento do contorno

Baseia-se no levantamento do contorno do reservatório, por meio de fotografias aéreas, em diferentes níveis de água até o seu esvaziamento. É o método mais direto, simples, preciso e adaptável para a determinação da capacidade do reservatório (HEINEMANN, 1963). Mas só deve ser utilizado quando já se tem um mapa base com um intervalo entre as curvas de nível bem definido não superior a 3 metros (EAKIN, 1939).

Carvalho et al. (2000) define o método como sendo a utilização de mapeamento topográfico por aerofotogrametria, obtendo fotos do reservatório nos mais diversos níveis. É aplicado a reservatórios com altas taxas de variação de nível ou aqueles que são ocasionalmente deplecionados ou esvaziados. Pode-se também destacar a utilização de técnicas de Varredura Laser e utilização de imageamento de satélite de alta resolução.

3.2.2. Método de Levantamento de linhas topobatimétricas

Fundamenta-se no levantamento de seções transversais (transectos) da área submersa do reservatório. Um exemplo de um layout de levantamento é apresentado por Heinemann (1963) (Figura 1) e posteriormente utilizado por outros autores (RAUSCH; HEINEMANN, 1968; VANONI, 1977; CARVALHO 1994; CARVALHO et al., 2000).

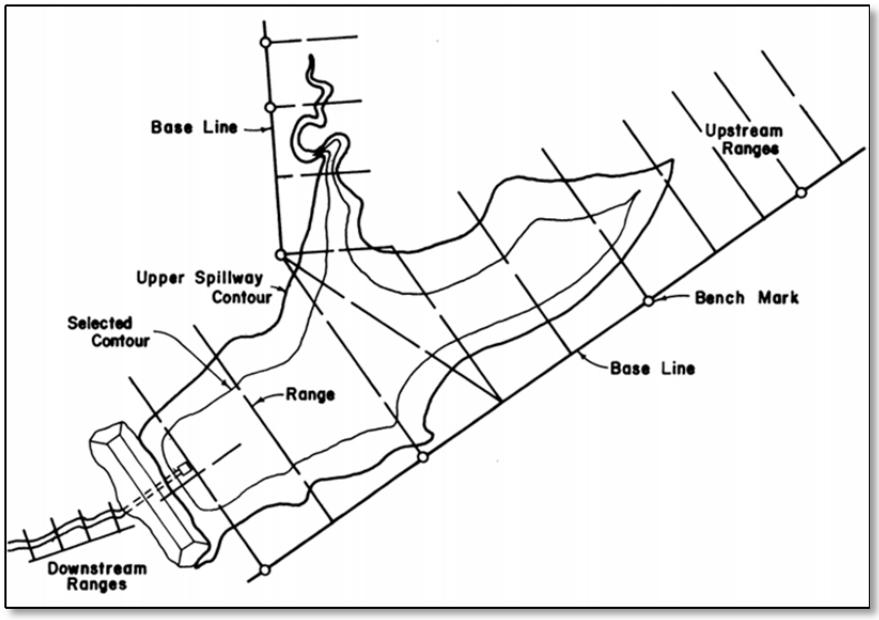

Figura 1 - Planejamento de seções batimétricas (HEINEMANN, 1963).

O levantamento de linhas topobatimétricas é comumente visto como o único método para realização deste tipo de estudo devido ao relativo baixo custo tanto em campo quanto na análise dos dados (BLANTON, 1982).

O planejamento dos transectos é de grande importância neste método, podendo causar irregularidades no cálculo final do volume do reservatório. Deve-se considerar a localização das seções bem como o distanciamento entre elas. Vários autores descrevem e sugerem alguns procedimentos para este planejamento os quais serão descritos no item 3.2.4.

Distintas tecnologias vêm sendo utilizadas para este tipo de levantamento, desde equipamentos mais rudimentares descritos por Eakin (1939) até equipamentos mais modernos utilizados atualmente. A seguir será apresentada a evolução destas tecnologias empregadas no método de levantamento das seções transversais.

3.2.3. Tecnologias aplicadas

A Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura - UNESCO expõe que desde os trabalhos realizados por Eakin em 1939, o processo de levantamento batimétrico em reservatórios mudou muito pouco (BRUK, 1985). Porém, os equipamentos utilizados para este processo evoluíram bastante (Figura 2 e Figura 3). A maneira mais simples de medir a profundidade é por meio do “souding weigth” ou o mastro. Na década de 1980 este procedimento evoluiu para o “sonic sounding” utilizando equipamentos com frequências de 60 e 120 kHz e também para “Subsurface Interface Radar” que operam de 300 a 1000 kHz emitindo pulsos eletromagnéticos ao invés de ondas sonoras. Outro avanço significativo foi na determinação do posicionamento durante o levantamento. Vários métodos e equipamentos foram desenvolvidos com este fim como: active responder, passive reflector, doppler, inertial, Satelite, manual (óptico), beacons e astronomical (BRUK, 1985).

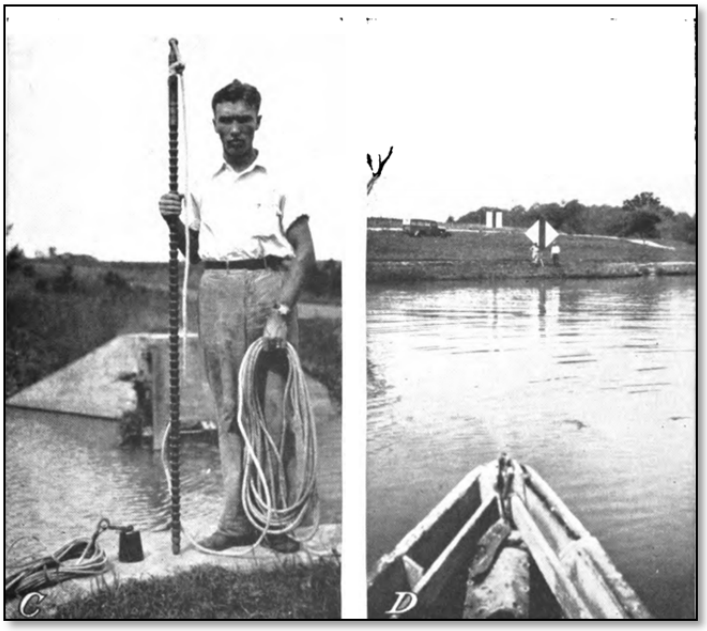

Figura 2 - Equipamentos utilizados na década de 1930 (EAKIN, 1939).

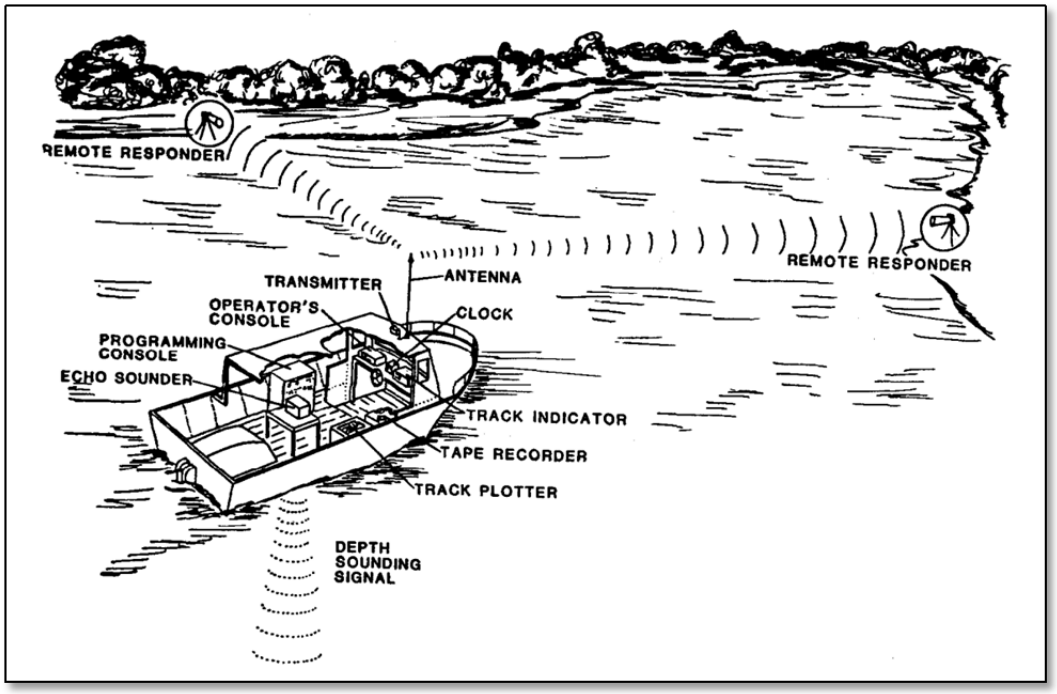

Figura 3 - Esquema de operação de equipamentos considerados modernos em 1985 para levantamento hidrográfico (BRUK, 1985).

Na década de 1990 já se encontravam comercialmente o sonar operando em 200 kHz e o GPS (Sistema de Posicionamento Global) como técnicas de levantamento (MORRIS; FAN, 1997).

Carvalho et al. (2000) expõe que a escolha do método depende do porte do reservatório e dos recursos disponíveis, podendo ser utilizados desde réguas e trena até DGPS (Sistema de Posicionamento Global Diferencial) e ecobatímetros digitais.

O ecobatímetro mede a profundidade da lâmina d'água emitindo um pulso sonoro e medindo a velocidade com que este retorna ao equipamento. Conhecendo-se a velocidade com que o som propaga no meio e o tempo de viagem é calculada a profundidade daquele ponto. Esta velocidade é dependente da temperatura, da salinidade e da profundidade da água.

Os Ecobatímetros *single beam* possuem um feixe único e retornam apenas um valor de profundidade para um dado intervalo de tempo.

Outra tecnologia utilizada atualmente é o ecobatímetro multifeixe (*multibeam echosounder*). Este equipamento permite que o fundo do reservatório seja levantado mais detalhadamente (Figura 4). O seu ângulo varia normalmente de 90 a 220 graus. A maior justificativa para o uso deste equipamento é para reservatórios onde a profundidade média é maior do que 10 metros. Apesar da maior quantidade de dados coletados, os feixes mais externos são mais propensos a erros e uma extensiva calibração é necessária antes de iniciar a coleta de dados. O custo deste equipamento é consideravelmente maior do que o *single beam*, mas os resultados podem na maioria dos casos justificar os custos (FERRARI; COLLINS, 2006).

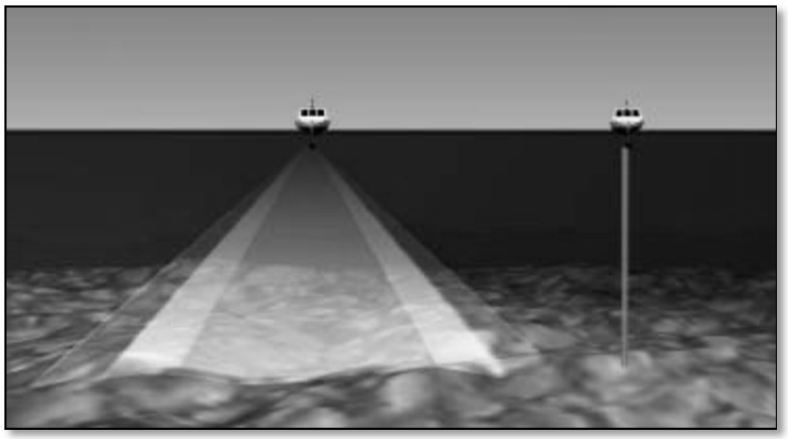

Figura 4 - Ecobatímetro multifeixe e de feixe único (FURNANS; AUSTIN, 2008b).

Mesmo após o desenvolvimento dos métodos acústicos *multibeam,* Ferrari (2006) afirma que o método de levantamento de linhas batimétricas, utilizando os equipamentos *single beam*, ainda é um meio válido na realização de estudos batimétricos para determinadas condições de reservatórios, ou ainda se os métodos mais modernos não estiverem disponíveis. A utilização do *multibeam* para levantamentos onde a profundidade é pequena faz com que a área do terreno abrangida pelo feixe seja reduzida, tornando mais viável a utilização de aparelhos *single beam* que possuem uma melhor relação custo/benefício para este caso.

3.2.4. Planejamento das seções batimétricas

Mesmo com o avanço tecnológico o planejamento das seções batimétricas mudou muito pouco. É descrito a seguir os procedimentos sugeridos, em ordem cronológica, por diversos autores sobre o assunto.

Segundo Eakin (1939) o planejamento das seções devem seguir algumas condições:

- O corpo principal do reservatório e os braços devem ser divididos em seções transversais.
- É de grande importância que sejam aproximadamente paralelas. Convergências de 10 graus são toleradas. Convergências maiores que 30 graus não devem ser permitidas em nenhum caso.
- No caso de curvas relacionadas ao formato do reservatório, onde não seja possível manter as seções paralelas, deve-se iniciar uma nova série de seções, para que as condições de convergência sejam mantidas.
- No caso da entrada de tributários deve ser iniciada uma nova série de transectos.

Rausch (1968) afirma que:

- Seções transversais em lagos pequenos devem ser espaçadas em aproximadamente 15 metros.
- Para reservatórios com área próxima de 15.000 m^2 o espaçamento não deve ser superior a 150 m se a topografia for uniforme.
- Nenhuma seção deve representar desproporcionalmente a capacidade do reservatório. As seções devem ser alocadas onde possam obter o máximo de informação para o desenho das curvas de nível.

Segundo Blanton (1982), na seleção dos transectos deve-se levar em conta o número mínimo de seções que atendam o objetivo do monitoramento (determinar a capacidade do reservatório e a acumulação de sedimentos) por causa dos custos do primeiro levantamento

e dos próximos. A relação entre o número de seções com a área do reservatório foi obtida pela regressão de 57 reservatórios (Figura 5), sugerindo que seja usada a equação (1).

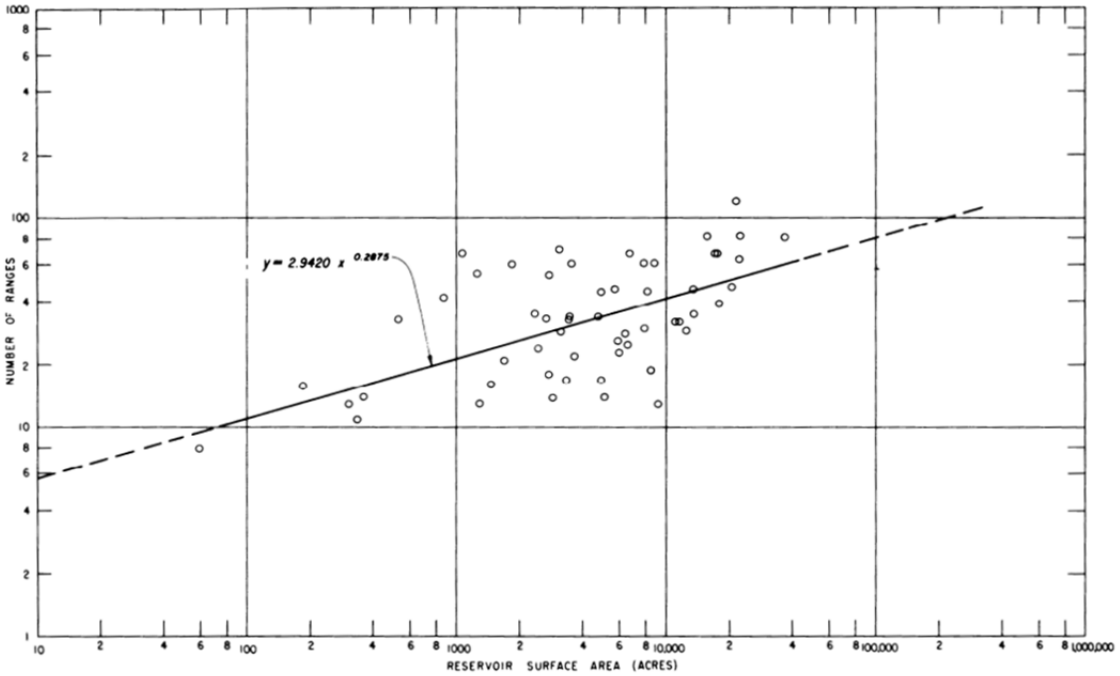

Figura 5 – Número de transectos versus a área do reservatório (BLANTON, 1982).

$$y = 2{,}942\ x^{0{,}2875} \qquad (1)$$

Onde:

y é o número de seções transversais;

x é a área do reservatório em Acres.

O autor ainda afirma que, além da equação proposta, para que seja alcançado um nível de razoável precisão devem-se seguir algumas diretrizes na alocação das seções:

- As seções devem ser alocadas, quando possível, perpendicularmente ao fluxo do rio e do vale.

- As seções devem ser espaçadas de modo que a área entre duas seções sejam bem representada por elas.

- Devem ser alocadas seções na entrada dos braços de seus tributários e seguidas as diretrizes similares às utilizadas para o corpo principal.

- O espaçamento das seções em áreas de delta do reservatório e em áreas de especial interesse deve ser menor que outras áreas para monitorar adequadamente as mudanças que podem ocorrer no reservatório.

A Figura 6 mostra um típico mapa de alocação das seções batimétricas.

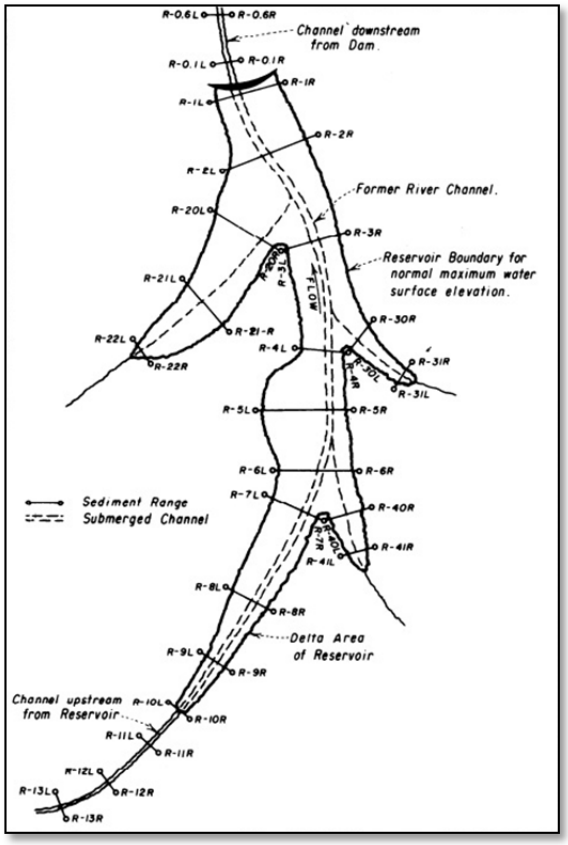

Figura 6 - Exemplo da alocação de seções batimétricas (BLANTON, 1982).

O U.S. Army Corps of Engineer afirma que o método da seção transversal requer que os transectos sejam cuidadosamente alocados e orientados para representar bem a topografia (USACE, 1989).

Uma forma diferente de se determinar as seções topográficas é definida por Yuqian (1989). Tomando-se como referência o mapa topográfico anterior ao enchimento do reservatório e o seu volume, as seções são alocadas, neste mapa, de forma de que o volume não ultrapasse 5% do valor de referência. As seções neste caso não tem a necessidade de serem equidistantes.

O intervalo de tempo entre os levantamentos hidrográficos devem ser baseados nas características de cada reservatório. Em alguns casos o intervalo pode ser de 20 em 20 anos e em outros casos devem ser de 2 ou 3 anos, dependendo da velocidade de assoreamento (MORRIS; FAN, 1997).

A Agência Nacional de Energia Elétrica orienta que se devem adensar as seções transversais com o intuito de se obter uma precisão apropriada. Afirma também, que deve ser utilizado um mapa adequado a escala e ao tamanho do reservatório, e seguida a orientação da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil), permitindo assim, o desenho das seções a cada 1,0 cm do mapa. Contudo, também respeitada a definição apresentada na Tabela 1. Caso o leito do reservatório não apresente grandes variações podem-se adotar distanciamentos maiores, de até 3,0 cm entre as seções transversais no mapa (CARVALHO et al., 2000).

Tabela 1 - Distanciamento das seções transversais (CARVALHO et al., 2000).

Escala do mapa	Distância entre seções (m)	Tipo de reservatório Observação
1 : 2.000	20	Pequeno
1 : 5.000	50	Médio
1 : 10.000	100	Médio a grande
1 : 20.000	200	Grande
1: 25 000	250	Grande

O U.S. Army Corps of Engineer também dá a sua contribuição sobre o distanciamento entre as seções. Afirma que quando o objetivo é calcular o volume de um reservatório de forma de fundo irregular, não há um rígido distanciamento entre os transectos. O distanciamento das seções normalmente é entre 60 e 120 metros com um limite especificado para o qual não se deve ultrapassar. Pode também ser mais espaçado caso o fundo do reservatório e a topografia forem uniformes. Especificar um espaçamento muito

próximo pode ser economicamente inviável. No que se refere a acurácia horizontal, esta não é critica para levantamentos de sedimentos em reservatórios e 5 RMS[1] referentes a medições com GPS é considerado mais do que adequado (USACE, 2002).

A *World Meteorological Organization* (WMO) em seu manual de gerenciamento e medição de sedimentos separa os levantamentos topográficos em três classes segundo a acurácia requerida. A classe 1 representa a maior acurácia sendo utilizada em levantamentos utilizados em avançados planejamentos. A classe 2, de média acurácia, é utilizada para determinar as condições do canal a montante, tributários, e determinar o volume do reservatório. A classe 3, de menor acurácia, é utilizada pra investigações de reconhecimento (WMO, 2003). O erro máximo permitido em cada levantamento por classe é dado pela Tabela 2.

Tabela 2 - Máximo erro permitido em levantamentos batimétricos (FERRARI; DOROUGH[2], 1996 apud WMO, 2003).

	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Posicionamento horizontal	3m	6m	100m
Medida de profundidade	15 cm	30 cm	45 cm

A WMO apresenta também um estudo baseado em dados de reservatórios da China onde o espaçamento entre as seções é determinado de acordo com a equação (2). A utilização desta equação resultou em levantamentos com um bom nível de precisão (SANMENXIA RESERVOIR EXPERIMENT STATION[3], 1980 apud WMO, 2003).

$$L_r = \frac{A}{L_t F^{1/3}} \qquad (2)$$

[1] RMS - A raiz quadrada da média do erro ao quadrado (Root Mean Square) - indica a acurácia, pois não utiliza a média, resultando no erro absoluto em relação à referência, com 68,27% de probabilidade

[2] Ferrari, R. and W. Dorough, 1996: Chapter 3-4 —Measuring deposited materials, and Chapter 3-5 — Determination of volume of deposits. International Conference on Reservoir Sedimentation, Colorado State University, Fort Collins.

[3] Sanmenxia Reservoir Experiment Station, 1980: Optimistic Density of Ranges for Sedimentation Survey

Onde:

L_r é a distância entre as seções;

A é a área da maior curva de nível correspondente, em quilômetros quadrados;

L_t é a distância acumulada entre as seções, em quilômetros;

$F = L_o/2(\pi A)^{1/2}$, onde L_o é a distância da maior curva de nível, em quilômetros.

Segundo Ferrari (2006), o grupo de sedimentos do *Bureau of Reclamation* do *U. S. Departament of the Interior,* de Denver no Colorado – EUA (USBR) assegura que para levantamentos com equipamentos *single beam* (feixe único), o espaçamento entre as seções deve ser estabelecido considerando o objetivo do levantamento para uma melhor densidade de pontos. Este levantamento assume que o terreno entre duas seções é uniforme. O problema é saber se e onde as mudanças abruptas ocorrem. A equipe de campo deve monitorar estas mudanças durante a coleta de dados e comparar com mapas pré-existentes para justificar uma mudança no espaçamento entre as seções. Normalmente, por volta de 5% da área estudada é coberta pela coleta de dados utilizando o equipamento *single beam*, isto significa que muito cuidado deve ser tomado durante o levantamento batimétrico. O espaçamento utilizado normalmente é de 100 metros, sendo realizado um ajuste em campo para atender o objetivo de cada levantamento. Para reservatórios menores ou para mostrar maiores detalhes do fundo o espaçamento pode variar de 30 a 60 metros. Para reservatórios maiores de leito plano com poucos detalhes, e quando o tempo e o orçamento são limitados, o ajuste do espaçamento pode ser de 150 metros, chegando até a 600 metros em alguns casos. Para o reservatório *Salton Sea,* que possui um leito uniforme, área de superfície de 22.000km^2 e comprimento de 53 km, foi utilizado um espaçamento de 600m.

O Serviço Geológico Americano, afirma que o mínimo intervalo entre os transectos é de 10 metros, devido à dificuldade de se manter, durante a coleta, a posição do barco alinhada com as linhas planejadas (WILSON; RICHARDS, 2006).

O Texas Water Development Board – TWDB iniciou um programa de levantamentos batimétricos em 1991 e já realizou mais de 100 batimetrias em reservatórios do Texas-USA.

Este departamento utiliza o espaçamento paralelo entre as seções transversais com um espaçamento geralmente variando de 75 a 150 metros (FURNANS; AUSTIN, 2008a).

A orientação da Agência Nacional de Águas (ANA), em outubro de 2011, propõe uma equidistância das linhas de sondagem para o corpo do reservatório para PCHs e para UHEs definidas pelas fórmulas (3) e (4), para os tributários, estreitamentos e canais o espaçamento sugerido equivale à metade do corpo principal (ANA, 2011).

Para PCH:

$$E_{ST} = \frac{0{,}25A^{0{,}25}}{D} \qquad (3)$$

Para UHE:

$$E_{ST} = \frac{0{,}70A^{0{,}35}}{D} \qquad (4)$$

Onde:

E_{ST} é a equidistância das seções topobatimétricas transversais, em quilômetros;

A é a área do reservatório em seu nível máximo maximorum, em hectares;

D é a extensão do reservatório (corpo principal), em quilômetros.

3.2.5. Métodos de cálculo do volume

Até meados da década de 1990 a literatura apresentou diversos métodos tradicionais desenvolvidos para o cálculo de volume em levantamentos batimétricos. Tais métodos foram desenvolvidos no início do século e a maioria destes é apresentada por Eakin em 1939, os quais ainda são citados por diversos autores. Com a evolução dos computadores, da sua capacidade de processamento e o desenvolvimento de ferramentas de geoprocessamento, os métodos tradicionais foram sendo substituídos por métodos automáticos.

Vários métodos automáticos são utilizados para calcular a capacidade por área do reservatório. O TIN é usualmente utilizado para gerar o modelo topográfico digital quando se tem dados de seções transversais (USACE, 2002).

O grupo de sedimentos do Bureau of Reclamation (USBR) utiliza o método TIN para modelar e gerar as curvas de nível de reservatórios utilizando o *software* Arcgis. O modelo TIN gera um conjunto de triângulos adjacentes não sobrepostos a partir de pontos espaçados com coordenadas x, y, z. Este método foi concebido para trabalhar com dados contínuos como elevações. O Arcgis utiliza critério denominado *Delaunay* para a triangulação do método TIN, onde os triângulos são formados a partir de todos os pontos dentro de um polígono. Este requer que um círculo formado pelos três nós do triângulo não contenha nenhum outro ponto, sendo assim os pontos são conectados aos pontos vizinhos mais próximos. Este método preserva todos os pontos coletados. Posteriormente curvas de nível são então interpoladas (FERRARI, 2006; FERRARI; COLLINS, 2006).

O Serviço Geológico Americano (USGS) utiliza um software hidrográfico para processar os dados do ecobatímetro e do GPS e compila todos os dados no Arcgis gerando o MDT por meio do método TIN (WILSON; RICHARDS, 2006).

A Agência Nacional de Águas coloca que o modelo digital do reservatório deve ser gerado com todos os pontos coletados (parte úmida e parte seca) com a linha de contorno do reservatório em *breakline* (ANA, 2011).

O TWDB também utiliza o Arcgis e o método TIN para gerar o MDT do terreno e afirma que esta metodologia é a mais apropriada para representar a superfície do reservatório quando os dados coletados são perpendiculares ao canal submerso. Mas um inconveniente do método de triangulação *Delaunay* ocorre na geração do MDT, onde são geradas artificialmente linhas de contorno curvas que se estendem para dentro do reservatório (FURNANS; AUSTIN, 2008a).

Para resolver este problema o TWDB desenvolveu um método, de propriedade da empresa, que cria seções intermediárias entre um transecto e outro, chamado *Self-Similar Interpolation* e após a introdução destas novas seções artificiais é gerado novamente um MDT. Na Figura 7 (A) podem-se observar os bancos em degraus próximos a margem. Estes não representam a realidade e aparecem na geração do TIN quando os transectos estão

muito afastados. Na Figura 7 (B) são mostradas as seções intermediárias geradas artificialmente e na Figura 7 (C) o MDT gerado com o método *Self-Similar Interpolation* (FURNANS; AUSTIN, 2008b).

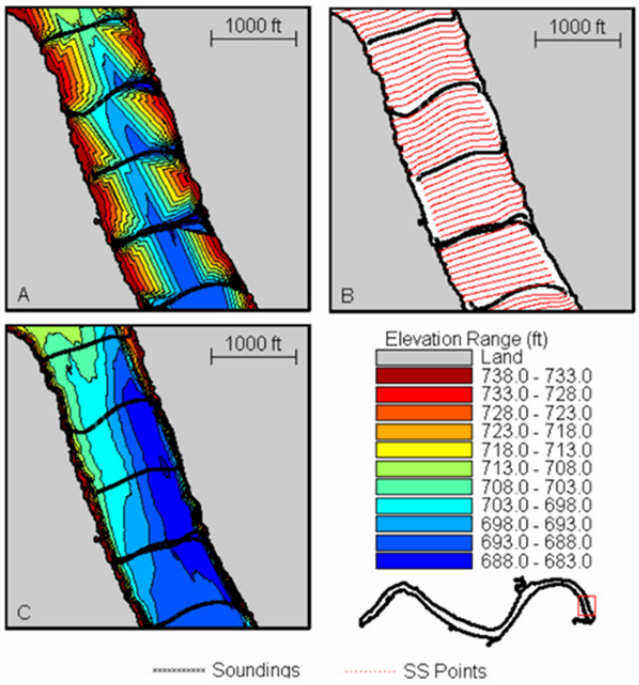

Figura 7- Self Similar Interpolation – (A) TIN gerado somente com os transectos; (B) Pontos coletados (preto) e seções interpoladas (vermelho); (C) TIN gerado com as seções interpoladas. (Fonte: FURNANS; AUSTIN, 2008b)

A TWDB somente expôs os resultados da utilização deste método, não apresentando os processos ou algoritmos que derivaram os dados finais.

Estudos realizados pelo núcleo de batimetria da EESC-USP também indicam a gerações de feições irregulares, próximas à borda do reservatório, originadas pelas regras de triangulação do método *Delaunay* (MATOS et al., 2011). Tais irregularidades são expressas em grandes faces planas e descontinuidades que ocorrem pela interpolação de alguns pontos do contorno do reservatório com pontos dos transectos (Figura 8).

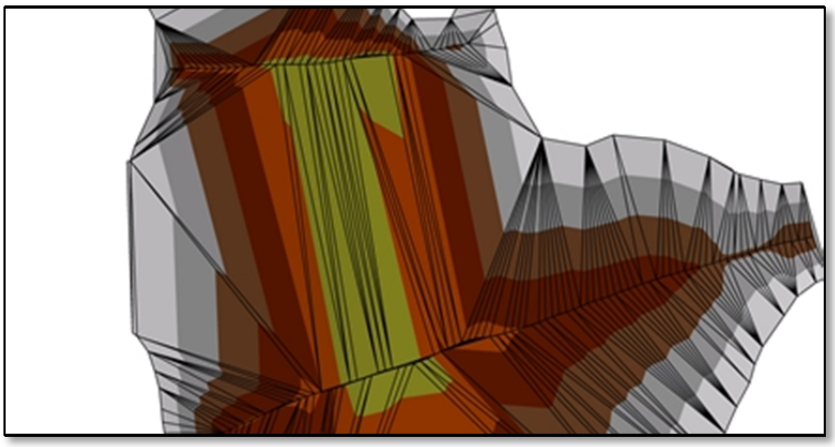

Figura 8 - Detalhes do modelo digital de terreno e TIN gerados para o reservatório de Bariri entre duas seções batimétricas (MATOS et al., 2011).

3.3. Legislação Brasileira

A Resolução Nº 396 de 1998, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 1998) foi a primeira norma a estabelecer a obrigatoriedade da atualização da curva Cota-Volume de reservatórios destinados a aproveitamentos hidroelétricos. Atualmente, a norma em vigor sobre o assunto é a Resolução Conjunta ANEEL-ANA Nº 003 de 2010, que substituiu o texto da resolução anterior.

3.3.1. Resolução ANEEL Nº 396 de 1998

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 1998), em dezembro de 1998, estabeleceu nesta resolução normas relativas à implantação e manutenção de estações fluviométricas e pluviométricas em empreendimentos hidroelétricos. Estabeleceu também em seu artigo segundo a seguinte condição:

> *"Art. 2º Os concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica deverão manter atualizadas as curvas de descarga das estações fluviométricas associadas aos aproveitamentos hidrelétricos, informando à ANEEL essas atualizações, bem como as curvas Cota-Volume dos reservatórios dos aproveitamentos."*

3.3.2. Resolução conjunta ANEEL-ANA Nº 003 de 2010

Após quase 12 anos, na forma da Resolução Conjunta ANEEL-ANA Nº 3 de 10 de agosto 2010 (ANEEL-ANA, 2010), a Agência Nacional de Energia Elétrica e a Agência Nacional das Águas aperfeiçoam os instrumentos e normas estabelecidas na Resolução ANEEL nº 396 de 1998, revogando-a.

Com relação a curva cota-volume a nova resolução estabelece uma frequência de levantamento batimétrico de no mínimo 10 anos podendo ser reduzida esta periodicidade caso haja necessidade, conforme descrito a seguir:

> *"Art. 8º Para as usinas despachadas centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, o processo de assoreamento do reservatório deverá ser avaliado com base na atualização das curvas cota-área-volume realizada pelo concessionário ou autorizado, da seguinte forma:*
>
> *I – para empreendimentos que, na data de publicação desta Resolução, estiverem em operação há oito anos ou mais, a atualização deverá ser feita no prazo de até 24 meses contados da data de publicação desta Resolução e, a partir da referida atualização, a cada 10 anos;*
>
> *II – para os demais empreendimentos não atingidos pelo inciso I, a atualização deverá ser realizada a cada 10 anos, contados a partir do início de sua operação comercial.*
>
> *§ 1º A proposta do método e dos procedimentos a serem utilizados na atualização das curvas cota-área-volume deverá ser encaminhada previamente, pelo concessionário ou autorizado à ANA para avaliação.*
>
> *§ 2º O concessionário ou autorizado deverá encaminhar à ANA, para avaliação, um relatório técnico detalhado contendo o método e os procedimentos utilizados, bem como as tabelas cota x área e cota x volume, e os respectivos dados eletrônicos e polinômios.*
>
> *§ 3º Em casos excepcionais, a ANEEL, mediante fundamentação, poderá determinar que a avaliação do processo de assoreamento do reservatório seja realizada com periodicidade inferior a 10 anos.*
>
> *Art. 9º Os dados e informações provenientes das estações hidrométricas e referentes às curvas cota - área - volume, objetos desta Resolução, serão disponibilizados pela ANA via Internet."*

Em outubro de 2011 a ANA disponibilizou um documento de orientação intitulado “Orientações para Atualização das Curvas Cota x Área x Volume” em complementação a Resolução Conjunta. Este documento estabelece algumas orientações técnicas referentes às técnicas de levantamento topobatimétrico, distância entre as seções transversais a serem levantadas, equipamentos utilizados e determinação da curva CAV (ANA, 2011).

Dado a importância do assoreamento em reservatórios, considerando a grande utilização dos equipamentos *single beam* no levantamento das seções transversais, e os erros de bordas provenientes da geração do MDT pelo método TIN, apresentados neste capítulo, faz-se necessário o desenvolvimento de um método de domínio público, que seja facilmente utilizado e replicado, e que minimize os erros. Verifica-se também, a importância do desenvolvimento de uma ferramenta que auxilie no cálculo da curva CAV, tornando este processo mais rápido e eficiente.

4. Materiais e Métodos

Foram estudados três reservatórios e seus respectivos levantamentos batimétricos: O reservatório do Lobo, o reservatório de Bariri e o reservatório de Ibitinga. A aplicação do método IMP, com o auxílio da ferramenta computacional CAV-NH, para a modelagem do leito do reservatório foi avaliada e validada para o reservatório do Lobo empregando diferentes espaçamentos entre as seções transversais. Posteriormente, o método foi também avaliado para os reservatórios de Bariri e Ibitinga.

4.1. Reservatório do Lobo

A Represa do Lobo, também conhecida como represa Carlos Botelho ou represa do Broa (Figura 9), foi construída em 1936 pela antiga Central Elétrica de Rio Claro S.A. (SACERC), com a finalidade de produzir energia elétrica. A partir da década de 1970 o entorno do reservatório foi loteado, vindo a se transformar em um pólo turístico regional e atualmente também é utilizado com fins de lazer e pesquisa. Desde 2007 pertence a Aratu Geração S.A. (antiga Elektro Geração S.A.) sendo controlada pela ESP Agropecuária Ltda. (ANEEL, 2012).

Figura 9 - Vista da barragem da represa do Lobo.

Localiza-se entre os municípios de Itirapina e Brotas, na região central do estado de São Paulo (22º15'S e 47º40'W), na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 13 - UGRHI 13, distante 18 km de São Carlos (Figura 10). Segundo Tundisi (2004) suas características morfométricas são: 8 km de comprimento, largura máxima de 2 km, profundidade máxima de 12 metros, profundidade média de 3 metros, área de superfície de 6,8 km^2, perímetro de 21 km, volume de 22 x 10^6 m^3. Possui uma potência instalada de 2MW, cota mínima útil de 699,0 metros, cota máximo maximorum de 704,50 metros e faixa de operação entre os níveis de 703,0 a 703,3 metros (informação verbal)[4].

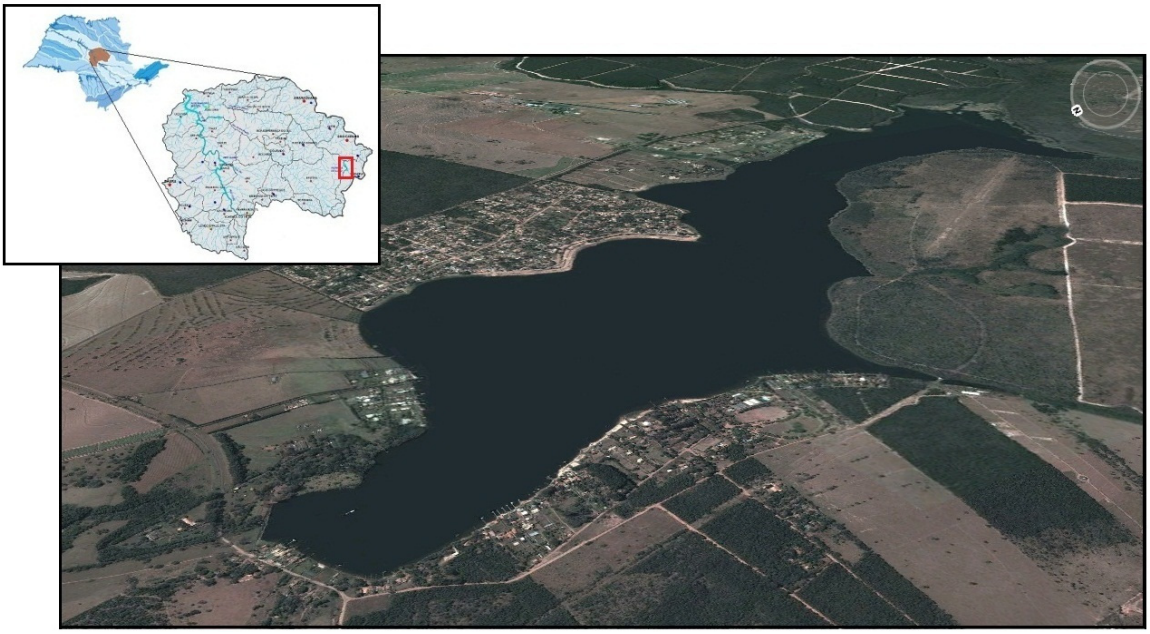

Figura 10 - Reservatório do Lobo – UGRH 13 – SP.

(Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH, 2012; SIGRH, 2012)

Os pesquisadores Dr. José Galizia Tundisi, do Laboratório de Biologia Aquática da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e Dr. Swami Vilella, do CHREA/EESC-USP, juntamente com uma equipe multidisciplinar iniciaram seus estudos no reservatório do lobo em julho de 1971. Vários pesquisadores destes dois centros continuam realizando suas pesquisas neste reservatório que provavelmente é um dos corpos hídricos mais bem estudados do Brasil (MOTHEO, 2005).

[4] Informação fornecida pela empresa Aratu S/A.

O reservatório é formado principalmente pelo represamento do Rio Itaqueri, Ribeirão do Lobo, Córrego do Geraldo e Córrego das Perdizes. Os dois primeiros destacam-se como principais por apresentarem maior volume, cerca de 80%, sendo suas contribuições sedimentares relativamente altas (TUNDISI[5], 1977 apud DELELLO, 2008).

4.2. Reservatório de Bariri

O reservatório de Bariri está localizado entre os municípios de Bariri e Boracéia, SP, no rio Tietê, Bacia Hidrográfica do Tietê/Jacaré (UGRHI 13) e sub-bacia do rio Tietê/rio Lençóis (Figura 11), estando situada a jusante da UHE de Barra Bonita e a montante da UHE de Ibitinga (MAUAD, 2005).

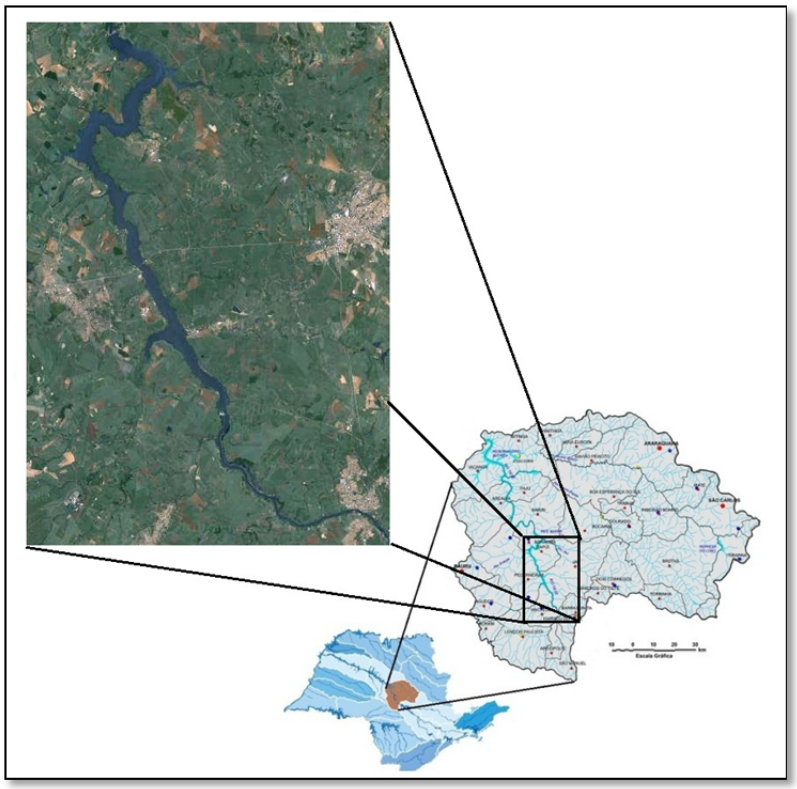

Figura 11 - Localização do reservatório de Bariri.

(Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH, 2012; SIGRH, 2012)

[5] TUNDISI, J. G., 1977, Produção primária, "standing-stock", fracionamento de fitoplâncton e fatores ecológicos em ecossistema lacustre artificial. Tese de Titulação, USP, Represa do Broa, São Carlos, 409p.

A UHE Bariri (Figura 12), hoje chamada de UHE Álvaro de Souza Lima, entrou em operação em 1965. Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 2000) a usina teve suas obras concluídas em 1969 com a instalação de três turbinas com potência total de 143 MW, possuindo uma eclusa para navegação, com largura útil de 12 m, comprimento de 147,25 m e calado de 3,5 m.

Figura 12 - Barragem da usina de Bariri.

(Fonte: AES TIETÊ, 2012)

A usina que antes pertencia a Companhia Energética de São Paulo (CESP), desde 1999 pertence ao grupo AES Brasil por meio de sua concessionária AES Tietê. Segundo a empresa, o reservatório da usina abrange uma área de 63 km^2 com um volume de $607x10^6$ m^3 e uma barragem do tipo terra/concreto com o comprimento de 856,25 m. Sua geração abrange três turbinas do tipo Kaplan de eixo vertical com uma queda bruta de 24 m e três geradores do tipo Umbrella de eixo vertical, sendo dois de 47,7 MW e um de 41,4 MW totalizando uma potência total de 136,8 MW e tensão nominal de 138 kV. Possui também seis vertedouros de superfície com descarga total de 2.856 m³/s e duas comportas de fundo com descarga total de 1.706 m³/s. A cota máxima útil do reservatório é de 427,50 m e sua cota mínima de 426,50 m com um volume útil médio acumulado de 60 x 10^6 m^3. (AES TIÊTE, 2012; AES BRASIL, 2012; CESP, 2012; SIGRH, 2012).

4.3. Reservatório de Ibitinga

O reservatório da Usina Hidroelétrica de Ibitinga está localizado entre os municípios de Ibitinga e Iacanga, SP, no rio Tietê, Bacia Hidrográfica do Tietê/Jacaré (UGRHI 13) e sub-bacia do rio Tietê/rio Claro (Figura 13), estando situado à montante da UHE de Promissão e a jusante da UHE de Bariri (MAUAD, 2005).

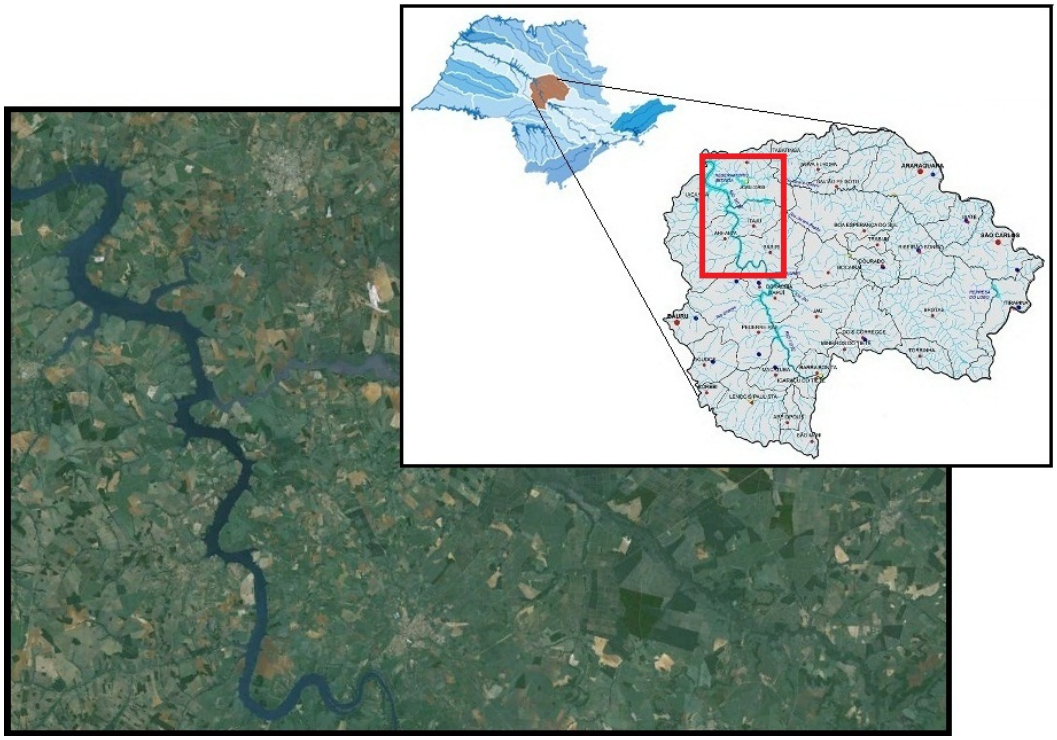

Figura 13 - Localização do reservatório de Ibitinga.

(Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH, 2012; SIGRH, 2012)

De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 2000) a UHE Ibitinga (Figura 14), assim como a UHE de Bariri, teve suas obras concluídas em 1969, com a instalação de três turbinas com potência total de 132 MW. Possui uma eclusa para navegação, com largura útil de 12 m, comprimento de 142,5 m e calado de 3,5 m, que está em funcionamento desde 1986 e um reservatório de cerca de 114 km^2 de espelho d'água.

Figura 14 - Construção do reservatório de Ibitinga.

(Fonte: http://static.panoramio.com/photos/original/23822488.jpg)

A usina que antes pertencia a Companhia Energética de São Paulo (CESP), desde 1999 pertence ao grupo AES Brasil por intermédio de sua concessionária AES Tietê. Segundo a empresa, a sua barragem é do tipo Mista, material terra concreto, comprimento no coroamento de 1.555,75 m. Sua geração abrange três turbinas do tipo Kaplan de eixo vertical e geradores alternadores síncronos trifásicos do tipo Umbrella e tensão nominal de 138 kV. Possui também sete vertedouros de superfície e três comportas de fundo. A cota máxima útil do reservatório é 404,0 m e sua cota mínima 403,5 m, com um volume útil médio acumulado de 55,77 x 10^6 m^3 (CESP, 2012). De acordo com Corrêa Filho (2005), a área alagada para a cota 404,0 m é de 10,07 km^2.

4.4. Equipamentos e Softwares utilizados

Todos os equipamentos e softwares utilizados são pertencentes ao Núcleo de Hidrometria do CRHEA/EESC/USP.

4.4.1. Ecobatímetro

O equipamento utilizado foi *o Bathy-500 MF Survey Echo Sounder* (Figura 15) da *Ocean Data Equipament* (ODEC), hoje pertencente à *SyQwest* Inc. Este trabalha com quatro diferentes frequências que devem ser selecionadas e que variam de 33 a 200 kHz. Trabalha com sete intervalos de profundidades, chegando à profundidade máxima de 640 metros e velocidade do som variando de 1393 a 1590 metros por segundo (SYQWEST, 2006). Os ajustes são realizados diretamente no teclado, pode-se ajustar a frequência, velocidade do som e intervalo de profundidade, dentre outros.

Figura 15 - Ecobatímetro modelo BATHY-500MF da fabricante SyQwest. Inc.

O transdutor utilizado foi o modelo P/N P01540 (Figura 16) que possui frequência de ressonância de 208 kHz, impedância nominal de 50 ohms e abertura do feixe no ponto de 3db de 8 graus.

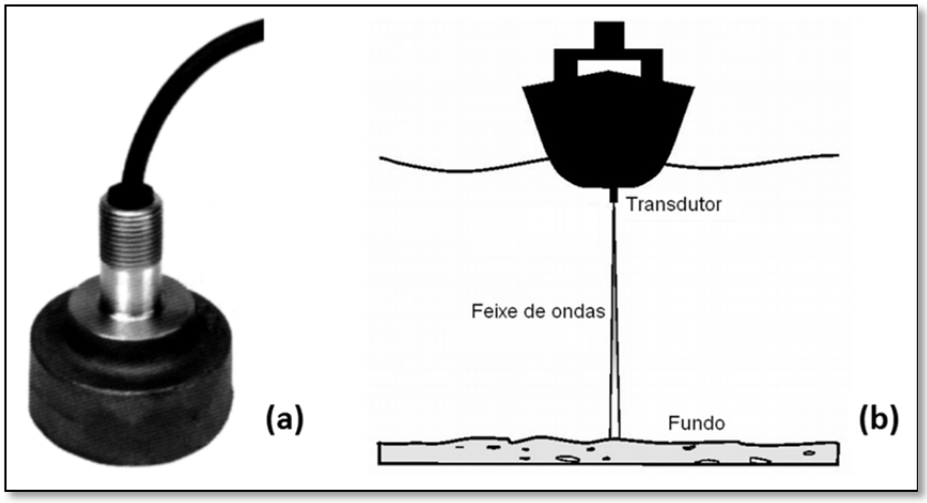

Figura 16 – (a)Transdutor modelo P/N P01540 e (b) barco com ecobatímetro realizando varredura.

(Fonte: http://www.syqwestinc.com)

4.4.2. Arcgis 9.3

O Arcgis é um pacote de softwares da Esri (*Environmental Systems Research Institute*) que integra soluções em SIG (Sistema de Informações Geográficas). Este pacote possui características de análise de dados espaciais, geoprocessamento, edição e criação de mapas, soluções em cartografia, edição e manipulação de dados em formatos vetoriais e raster, visualização de dados 3D, além de várias outras ferramentas e funcionalidades.

Neste trabalho foi utilizada a versão do Arcgis 9.3 e as extensões mais utilizadas dentro do ArcMap foram o *3D Analyst tools*, o *Spacial Analyst tools* e o *Data Management tools*. O *3D Analyst tools* possui a ferramenta TIN que permite gerar um MDT a partir de pontos cotados. Estas ferramentas foram utilizadas neste trabalho para gerar os MDTs provenientes das batimetrias e também para a obtenção das relações CAV.

O TIN (*Triangulated Irregular Network*) é uma estrutura de dados vetoriais, em forma de triângulos não sobrepostos, que representa uma superfície geográfica. Este modelo é aconselhado para se modelar relevos complexos como fundos de vale. Vários métodos de interpolação foram desenvolvidos para se obter a superfície TIN, como o método *Constrained Delaunay Triangulation*, fornecido pelo Arcgis, que diversos autores

(FELGUEIRAS; GOODCHILD, 1995; KIDNER et al., 2000; TSAI[6], 1993 apud VIVONI et al., 2005) recomendam como sendo o que modela melhor as feições de fundos de vale, drenagens, divisores de água e também o fundo de reservatórios.

O Arcgis 9.3 permite também que algumas linguagens de programação sejam utilizadas para gerar *scripts* (sequência de comandos ou tarefas a serem executadas) automatizando o fluxo de trabalho dentro do seu próprio ambiente e também fora deste. Com a finalidade de gerar uma ferramenta computacional que realize o processo de cálculo da tabela cota-área-volume, foi utilizada a linguagem Python que está totalmente integrada com as funcionalidades do Arcgis 9.3.

4.4.3. Python

O Python é uma linguagem de programação de código aberto, orientada objeto, combinando uma linguagem poderosa de alto nível e ao mesmo tempo uma sintaxe muito clara e intuitiva (PYTHON, 2012).

Desde a sua criação, no final da década de 1990, a sua utilização vem crescendo, especialmente nos últimos anos. Uma de suas vantagens é possibilitar a sua integração com outros componentes, *softwares* e outras linguagens, podendo chamar outras bibliotecas e ser chamado por outras linguagens como C ou C++, podendo também integrar componentes Java e interagir pela rede. Várias empresas utilizam esta linguagem em alguma fase de seus processos, como exemplo, pode-se citar a NASA (National Aeronautics and Space Administration), que desenvolve *scripts* para vários de seus sistemas, o *Google* que utiliza em vários de seus componentes, e também o *Yahoo*, a *Seagatle*, a *Hewlett–Packard*, a IBM, dentre outras (ASCHER, 2007; HETLAND, 2008).

A linguagem Python, utilizada como *scripts* no Arcgis, foi introduzida desde a versão 9.0 e recentemente, na versão 10, se tornou a linguagem nativa do *software* para este fim, sendo utilizada para automatizar processos de geoprocessamento, produção de mapas e executar tarefas de gerenciamento de dados. A própria Esri relata que o Python atualmente

[6] TSAI, V. J. D. (1993) Delaunay triangulations in TIN creations: na overview and a linear-time algorithm, International Journal or Geographical Information Systems, 7, 501 – 524

é uma linguagem completamente integrada com o Arcgis e que atende todas as necessidades da comunidade de usuários (ESRI, 2012).

O Python foi utilizado neste trabalho para implementar a ferramenta computacional CAV-NH fazendo o uso das bibliotecas do Arcgis 9.3.

4.4.4. Hypack Hydrographic Survey

O *Hypack Hydrographic Survey* é um *software* que foi desenvolvido para levantamentos hidrográficos e processamento dos dados pela Hypack Inc..

Por meio deste *software* foi realizado todo o planejamento das seções batimétricas em escritório, definidos os espaçamentos e as posições relativas em relação às margens.

Em campo, o Hypack (Figura 17) integrou e sincronizou o ecobatímetro e o GPS durante a coleta de dados, permitiu visualizar na tela do computador a localização do barco em relação ao planejamento das seções em tempo real e também a velocidade do barco, dentre outros parâmetros, orientando assim a navegação.

Figura 17 - Tela do Hypack durante a coleta de dados.

Após a coleta de dados, o *software* permite a correção, seção a seção, manualmente, dos erros sistemáticos e/ou grosseiros provenientes do ecobatímetro. Permite também, a

correção da cota de referência do nível d'água, a visualização dos dados do GPS e a exportação destes (x, y, z) em formato texto.

4.4.5. Global Navigation System Satellite – GNSS

O equipamento GNSS utilizado foi um receptor GPS (Global Positioning System) modelo GS20 PDM (*Professional Data Maper*) da Leica *Geosystems* (Figura 18). Um equipamento robusto e portátil que segundo a empresa garante uma precisão submétrica sem o uso de antena externa, uma precisão da linha de base utilizando somente código L1 de 30 cm (rms) e precisão milimétrica com o código e fase L1 de 10 mm + 2 ppm, ambos pós-processados. Foi utilizada também a antena externa modelo AT 51, modelo Mk4 da empresa *RACAL* Landstar projetada para proporcionar uma maior precisão às medidas (LEICA, 2012).

Figura 18 - Receptor GPS GS20 e antena externa AT 201.

O GS20 é um receptor GPS portátil de 12 canais para aplicações cartográficas profissionais, que utiliza uma tecnologia de atenuação do multicaminhamento chamada *ClearTrack*^{TM} e também uma tecnologia de rastreio dos sinais no *Delay Lock Loop* e no *Phase Lock Loop* que fornecem uma coordenada com maior precisão, com efeitos expressivos na atenuação de ruídos e do multicaminhamento (PALMA, 2005).

Foram realizados testes de dispersão dos dados coletados pelo GPS no reservatório em estudo com o equipamento no modo cinemático, nas mesmas condições da batimetria e

com o barco ancorado. Também foi verificada antecipadamente, a boa condição da constelação de satélites disponíveis para as datas e local de coleta de dados.

4.5. Levantamentos Batimétricos

4.5.1. Reservatório do Lobo

A batimetria do reservatório do Lobo foi realizada especificamente para este estudo. As seções foram inicialmente planejadas em escritório (Figura 19) com o espaçamento de 10 metros considerando a borda do reservatório previamente estabelecida em campanha anterior realizada em 2004. Este detalhamento foi selecionado para que posteriormente fosse possível verificar a influência do distanciamento na geração do MDT e cálculo da relação Cota-Área-Volume, além de ser utilizada na validação da técnica IMP.

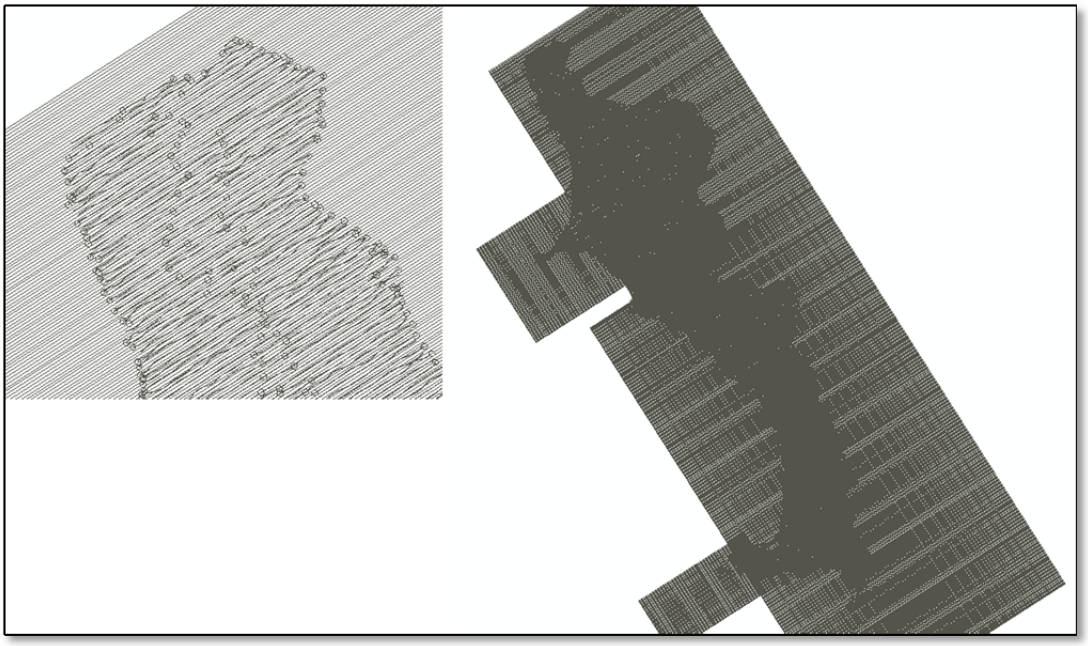

Figura 19 - Planejamento do levantamento batimétrico com distanciamento entre as seções transversais de 10 metros.

A coleta de dados foi realizada pelo autor desta tese e por Marcus Vinícius Estigoni (Mestrando), ambos os alunos do programa de pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos e vinculados ao Núcleo de Hidrometria (CHREA/EESC/USP).

A batimetria foi realizada em duas campanhas, a primeira de 20 a 31 de maio de 2010 e a segunda de 16 a 30 de julho de 2010, totalizando 16 dias efetivos de coleta. Alguns eventos impediram a realização da coleta de dados em alguns dias, como ventos fortes que impediam que o barco ficasse estável, e até mesmo pôs em risco a integridade física da equipe e dos equipamentos.

Os dados de profundidade foram coletados utilizando o ecobatímetro valendo-se como referencial altimétrico o nível do reservatório medido junto à barragem, sendo que pelas dimensões do reservatório a declividade da lâmina d'água pôde ser descartada. A latitude e longitude foram coletadas pelo receptor GPS. O ecobatímetro e o receptor GPS foram ligados a um computador de bordo, que por meio do software Hypack Max proporcionou a comunicação e sincronização dos dados.

Antes de iniciar cada coleta de dados, foi calibrada a velocidade do som na água por meio da técnica nomeada *bar check* (Figura 20). Esta técnica consiste em colocar um anteparo a uma profundidade conhecida e verificar com o ecobatímetro a profundidade medida ajustando a velocidade do som caso haja discrepância entre os valores observados.

Figura 20 - Anteparo utilizado no Bar check.

Tanto para a coleta como para o tratamento dos dados foi utilizado o *software* Hypack. Foram coletadas 726 seções transversais totalizando 514.735 metros.

Os dados coletados em campo continham falhas provenientes de erros de sinal do ecobatímetro, como visto na Figura 21. Cada um dos transectos coletados foi pré-processado manualmente, onde foram subtraídos esses erros.

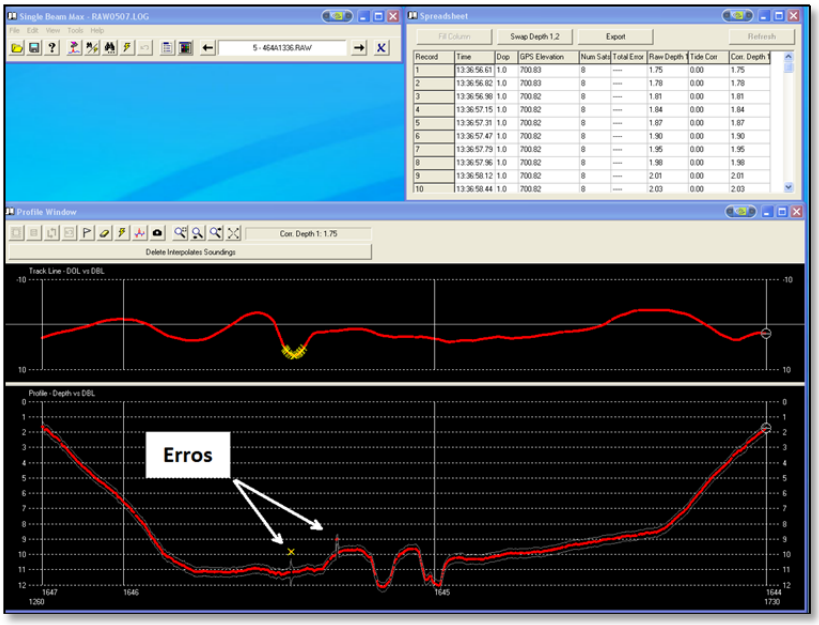

Figura 21 – Correção dos erros do sinal do ecobatímetro no Hypack.

Os dados foram exportados do Hypack em formato texto. Cada linha do arquivo continha o nome do transecto, o número de gravação, data, hora, o número de satétites, o DOP (*Dilution of precision*), as coordenadas de latitude e longitude em UTM e a profundidade medida pelo ecobatímetro.

Foram desenvolvidas algumas rotinas computacionais para organização dos dados pré-processados vindos de campo.

A rotina 1 carrega os dados dos arquivos em formato texto, corrige a profundidade do ecobatímetro, transforma a profundidade em cota utilizando o nível diário do reservatório, e por fim separa e salva cada transecto em um novo arquivo em formato texto (transecto1.txt, transecto2.txt, etc.).

A rotina 2 organiza os dados de cada transecto para que este sempre inicie na margem esquerda e termine na margem direita do reservatório, gerando um arquivo texto para cada transecto organizado. Esta rotina é necessária para que posteriormente seja gerada a borda interna do reservatório.

A Rotina 3 gera os arquivos necessários para a entrada de dados na ferramenta CAV-NH. Gera arquivos texto da batimetria do reservatório com diferentes distanciamentos (utilizados neste estudo) e grava as bordas do reservatório separadas para os diferentes espaçamentos, também em arquivos texto.

4.5.2. Levantamento do contorno do reservatório

O levantamento do contorno do reservatório do Lobo foi realizado por interpretação de imagens de satélite. Foi utilizada a imagem da câmera Pancromática HRC (*High Resolution Câmera*) do CBERS2-B (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres). O CBERS-2B operou até o início de 2010 e suas imagens estão disponíveis para usuários no sitio da Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DGI-INPE).

A câmera HRC é uma câmera de alta resolução, que opera em uma única faixa espectral e cobre parte do visível e parte do infravermelho. Esta produz uma imagem de 27 km de largura com uma resolução espacial de 2,7 m por 2,7 m (INPE, 2012).

A imagem utilizada neste estudo, mostrada na Figura 22, foi obtida às 13 horas e 32 minutos do dia 29 de junho de 2009 (código: CBERS_2B_HRC_ 20090629_156_D_125_2_L2_BAND1). A cota referente a este dia e horário foi obtida por meio de contato com a Aratu Geração S/A e corresponde ao valor de 703,06 metros.

Após o georreferenciamento da imagem, esta foi reclassificada separando-se os pixels referentes à reflexão do corpo líquido. Posteriormente, foi realizado o delineamento manual da borda do reservatório com base na reclassificação, corrigindo-se alguns erros de sombreamento provenientes da imagem (Figura 23).

Os erros de sombreamento foram provenientes da reflexão da sombra das copas das árvores, que originaram valores dos pixels próximos aos refletidos pelos corpos de

água. Este erro foi observado principalmente na margem direita, na área mais à montante do reservatório, local onde há uma plantação de eucalipto.

Figura 22 - Imagem CBERS do reservatório do Lobo.

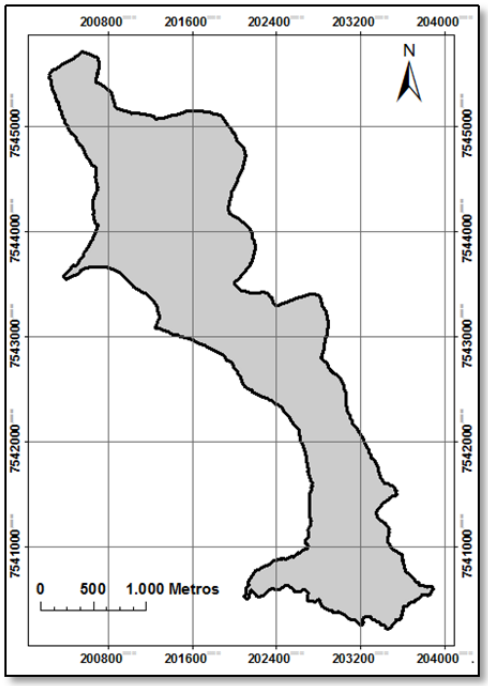

Figura 23 - Contorno do reservatório obtido pela imagem CBERS.

4.5.3. Reservatório de Bariri

O levantamento batimétrico do reservatório de Bariri foi realizado pelo Núcleo de Hidrometria CRHEA/EESC/USP em 2004, em três campanhas, totalizando nove dias de coleta de dados em campo. Para tal, foi utilizada uma sonda ADP (Acoustic Doppler Profiler) de 1500 kHz da marca Sontek, um receptor GPS *Leica Geosystems* GS20 trabalhando com o sistema de correção diferencial Landsar Racal, e o *software River Surveyor* para a obtenção e processamento dos dados**.**

A batimetria realizada em 2004 foi adaptada para este estudo, sendo considerados somente o corpo principal do reservatório e as seções transversais levantadas com espaçamento de 500 metros. Com este distanciamento dos transectos gerou-se novas batimetrias com diferentes distanciamentos: duas de 1000 metros e três de 1500 metros (Figura 24).

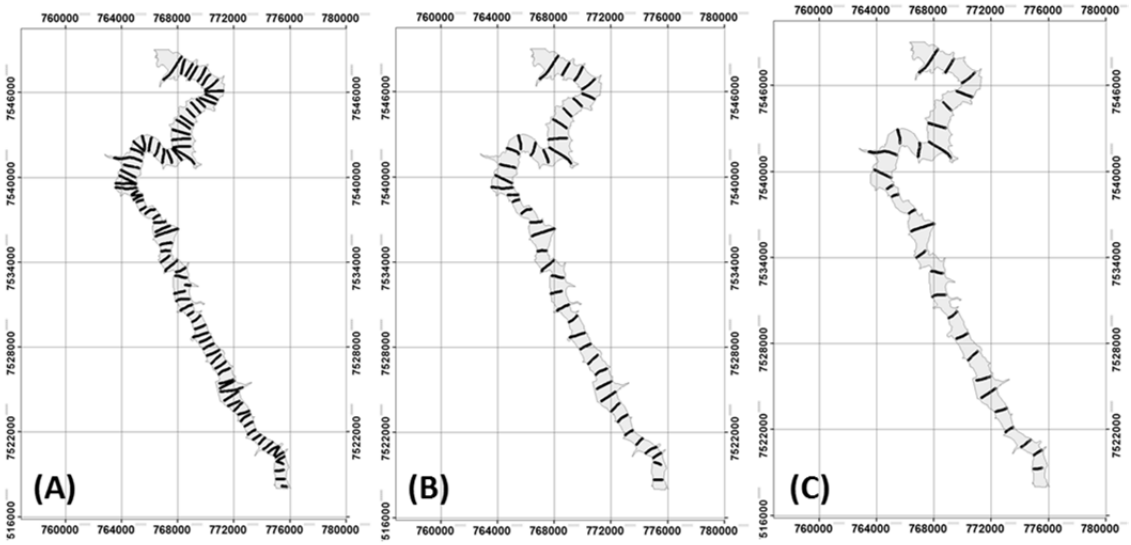

Figura 24 – Diferentes espaçamentos entre os transectos para o reservatório de Bariri, de 500m (A), 1000m (B), 1500m (C).

4.5.4. Reservatório de Ibitinga

O levantamento batimétrico do reservatório de Ibitinga foi realizado pelo Núcleo de Hidrometria CRHEA/EESC/USP entre os meses de agosto e setembro de 2004, totalizando seis dias de coleta de dados em campo e 309 seções levantadas. Foi utilizada uma sonda ADP de 1500 kHz da marca Sontek, um receptor GPS *Leica Geosystems* GS20 trabalhando com o sistema de correção diferencial Racal, e o *software River Surveyor* para a obtenção e processamento dos dados**.**

Foi realizado o mesmo procedimento utilizado para o reservatório de Bariri na geração das batimetrias com diferentes distanciamentos (Figura 25).

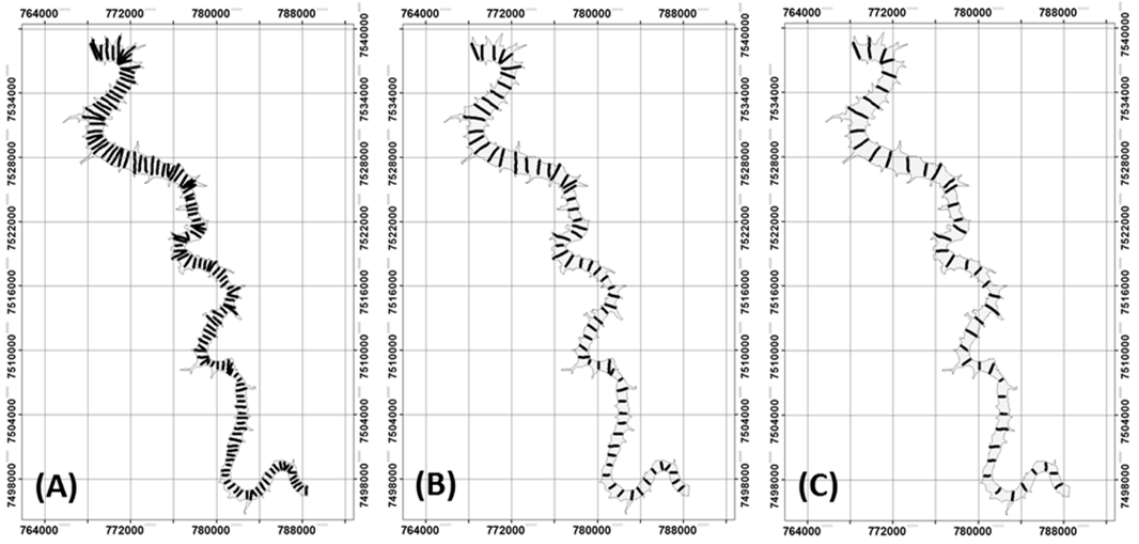

Figura 25 – Diferentes espaçamentos entre os transectos para o reservatório de Ibitinga, de 500m (A), 1000m (B), 1500m (C).

4.6. Inserção de Malha de Pontos (IMP)

O seguinte procedimento foi desenvolvido com o intuito de melhorar o processamento dos dados e o cálculo da relação Cota-Área-Volume. Foi observado, analisando os MDTs gerados com os dados da batimetria e o contorno do reservatório, que a simples geração do TIN gera erros ao modelar a região próxima ao contorno do reservatório e quanto maior o distanciamento entre os transectos maiores são as diferenças observadas. Os efeitos da triangulação dos transectos com a borda do reservatório geram grandes faces planas, que não exprimem a morfologia do terreno.

Com o intuito de minimizar estes erros foi estudada e desenvolvida uma sequência de procedimentos que minimizam este problema e representam de maneira mais coerente as feições do terreno naquela região, aumentando a conectividade entre os transectos e reduzindo a influência da borda do reservatório na geração do MDT.

Utilizou-se a batimetria do reservatório do Lobo como local de estudo e validação da técnica proposta. Posteriormente, o método foi aplicado nos reservatórios de Bariri e Ibitinga.

De posse dos dados da batimetria e do contorno do reservatório propõe-se a seguinte sequência de procedimentos para a geração do MDT e obtenção da tabela Cota-Área-Volume:

1) Extrair o contorno da batimetria (pontos extremos) e gerar um polígono. São utilizados o primeiro e o último dado coletado de cada transecto e também os transectos que representam os extremos do reservatório (Figura 26).

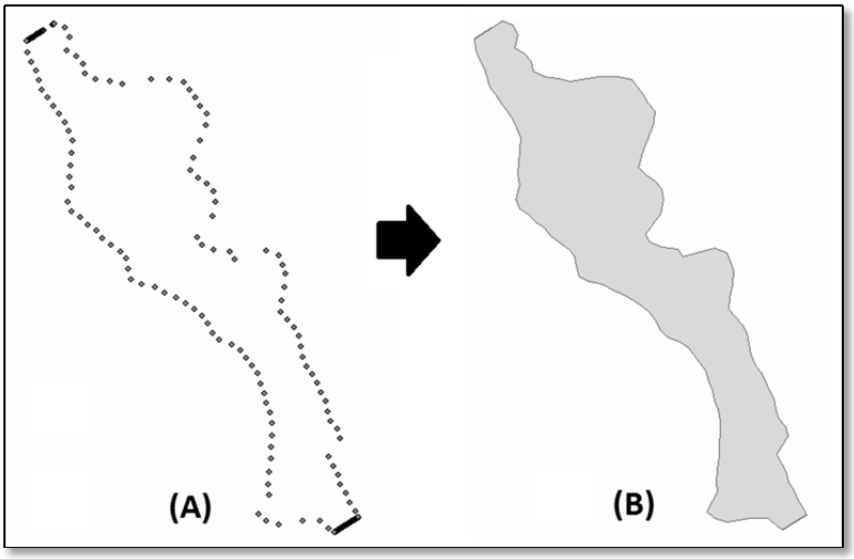

Figura 26 - Polígono gerado (B) a partir dos pontos do contorno da batimetria (A).

2) Gerar um TIN utilizando somente os dados da batimetria do reservatório (Figura 27).

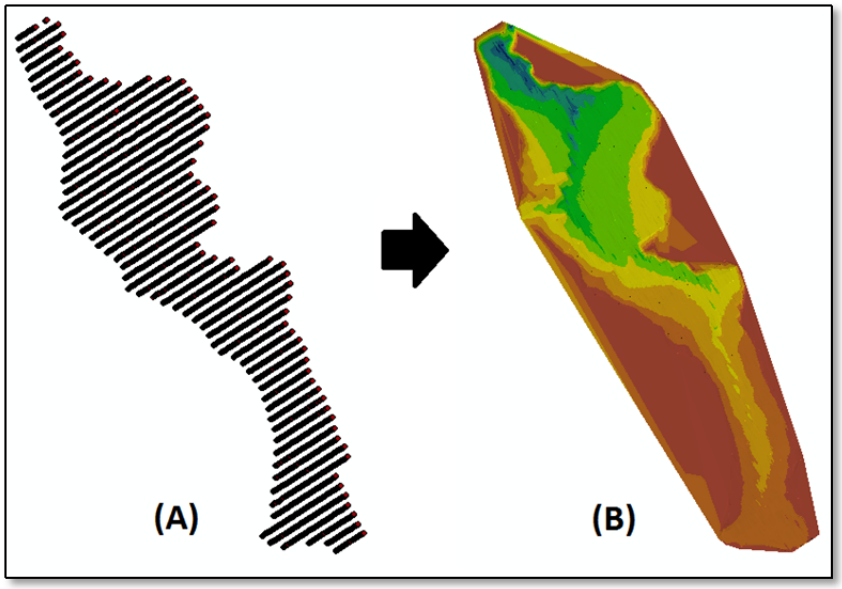

Figura 27 - Batimetria (A) e TIN gerado (B).

3) Gerar uma imagem raster com o TIN obtido na segunda etapa (Figura 28). Neste caso, quanto menor o tamanho da célula melhor a precisão dos dados. Foi utilizado o tamanho de célula de 5 metros.

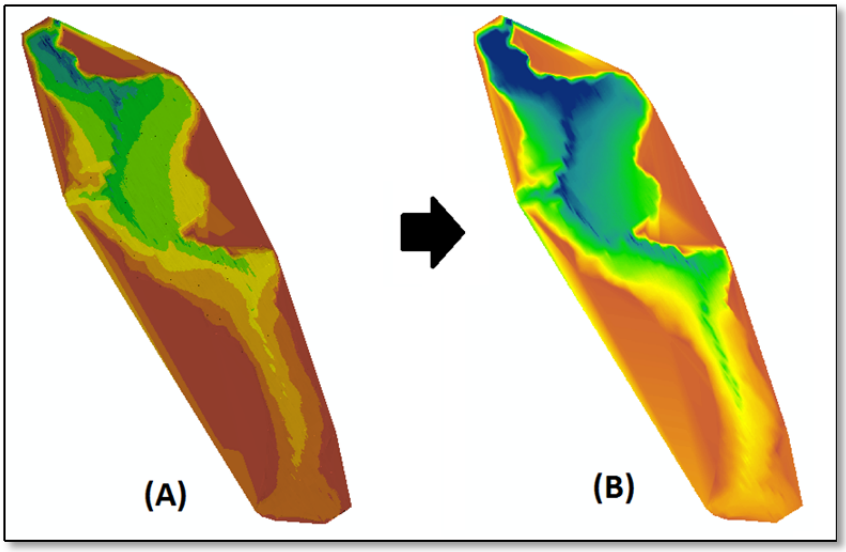

Figura 28 - TIN (A) e Raster (B).

4) Extrair uma máscara do Raster utilizando o contorno da batimetria obtido na primeira etapa (Figura 29). Este procedimento é necessário para subtrair as áreas geradas que estão fora dos limites da batimetria.

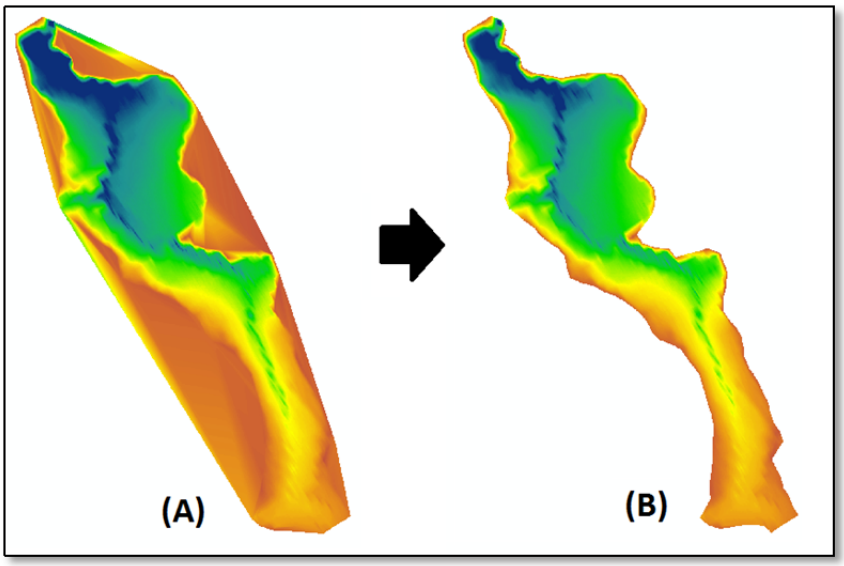

Figura 29 - Raster (A) e Raster delimitado pelo contorno da batimetria (B).

5) Converter em pontos a máscara do Raster extraída na quarta etapa (Figura 30). Cada pixel do raster é convertido em um ponto com um valor de cota e suas coordenadas.

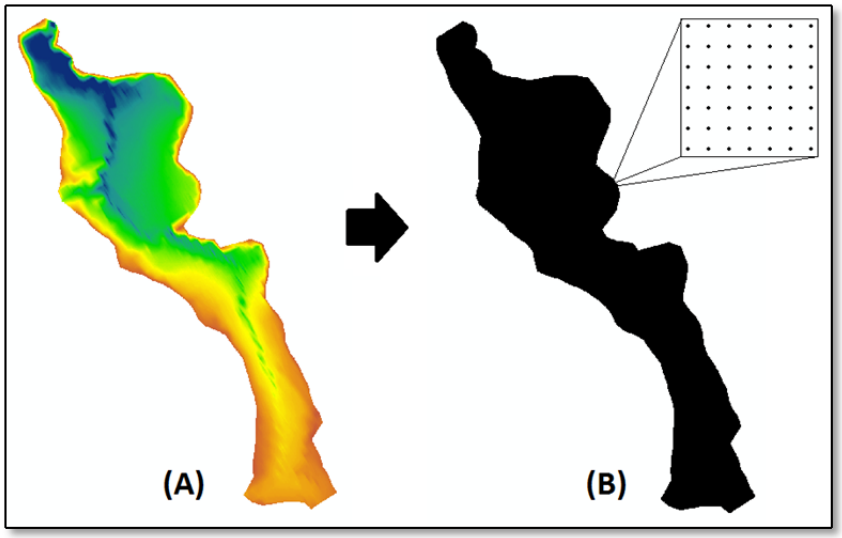

Figura 30 - Raster delimitado pelo contorno da batimetria (A) e malha de pontos (B).

6) Gerar o TIN final (Figura 31) utilizando a malha de pontos obtido na quinta etapa (*masspoint)*, os transectos da batimetria (masspoint) e a borda original do reservatório (*softclip*).

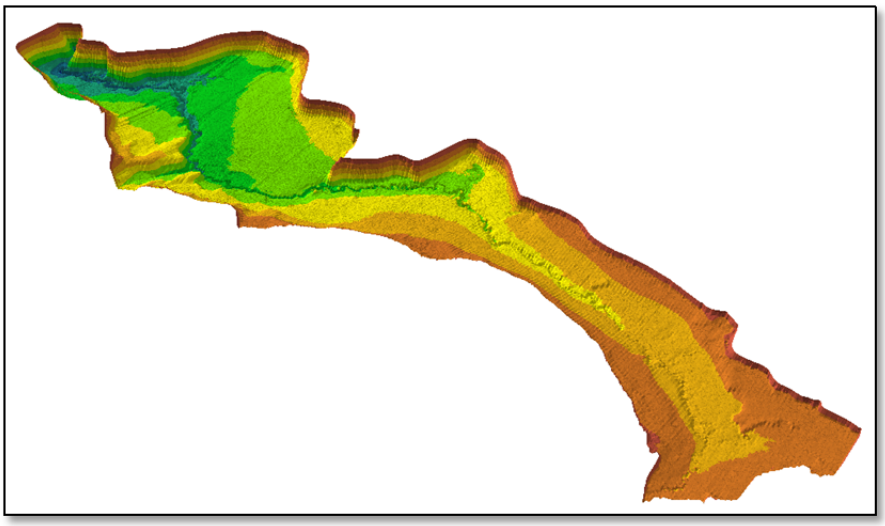

Figura 31 – MDT final do reservatório utilizando o método IMP.

7) Calcular a área e o volume para diferentes cotas do reservatório. Foi utilizada a ferramenta *Surface Volume (3D Analyst)* do Arcgis 9.3 para este fim.

O processo de modelagem do MDT comumente utilizado faz o uso exclusivamente da batimetria e do contorno do reservatório para a geração do TIN em apenas uma etapa. Este procedimento será denominado neste texto como método TIN tradicional.

O objetivo principal do método de Inserção da Malha de Pontos (IMP) é reduzir a influência da borda do reservatório e aumentar a influência da triangulação entre os transectos na geração do MDT final. A análise e comparação do método de modelagem TIN tradicional com o método de modelagem IMP serão discutidas no item 5.3.2.

4.7. Ferramenta computacional CAV-NH

Aliando as funcionalidades da linguagem Python e as bibliotecas do Arcgis 9.3 foi desenvolvida uma ferramenta computacional, denominada CAV-NH, tendo por objetivo otimizar o processo de geração do MDT e da relação Cota-Área-Volume aplicando o método IMP.

O CAV-NH verifica a disponibilidade e licenças das bibliotecas e integra as ferramentas *3D Analyst tools*, *Spacial Analyst tools* e *Data Management tools* do Arcgis. Para o funcionamento do CAV-NH o Arcgis deve estar com a licença em dia e estas extensões habilitadas. Pode ser utilizado por usuários leigos no software Arcgis, sendo de simples utilização, onde após se elegerem os dados de entrada, apenas com um comando é gerado um arquivo texto com os dados da tabela CAV. São gerados também os dados intermediários do processo do método, como TIN, *raster* e *shapefiles*.

A ferramenta foi dividida em quatro módulos para melhor atender as demandas e necessidades de cada usuário. Cada módulo trabalha separadamente, exigindo diferentes dados de entrada. Os dois primeiros geram o MDT pelo método de modelagem TIN tradicional e os dois últimos fazem uso do método IMP.

O módulo principal da ferramenta (módulo 4), após a série de processos definidos pelo método IMP, gera uma malha interna de pontos entre a batimetria original e determina a relação CAV.

Por ter sido desenvolvido durante a pesquisa, mais detalhes sobre os dados de entrada, funcionalidades, processos, bem como os produtos gerados serão apresentados na seção “Resultados e discussão” no item 5.2.

5. Resultados e discussão

5.1. Global Navigation System Satellite – GNSS

Após a análise dos testes de dispersão foi observado (Figura 32, Figura 33 e Figura 34) que a acurácia do equipamento mostrou-se satisfatória para o estudo em questão, com variações máximas de 70 cm em torno da média, mesmo com a possibilidade de o barco ter se movimentado durante os testes, e padrão de espalhamento compatível com algumas formas de correção diferencial, como a correção diferencial via satélite tipo VBS (*Virtual Base Station*) fornecida pela OMNISTAR e aceita pela ANA (2011), a qual fornece precisão sub-métrica (OMNISTAR, 2012). Foi observado um número mínimo de 10 satélites e DOP (*Dilution of precision*) máximo de 0,8.

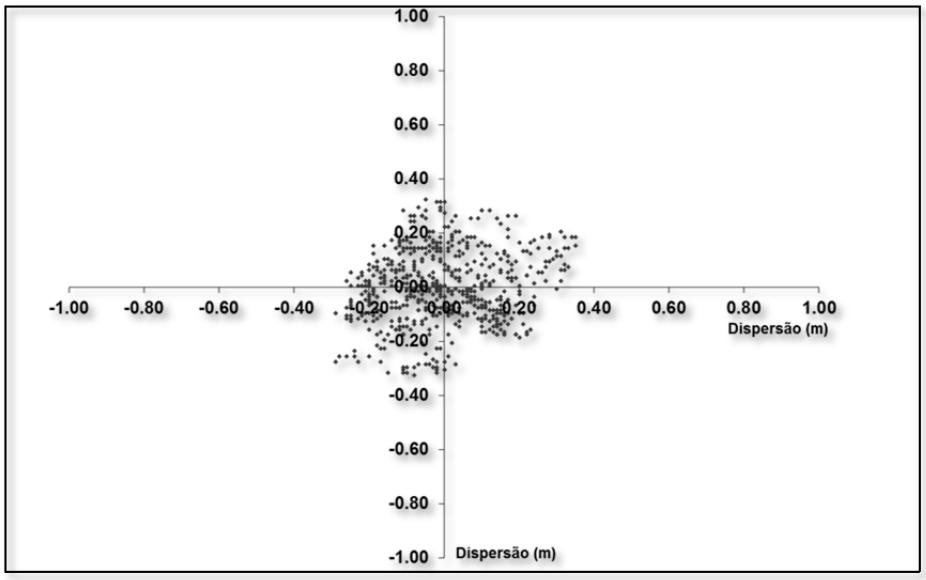

Figura 32 - Dispersão das coordenadas geodésicas no dia 17/05/2010 das 14:23h às 14:33h.

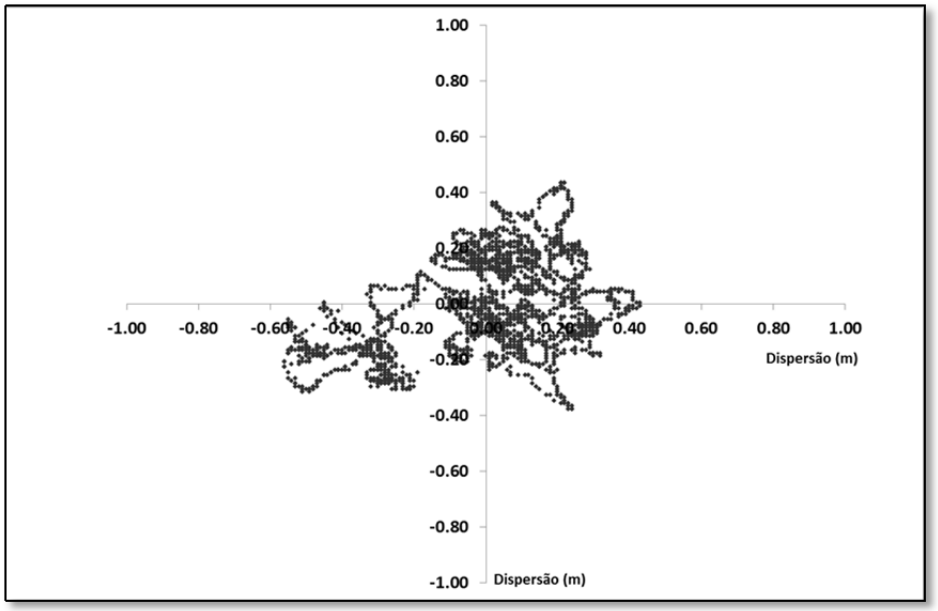

Figura 33 - Dispersão das coordenadas geodésicas no dia 20/05/2010 das 16:03h às 16:48h.

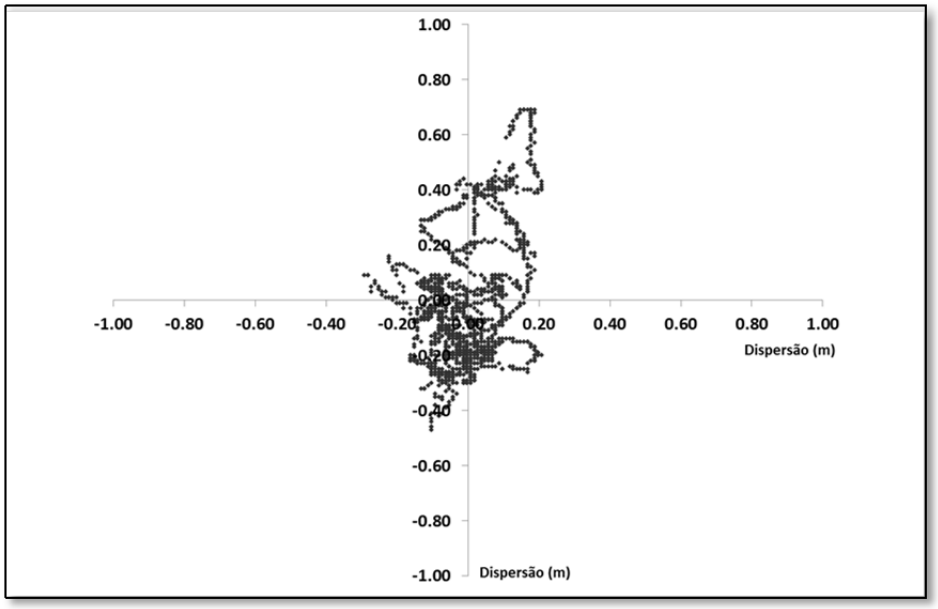

Figura 34 - Dispersão das coordenadas geodésicas no dia 20/05/2010 das 16:52h às 17:20h.

Técnicas para correção do posicionamento GPS, como DGPS (*Differential Global Positioning System*) ou RTK (*Real Time Kinematic*) que são indicadas pela orientação ANA

(2011) não foram empregadas por não haver equipamento disponível. Entretanto, foram respeitados os limites estabelecidos na norma: rastreio de no mínimo 6 satélites simultaneamente, acurácia posicional melhor ou igual a 1 metro e um DOP próximo de 1.

Foi verificada, antecipadamente, a boa condição da constelação de satélites disponíveis para as datas e local de coleta de dados. Esta condição foi depois confirmada pelo número de satélites registrados no GPS que nunca foi inferior a 6, com uma média de 9 satélites. O DOP calculado durante a coleta de dados em nenhum caso ultrapassou o valor de 1,7 com a média de 0,9.

Estes índices e resultados garantiram uma boa precisão dos dados planimétricos coletados para este estudo utilizando o GPS.

5.2. Ferramenta computacional CAV-NH

A ferramenta computacional CAV-NH tem como objetivo calcular a relação Cota-Área-Volume e implementar o método IMP. Para este fim, foram desenvolvidos 4 módulos, com diferentes dados de entrada, para atender a necessidade do usuário, tendo em vista que cada reservatório tem uma particularidade. Todos os módulos têm como resultado um arquivo em formato texto com os valores de cota, área e volume do reservatório. Além da tabela CAV, os quatro módulos também disponibilizam os resultados intermediários de cada método, sendo que estes ficam disponíveis na pasta de saída configurada pelo usuário.

Os quatro módulos processam os dados sem a necessidade do Arcgis estar em funcionamento, sendo somente necessário que o software esteja instalado no computador e com as licenças das ferramentas *Data Management*, *Conversion Tools*, *3D Analyst* e do *Spatial Analyst* habilitadas e válidas.

O primeiro procedimento a ser realizado pelo usuário é a indicação do endereço no qual o Arcgis 9.3 foi instalado no computador, que é realizado na aba “configurações do sistema” da ferramenta (Figura 35). Esta configuração é necessária para que seja estabelecido o acesso às bibliotecas e às funcionalidades deste software dentro do CAV-NH.

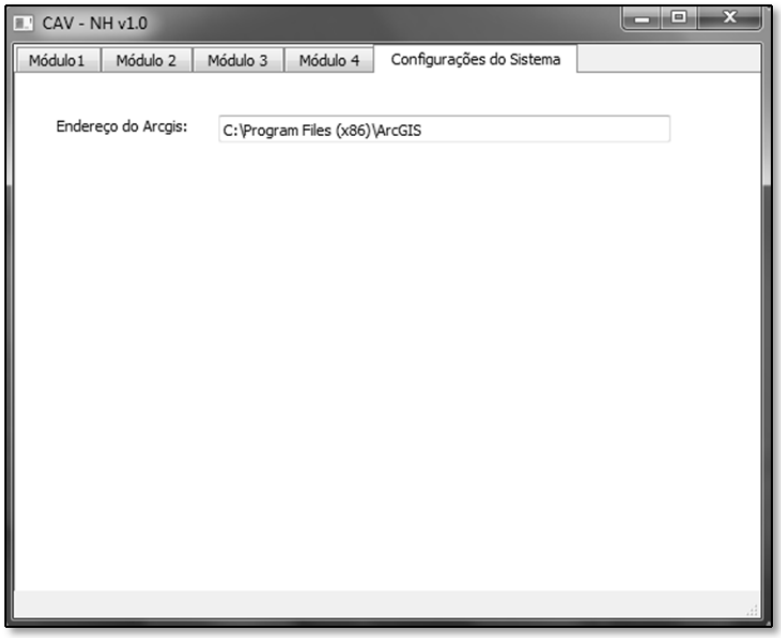

Figura 35 - Configurações da ferramenta computacional CAV-NH.

O primeiro módulo (Figura 36) determina a tabela CAV utilizando um TIN, definido previamente pelo usuário como dado de entrada. Possibilita também que sejam definidas a cota máxima (limite superior), a cota mínima (limite inferior) e o intervalo que a tabela CAV deve ser gerada.

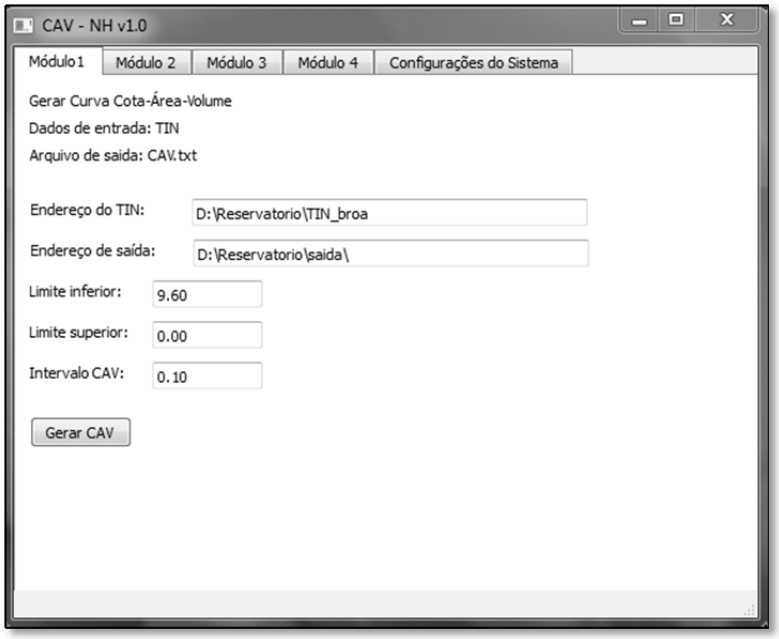

Figura 36 - Módulo 1 da ferramenta computacional CAV-NH.

O segundo módulo (Figura 37) determina a relação CAV empregando os dados batimétricos e da borda do reservatório. Os dados da batimetria devem ser previamente tratados para a correção de eventuais erros da coleta de dados. A batimetria (x, y, z) deve estar em um arquivo formato texto (txt) utilizando a tabulação como divisor e separador de decimal “ponto”, com a primeira coluna correspondendo à latitude, a segunda à longitude (ambas em UTM) e a terceira coluna à cota/profundidade expressa em metros. O arquivo da borda deve estar em formato *shape file* (shp) e possuir dados de cota. Este módulo tem como resultado a tabela CAV obtida pelo método de modelagem TIN tradicional.

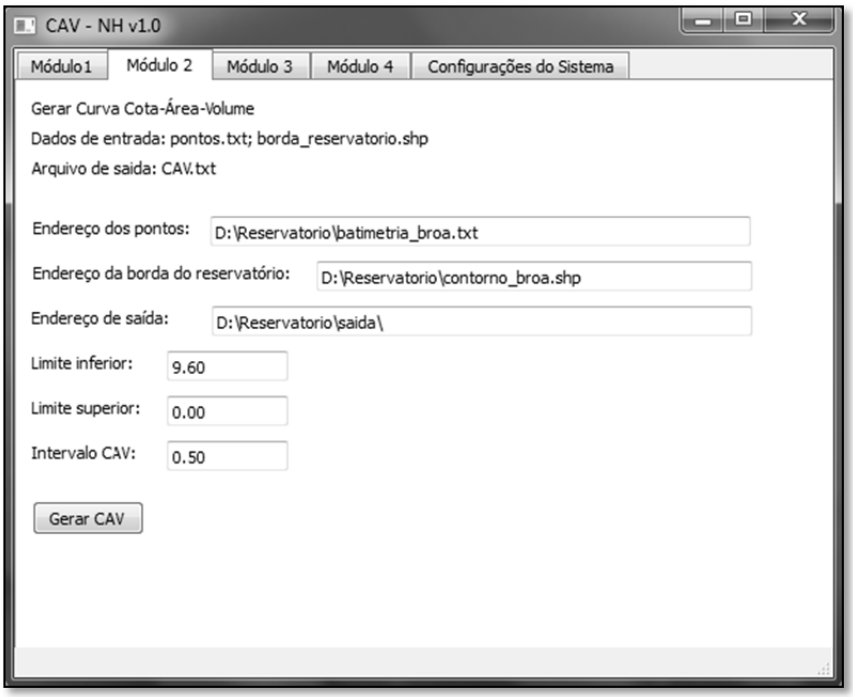

Figura 37 - Módulo 2 da ferramenta computacional CAV-NH.

A relação CAV, no terceiro módulo (Figura 38), é obtida utilizando o método IMP, trazendo como dados de entrada os pontos cotados (batimetria do reservatório) em formato texto, o polígono do contorno do reservatório e o polígono formado pelos pontos mais extremos da batimetria (borda da batimetria), ambos em formatos *shape file*.

O quarto módulo (Figura 39) também se vale do método IMP e difere do terceiro módulo por gerar o contorno da batimetria utilizando pontos cotados das bordas direita, esquerda, superior e inferior da batimetria, todos em formato texto. Com estes quatro

arquivos são gerados o contorno da batimetria e então o processo segue do mesmo modo que no terceiro módulo. Este foi o módulo utilizado para obter os resultados deste trabalho, por ser mais fácil gerar as diversas combinações dos distanciamentos que foram usados como dados de entrada.

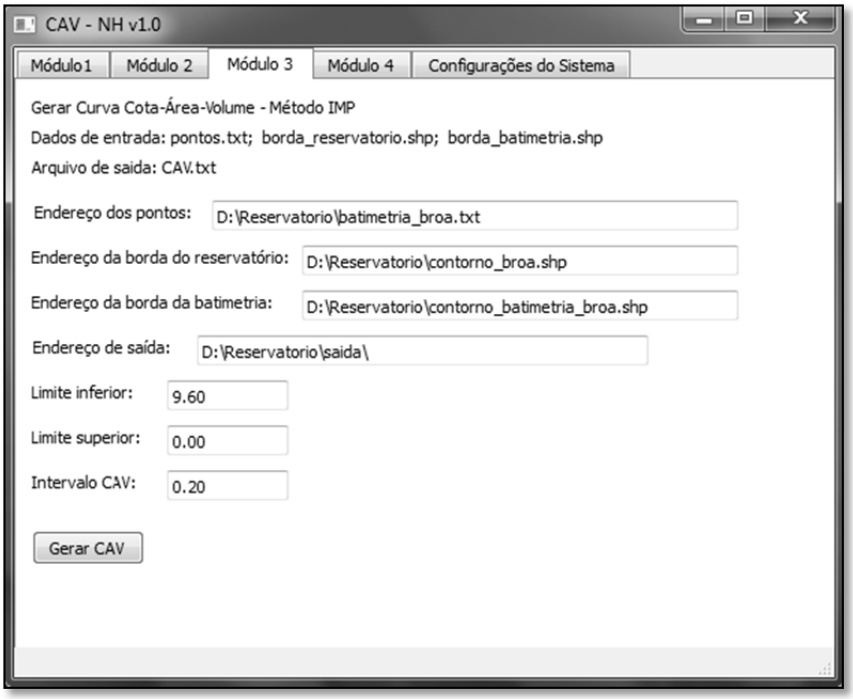

Figura 38 - Módulo 3 da ferramenta computacional CAV-NH.

Este módulo realiza automaticamente os seguintes procedimentos utilizando a biblioteca do Arcgis:

- Carrega os dados da batimetria em formato de pontos;
- Carrega o polígono do contorno do reservatório em formato *shape file*;
- Carrega as coordenadas das bordas direita, esquerda, superior e inferior do reservatório;
- Gera o polígono do contorno da batimetria;
- Gera um TIN somente com a batimetria (TIN1);

- Gera um Raster utilizando o TIN1 (Raster1);
- Extrai do Raster1, utilizando a borda da batimetria como máscara, um novo raster (Raster2);
- Converte o Raster2 em pontos (Pontos_Raster);
- Gera um TIN utilizando os pontos gerados a partir do Raster (Ponto_Raster) e a borda original do reservatório.

O tempo médio de processamento, para o reservatório do Lobo, com espaçamento de 10 metros foi de 20 minutos. Foi utilizado um computador Intel Core 2 Duo 1,5 GHz e 2 GB de memória RAM.

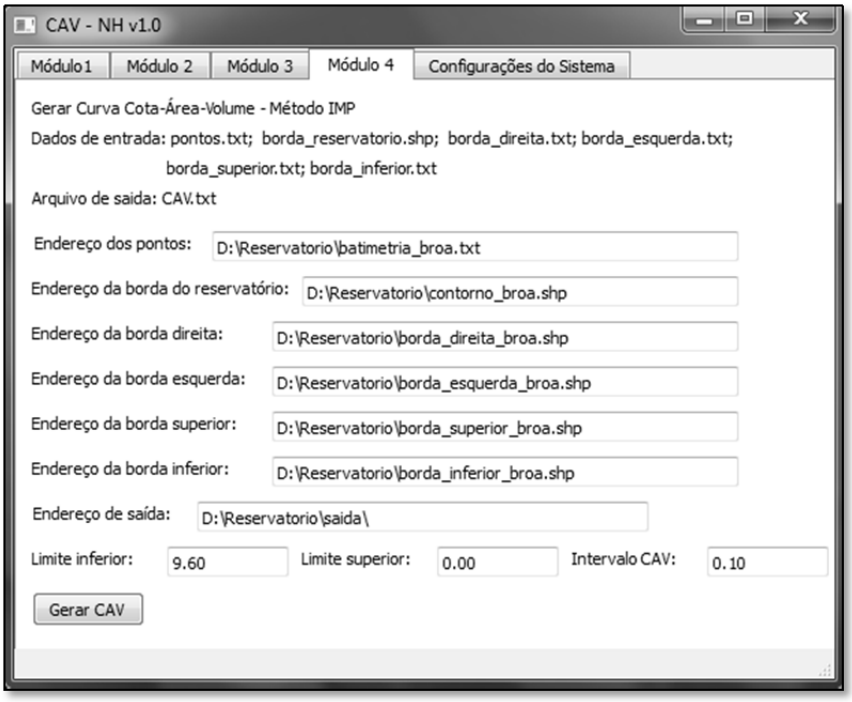

Figura 39 - Módulo 4 da ferramenta computacional CAV-NH.

Além do arquivo texto com os dados da tabela CAV, os quatro módulos também disponibilizam os resultados intermediários de cada método, sendo que estes ficam disponíveis no endereço da pasta de saída.

A automação do processo de obtenção da relação Cota-Área-Volume pela ferramenta computacional CAV-NH tornou o procedimento mais fácil, simples e ágil.

5.3. Reservatório do Lobo

A batimetria do reservatório do Lobo foi realizada com um distanciamento entre as seções batimétricas de 10 metros. Foram geradas diferentes combinações de batimetrias com os transectos equidistantes, com espaçamentos de 10m, 20m, 30m, e assim sucessivamente até 600m, sendo que o distanciamento de 10 metros possui somente um caso e o distanciamento de 600 metros possui 60 diferentes possíveis casos, totalizando 1830 combinações.

Para o melhor entendimento, neste trabalho, as combinações dos distanciamentos serão descritas na forma distanciamento-caso. Por exemplo, “100-7” onde o primeiro termo denota o distanciamento de 100 metros entre as seções transversais e o segundo termo indica o caso 7, ou seja, a sétima diferente combinação que este distanciamento apresenta. No primeiro caso de cada distanciamento a primeira seção utilizada é a mais ao norte, ou seja, a primeira seção mais próxima da barragem. Para o segundo caso a primeira seção utilizada é segunda seção mais ao norte, e assim por diante.

A batimetria de 10 metros será descrita como batimetria original e os MDTs e volumes obtidos deste, descritos como referência, serão base para os cálculos das variações de volume para as diferentes combinações de distanciamentos.

Foram analisados os MDTs e as tabelas CAV geradas para cada distanciamento, num total de 3660 diferentes casos para os dois métodos. Inicialmente utilizou-se o método de modelagem TIN tradicional, onde o TIN é calculado utilizando a batimetria e o contorno do reservatório. Em uma segunda etapa os resultados foram obtidos utilizando o método IMP.

5.3.1. Método de modelagem TIN tradicional

Foram gerados 1830 MDTs para os diversos casos dos diferentes espaçamentos, utilizando o método de modelagem TIN tradicional. Na Figura 40 são mostradas as seções batimétricas espaçadas de 10, 100, 200, 300, 400, 500 e 600 metros para o primeiro caso.

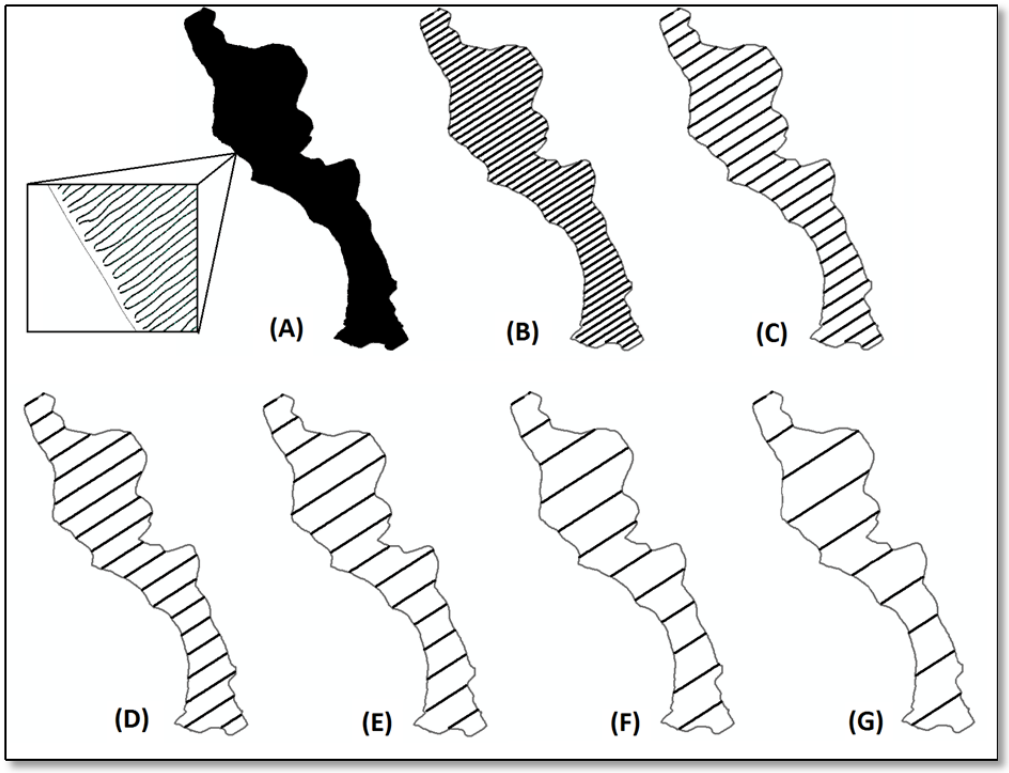

Figura 40 - Distanciamento entre as seções batimétricas. (A)10 metros; (B) 100 metros; (C) 200 metros; (D) 300 metros; (E) 400 metros; (F) 500 metros; (G) 600 metros.

Após a preparação dos arquivos, com os diferentes espaçamentos e acrescentando a borda do reservatório, foi gerado um TIN para cada um dos casos. Os triângulos gerados pela interpolação para os distanciamentos de 10, 100, 200, 300, 400, 500 e 600 metros para o caso 1 são mostrados na Figura 41. Fica evidenciado que quanto maior a distância entre os transectos, maiores são os efeitos que as bordas têm na triangulação e maiores as áreas que não são cobertas pela interpolação, onde são geradas grandes faces planas.

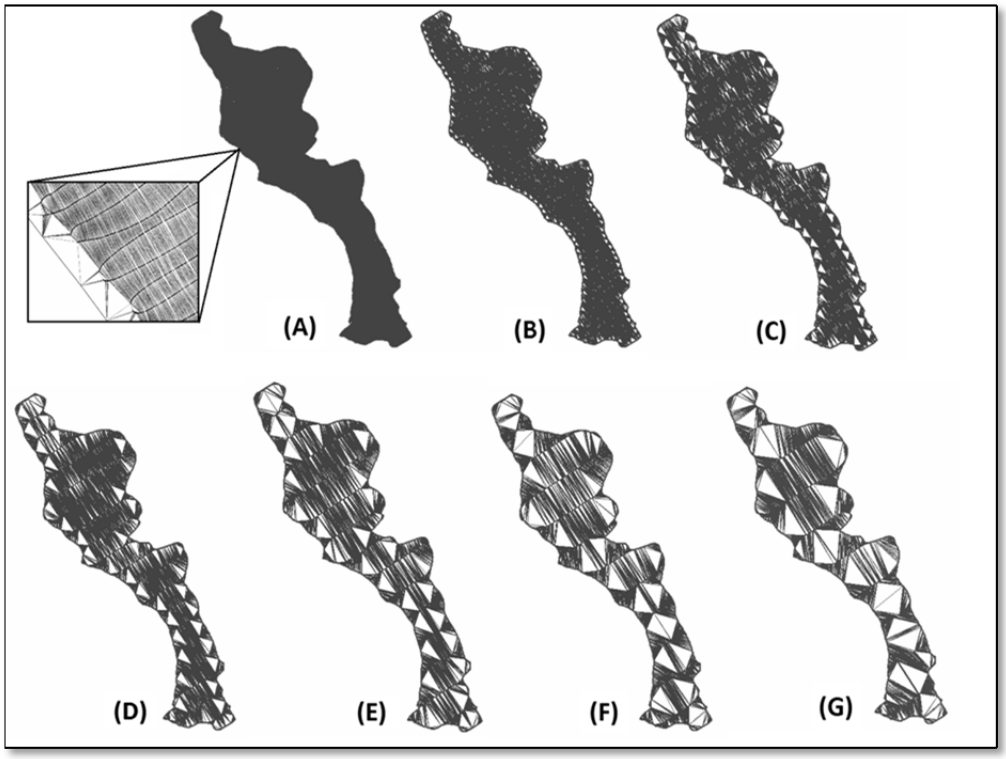

Figura 41 - Faces dos triângulos gerados pelo TIN para os diferentes distanciamentos entre as seções batimétricas resultantes do método tradicional. (A)10 metros; (B) 100 metros; (C) 200 metros; (D) 300 metros; (E) 400 metros; (F) 500 metros; (G) 600 metros.

Os efeitos de borda ficam demonstrados também nos MDTs (Figura 42, Figura 43 e Figura 44), onde ficam evidentes as consequências na topografia do terreno.

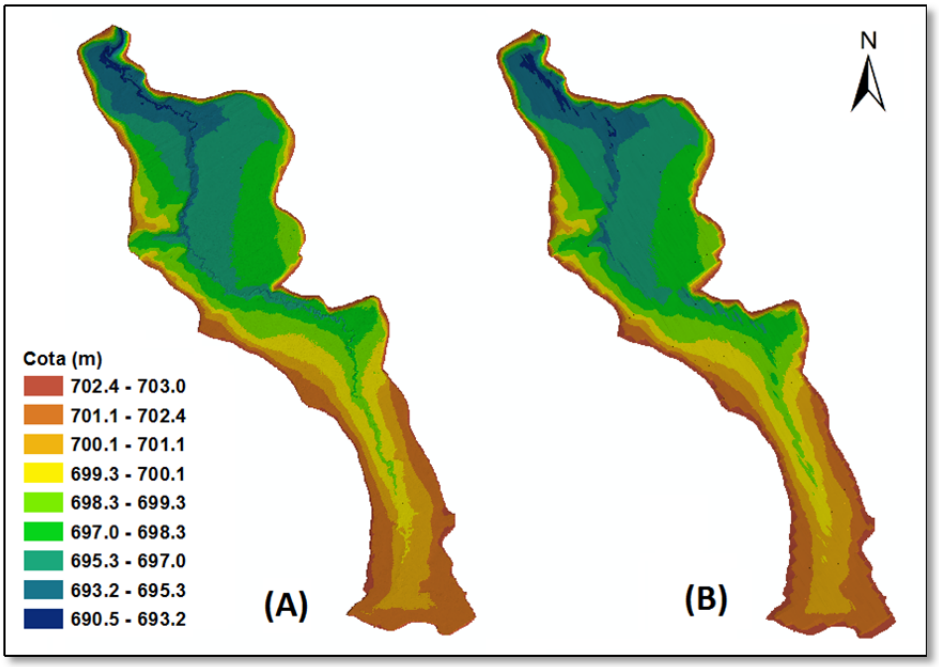

Figura 42 - TIN resultante da batimetria com distanciamentos de 10 metros (A) e 100 metros (B) utilizando o método tradicional.

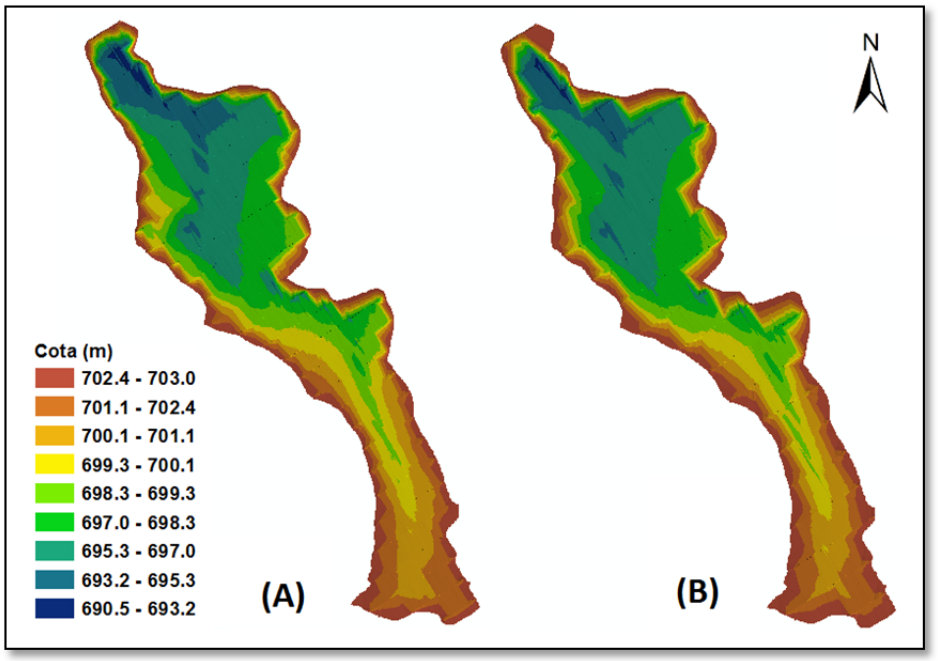

Figura 43 - TIN resultante da batimetria com distanciamentos de 200 metros (A) e 300 metros (B) utilizando o método tradicional.

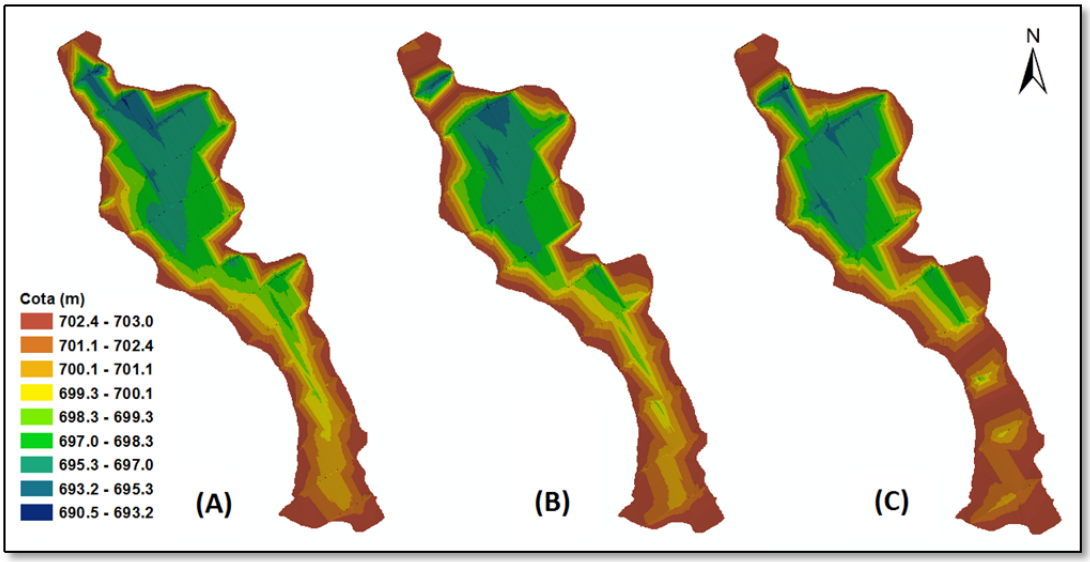

Figura 44 - TIN resultante da batimetria com distanciamentos de 400 metros (A); 500 metros (B) e 600 metros (C) utilizando o método tradicional.

Na Tabela 3 pode-se observar a variação de volume para o primeiro caso de cada espaçamento, considerando o nível do reservatório a 703 metros. No caso da batimetria original, com o espaçamento de 10 metros entre as seções, o volume calculado foi de 21,43 x 10^6 m^3. Aumentando o espaçamento entre as seções pode-se observar uma redução no volume calculado, uma variação de 2,64% para o espaçamento de 100 metros e de 35% para o de 600 metros. O primeiro caso de cada espaçamento foi escolhido para análise por ser o mais provável, sendo que o primeiro transecto começa o mais próximo possível da borda superior do reservatório (mais ao norte), próximo à barragem.

A variação do volume em dados percentuais é calculada pela variação do volume para uma dada combinação de distanciamento, em relação ao volume obtido pela batimetria original de 10 metros de distanciamento.

Tabela 3 - Variação do volume para diferentes configurações de espaçamento utilizando o método tradicional para a cota 703 m.

Reservatório-Distanciamento-Caso	Volume (m^3x10^6)	Variação Volume (%)	Reservatório-Distanciamento-Caso	Volume (m^3x10^6)	Variação Volume (%)
Broa_10_1	21,43		**Broa_310_1**	18,06	15,73%
Broa_20_1	21,40	0,13%	**Broa_320_1**	17,77	17,06%
Broa_30_1	21,36	0,30%	**Broa_330_1**	17,65	17,64%
Broa_40_1	21,32	0,51%	**Broa_340_1**	17,65	17,64%
Broa_50_1	21,25	0,84%	**Broa_350_1**	17,92	16,37%
Broa_60_1	21,21	1,04%	**Broa_360_1**	17,65	17,64%
Broa_70_1	21,08	1,64%	**Broa_370_1**	17,20	19,72%
Broa_80_1	21,02	1,90%	**Broa_380_1**	16,82	21,50%
Broa_90_1	20,94	2,27%	**Broa_390_1**	16,77	21,73%
Broa_100_1	20,86	2,64%	**Broa_400_1**	16,83	21,47%
Broa_110_1	20,74	3,20%	**Broa_410_1**	16,50	23,00%
Broa_120_1	20,65	3,61%	**Broa_420_1**	16,23	24,27%
Broa_130_1	20,49	4,38%	**Broa_430_1**	16,10	24,84%
Broa_140_1	20,35	5,04%	**Broa_440_1**	15,95	25,55%
Broa_150_1	20,37	4,93%	**Broa_450_1**	15,78	26,35%
Broa_160_1	20,12	6,09%	**Broa_460_1**	15,67	26,89%
Broa_170_1	20,13	6,07%	**Broa_470_1**	15,37	28,26%
Broa_180_1	20,01	6,62%	**Broa_480_1**	15,08	29,63%
Broa_190_1	19,78	7,71%	**Broa_490_1**	15,16	29,27%
Broa_200_1	19,64	8,35%	**Broa_500_1**	14,85	30,72%
Broa_210_1	19,67	8,22%	**Broa_510_1**	14,77	31,09%
Broa_220_1	19,45	9,21%	**Broa_520_1**	14,46	32,53%
Broa_230_1	19,15	10,65%	**Broa_530_1**	14,16	33,92%
Broa_240_1	19,05	11,08%	**Broa_540_1**	13,88	35,23%
Broa_250_1	18,95	11,57%	**Broa_550_1**	13,96	34,85%
Broa_260_1	18,72	12,65%	**Broa_560_1**	13,89	35,20%
Broa_270_1	18,63	13,06%	**Broa_570_1**	14,12	34,12%
Broa_280_1	18,46	13,87%	**Broa_580_1**	13,97	34,81%
Broa_290_1	18,37	14,26%	**Broa_590_1**	13,76	35,80%
Broa_300_1	18,29	14,62%	**Broa_600_1**	13,85	35,38%

Na Figura 42 (B) percebe-se que para o caso do distanciamento de 100 metros já há uma perda de qualidade no MDT, principalmente no delineamento do curso natural do rio, no entanto, não é possível ainda caracterizar visualmente os efeitos de borda. Contudo, há uma variação do volume calculado de 2,64% (Tabela 3).

Para o distanciamento de 500 e 600 metros as bordas triangulam entre si, o primeiro próximo à barragem, e o segundo próximo à barragem e também na região de cabeceira (Figura 41-F e G e Figura 44-B e C), gerando uma área plana dentro do reservatório, com a mesma cota das bordas e tendo como resultado volumes 30,72% e 35,38% menor que o calculado para o MDT de referência.

A Figura 45 apresenta para as cotas 703, 701 e 699 metros do reservatório a variação do volume obtida pelo método de modelagem TIN tradicional para todos os casos de distanciamentos entre as seções. O mesmo ocorre para a Figura 46 com as cotas de 697, 695 e 693 metros. As figuras demonstram que o erro no cálculo do volume aumenta com um maior espaçamento entre os transectos.

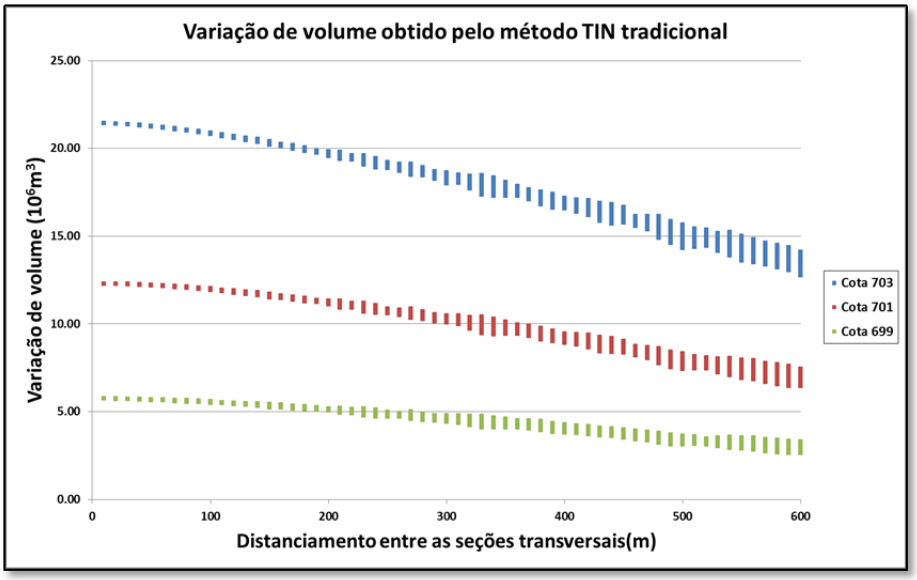

Figura 45 - Variação do volume calculado com o método TIN tradicional para os diferentes distanciamentos em relação ao nível do reservatório para as cotas 703, 701 e 699 m.

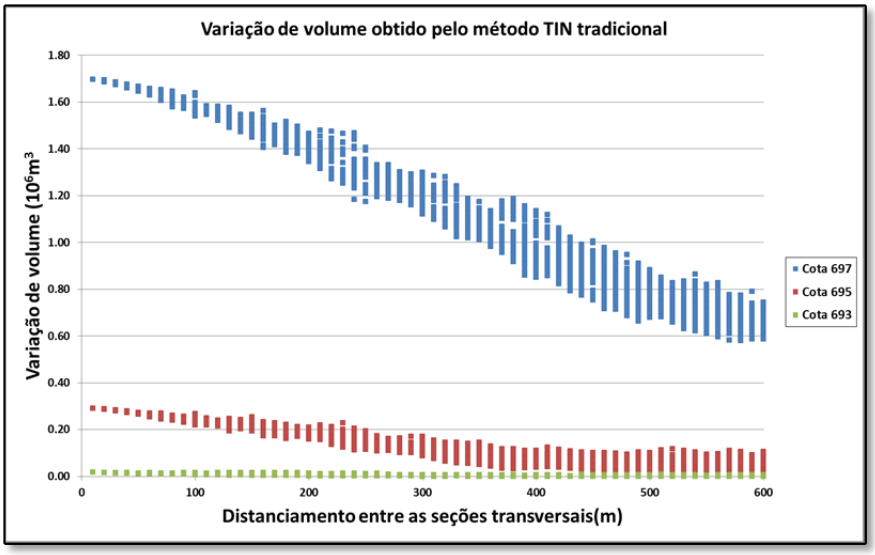

Figura 46 - Variação do volume calculado com o método TIN tradicional para os diferentes distanciamentos em relação ao nível do reservatório para as cotas 697, 695 e 693 m.

A variação percentual do volume se torna maior para cotas mais baixas, o que fica evidente na comparação mostrada na Figura 47. Há também uma maior variação da amplitude do volume calculado em cada distanciamento, que se torna maior para as cotas mais baixas, indicando que estas são mais sensíveis às mudanças de configurações dos transectos. Por exemplo, para o distanciamento de 600 metros a variação do volume calculado é de 63% a 97%, dependendo da configuração utilizada.

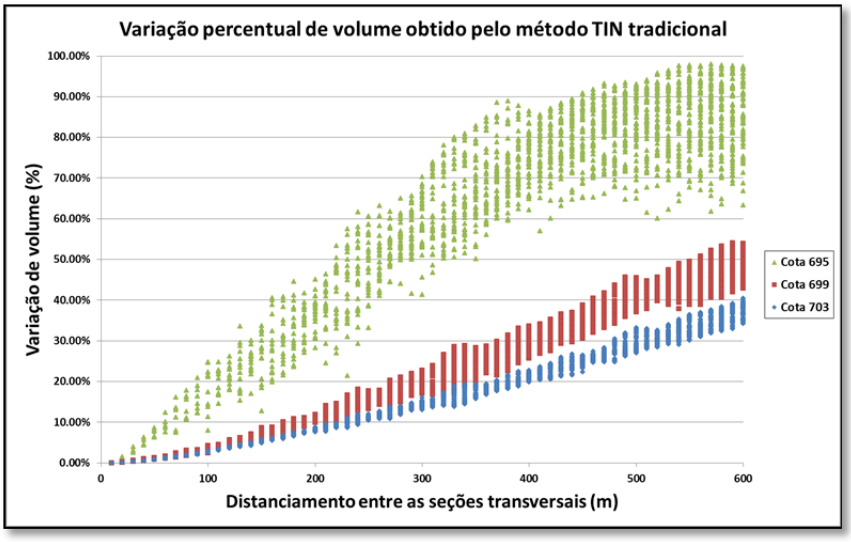

Figura 47 - Variação percentual do volume, para as cotas 703, 699 e 695 metros, calculado pelo método TIN tradicional.

5.3.2. Método de Inserção de Malha de Pontos (IMP)

Para a modelagem pelo método de Inserção de Malha de Pontos (IMP) foram utilizadas as mesmas combinações do método de modelagem TIN tradicional, totalizando 1830 MDTs. As faces dos triângulos da interpolação TIN são mostradas na Figura 48. Pode-se observar que em grande parte do reservatório há uma densa malha de triângulos, que pode ser visto no detalhe da Figura 48 (A), sendo esta proveniente da malha de pontos inserida antes da triangulação final.

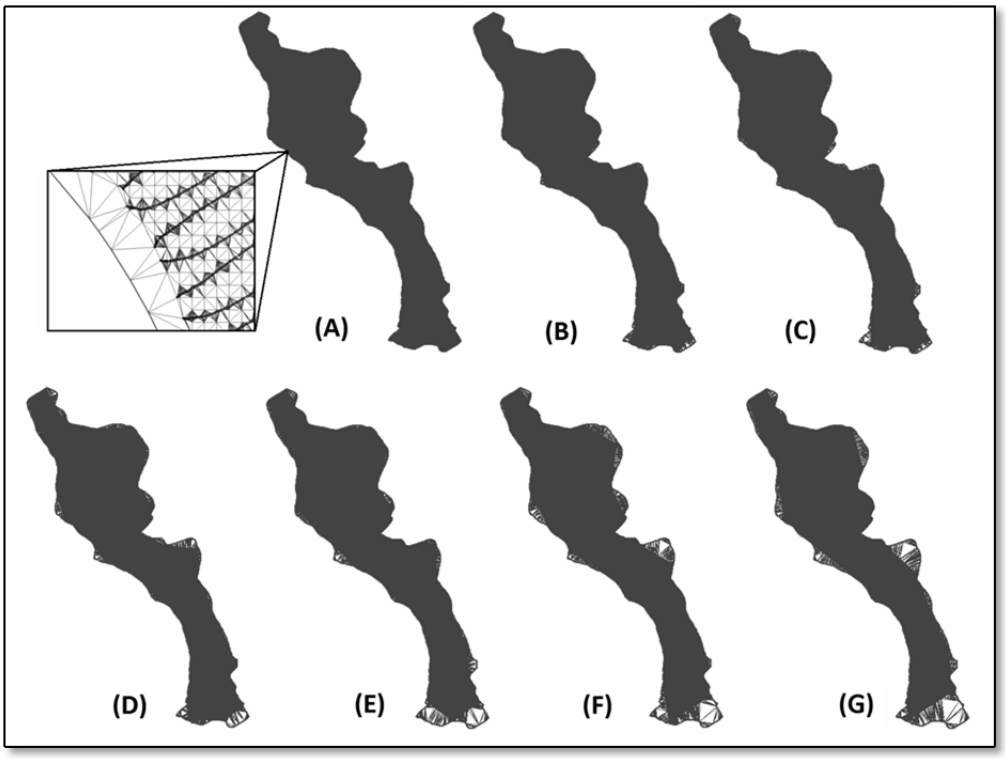

Figura 48 - Faces dos triângulos gerados pelo TIN para os diferentes distanciamentos entre as seções batimétricas resultantes do método IMP. (A) 10 metros; (B) 100 metros; (C) 200 metros; (D) 300 metros; (E) 400 metros; (F) 500 metros; (G) 600 metros.

O efeito da malha de pontos pode ser notado nos MDTs exibidos na Figura 49, Figura 50 e Figura 51, onde não há uma descaracterização representativa das áreas próximas às bordas do reservatório. Mesmo para o distanciamento de 600 metros (Figura 51 - C) a topografia do terreno ainda preserva grande parte da topografia do reservatório.

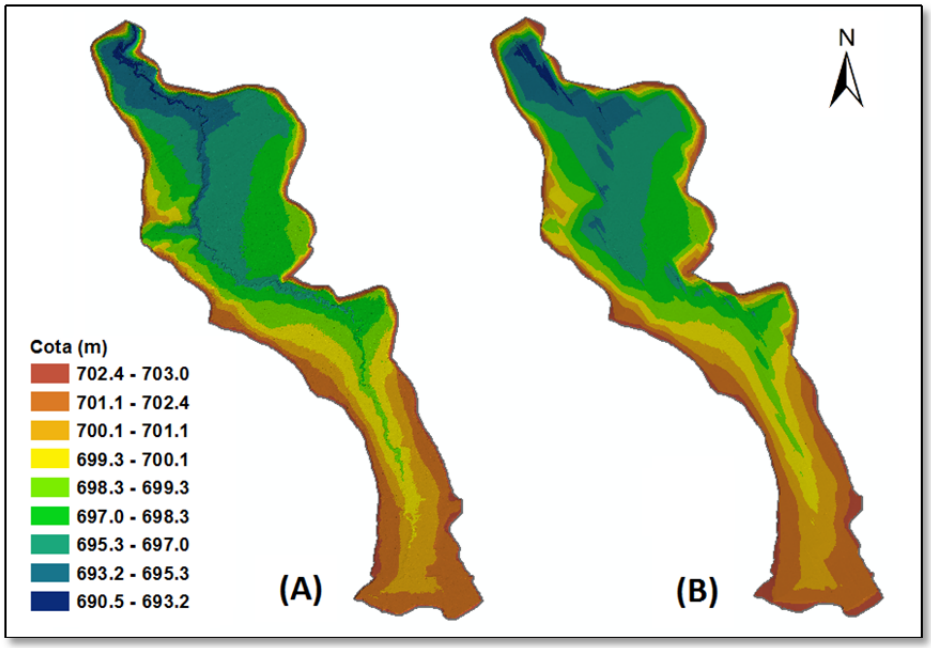

Figura 49 - TIN resultante da batimetria com distanciamento de 10 metros (A) e 100 metros (B) utilizando o método IMP.

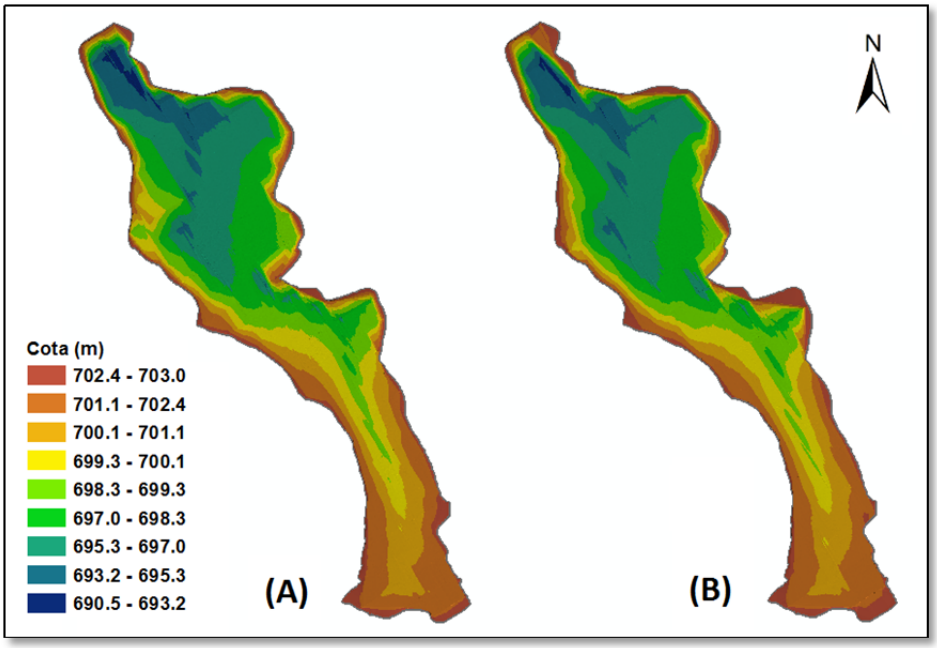

Figura 50 - TIN resultante da batimetria com distanciamento de 200 metros (A) e 300 metros (B) utilizando o método IMP.

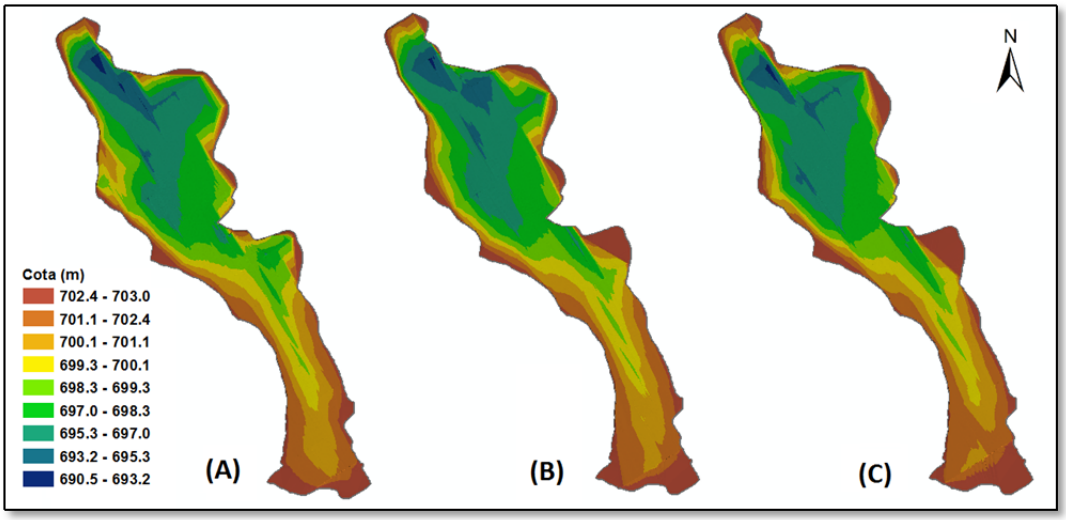

Figura 51 - TIN resultante da batimetria com distanciamento de 400 metros (A); 500 metros (B) e 600 metros (C) utilizando o método IMP.

A variação do volume em relação à batimetria com intervalo de 10 metros, referente à primeira combinação dos casos estudados, é apresentada na Tabela 4. É mostrado, por exemplo, que a variação entre o volume calculado para as batimetrias com os distanciamentos de 10 e 100 metros é de 1,06% e para a de 10 e 600 metros de 11,64%. Destaca-se que em nenhum dos casos o método IMP gerou resultados de volume maiores que o do MDT de referência, ou seja, para nenhum dos casos ele superestimou o volume calculado.

Tabela 4 - Variação do volume para diferentes configurações de espaçamento utilizando o método de Inserção da Malha de Pontos (IMP) para a cota 703 m.

Reservatório-Distanciamento-Caso	Volume (m^3x10^6)	Variação Volume (%)	Reservatório-Distanciamento-Caso	Volume (m^3x10^6)	Variação Volume (%)
Broa-10	21,43		**Broa-310-1**	19,94	6,95%
Broa-20-1	21,41	0,08%	**Broa-320-1**	19,68	8,17%
Broa-30-1	21,40	0,14%	**Broa-330-1**	19,55	8,78%
Broa-40-1	21,38	0,22%	**Broa-340-1**	19,73	7,94%
Broa-50-1	21,34	0,41%	**Broa-350-1**	20,13	6,06%
Broa-60-1	21,34	0,41%	**Broa-360-1**	20,25	5,53%
Broa-70-1	21,26	0,78%	**Broa-370-1**	19,36	9,65%
Broa-80-1	21,25	0,84%	**Broa-380-1**	19,43	9,32%
Broa-90-1	21,21	1,03%	**Broa-390-1**	19,68	8,15%
Broa-100-1	21,20	1,06%	**Broa-400-1**	19,78	7,71%
Broa-110-1	21,15	1,28%	**Broa-410-1**	20,01	6,61%
Broa-120-1	21,15	1,30%	**Broa-420-1**	19,83	7,47%
Broa-130-1	21,02	1,90%	**Broa-430-1**	19,34	9,75%
Broa-140-1	20,92	2,37%	**Broa-440-1**	19,51	8,96%
Broa-150-1	21,06	1,75%	**Broa-450-1**	19,66	8,26%
Broa-160-1	20,85	2,68%	**Broa-460-1**	19,35	9,68%
Broa-170-1	20,98	2,12%	**Broa-470-1**	19,22	10,30%
Broa-180-1	20,92	2,39%	**Broa-480-1**	19,39	9,53%
Broa-190-1	20,66	3,60%	**Broa-490-1**	19,17	10,56%
Broa-200-1	20,63	3,72%	**Broa-500-1**	19,14	10,68%
Broa-210-1	20,93	2,34%	**Broa-510-1**	19,04	11,15%
Broa-220-1	20,68	3,50%	**Broa-520-1**	18,71	12,70%
Broa-230-1	20,44	4,60%	**Broa-530-1**	19,27	10,10%
Broa-240-1	20,52	4,26%	**Broa-540-1**	19,16	10,58%
Broa-250-1	20,45	4,59%	**Broa-550-1**	19,34	9,77%
Broa-260-1	20,16	5,94%	**Broa-560-1**	19,31	9,90%
Broa-270-1	20,22	5,63%	**Broa-570-1**	19,43	9,34%
Broa-280-1	20,19	5,79%	**Broa-580-1**	19,48	9,12%
Broa-290-1	20,11	6,16%	**Broa-590-1**	19,23	10,28%
Broa-300-1	19,98	6,75%	**Broa-600-1**	18,94	11,64%

A Figura 52 apresenta, para as cotas 703, 701 e 699 metros do reservatório, a variação do volume calculado com o método IMP para todos os casos de distanciamentos entre as seções. O mesmo é apresentado pela Figura 53 para as cotas 697, 695 e 693

metros. É possível observar a amplitude de variação do volume calculado que as distintas combinações apresentam dentro dos diferentes distanciamentos.

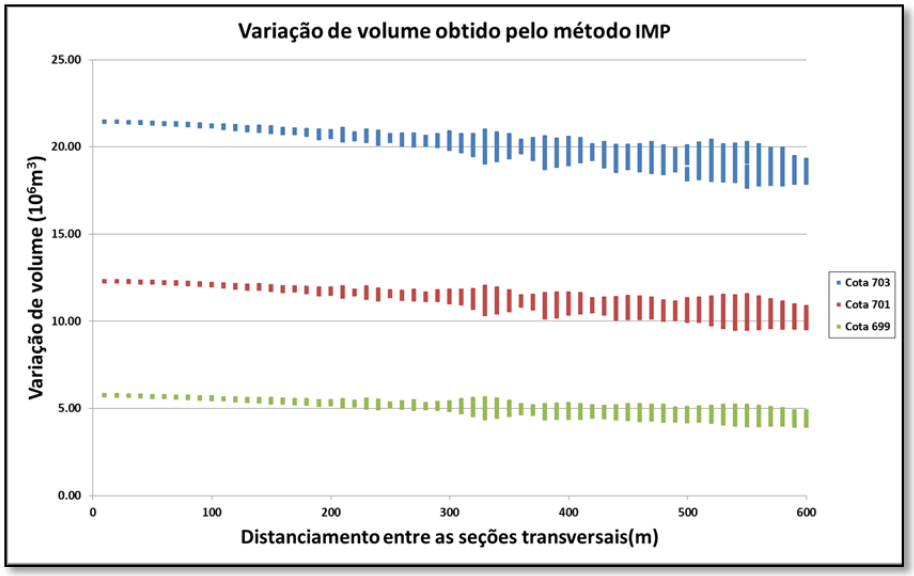

Figura 52 - Variação do volume calculado com o método IMP para os diferentes distanciamentos em relação ao nível do reservatório para as cotas 703, 701 e 699 metros.

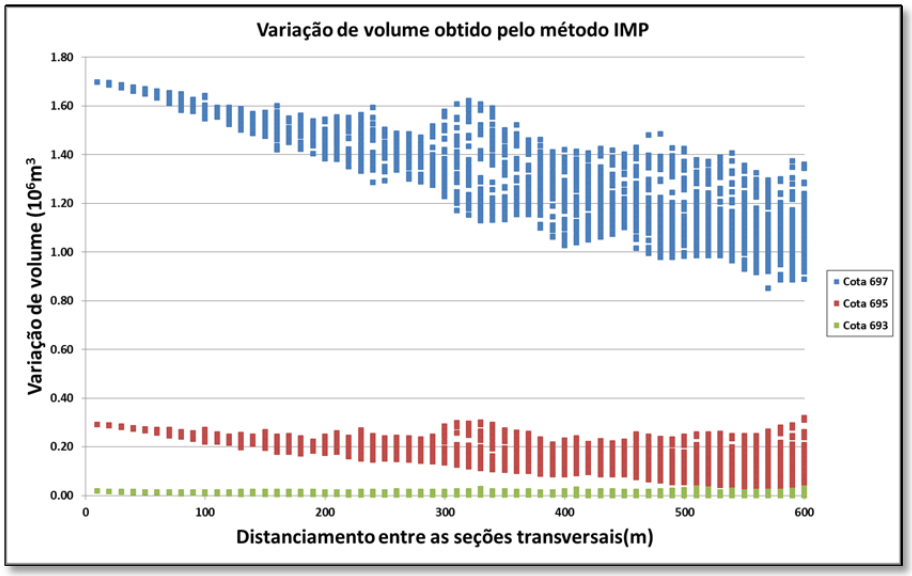

Figura 53 - Variação do volume calculado, com o método IMP, para os diferentes distanciamentos em relação ao nível do reservatório para as cotas 697, 695 e 693 metros.

A variação percentual do volume (Figura 54, Figura 55 e Figura 56) aumentou com a profundidade do reservatório para os casos estudados. A aplicação do método IMP diminuiu

a variação percentual máxima do volume calculado, entretanto, aumentou a amplitude para cada distanciamento, principalmente para as cotas mais baixas. Podem ser observados casos onde não ouve variação em relação à batimetria original, como por exemplo, para a cota 695 m e distanciamento 590 m (Figura 56).

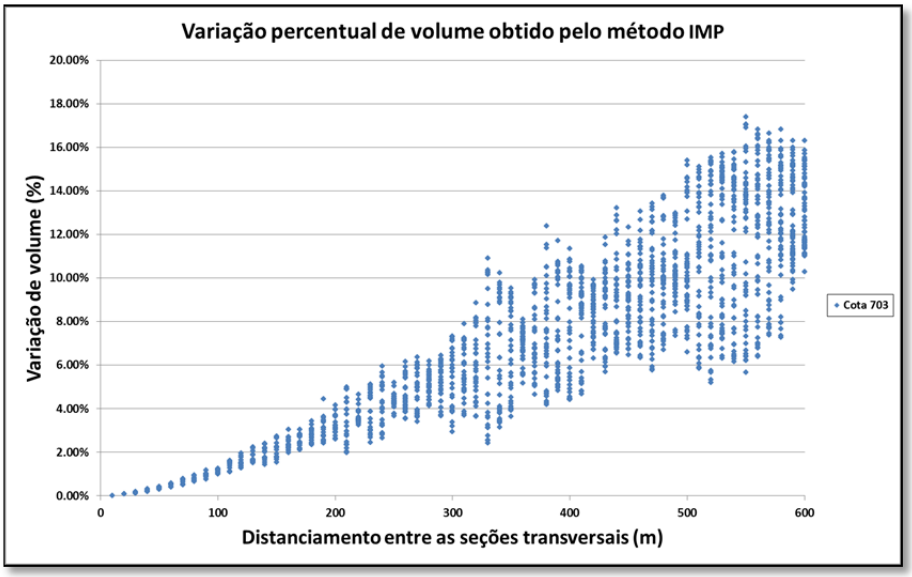

Figura 54 - Variação percentual do volume, para a cota 703 metros, gerado pelo método IMP.

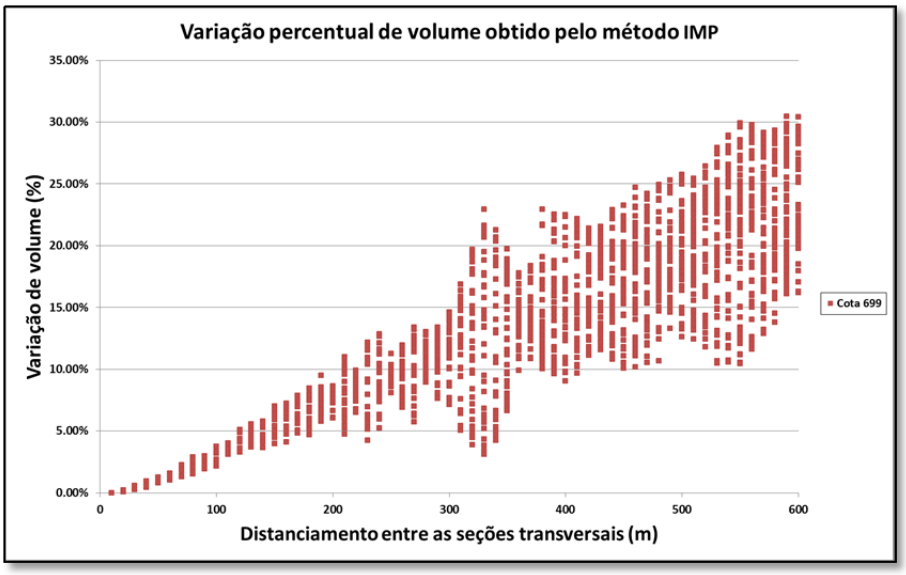

Figura 55 - Variação percentual do volume, para a cota 699 metros, gerado pelo método IMP.

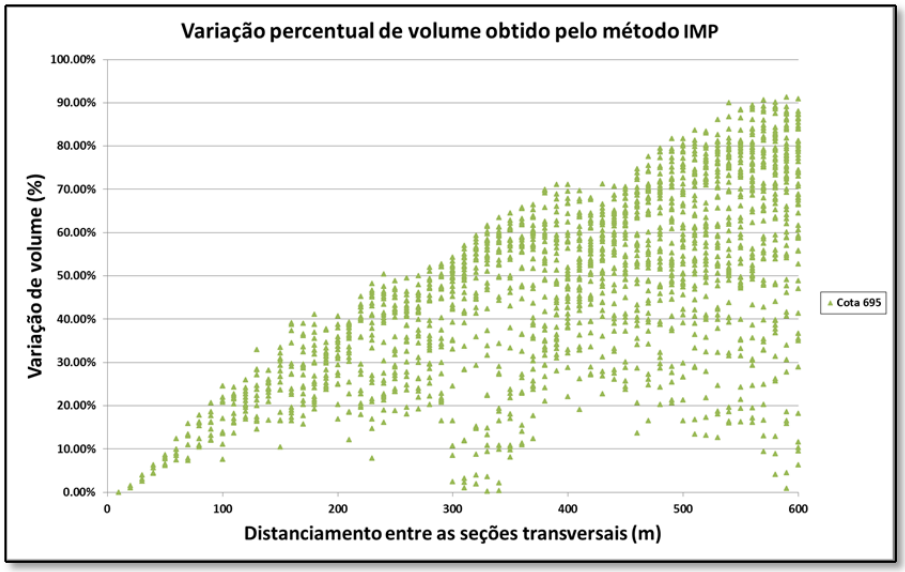

Figura 56 - Variação percentual do volume, para a cota 695 metros, gerado pelo método IMP.

5.3.1. Comparação das modelagens pelo método IMP e pelo método TIN tradicional

A Figura 57 mostra a comparação dos volumes obtidos pelo método IMP e o método TIN tradicional para cotas maiores (703, 701 e 699 metros). Pode-se observar que para distanciamentos menores (até 100 metros), os volumes calculados pelos dois métodos são próximos e para distanciamentos maiores (após 500 metros) o método IMP apresenta um erro menor.

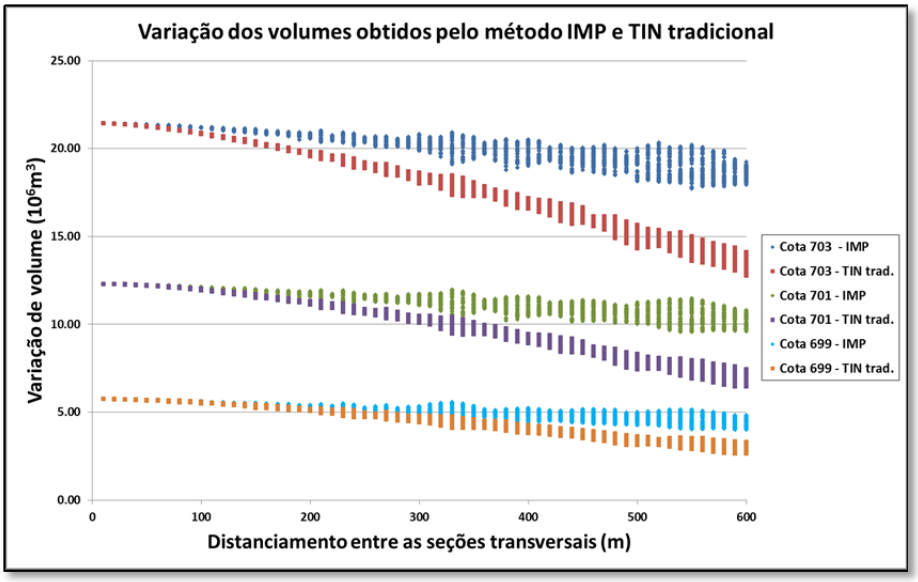

Figura 57 – Comparação da variação dos volumes calculados com o método IMP e TIN tradicional para os diferentes distanciamentos em relação ao nível do reservatório para as cotas 703, 701 e 699 metros.

Considerando a variação do volume para cotas mais baixas (Figura 58 e Figura 59) verifica-se também um melhor desempenho do método IMP no cálculo do volume do reservatório.

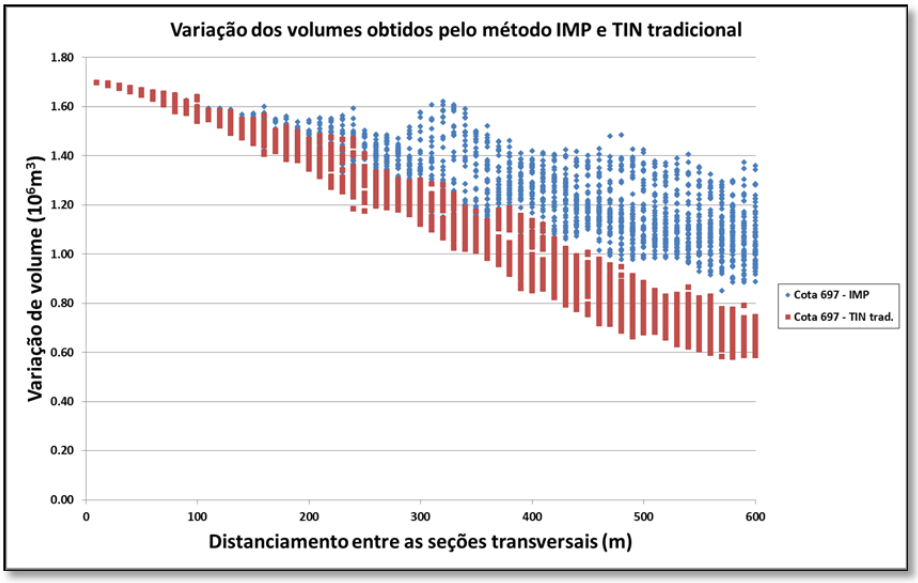

Figura 58 – Comparação da variação dos volumes calculados com o método IMP e TIN tradicional para os diferentes distanciamentos em relação ao nível 697 metros do reservatório.

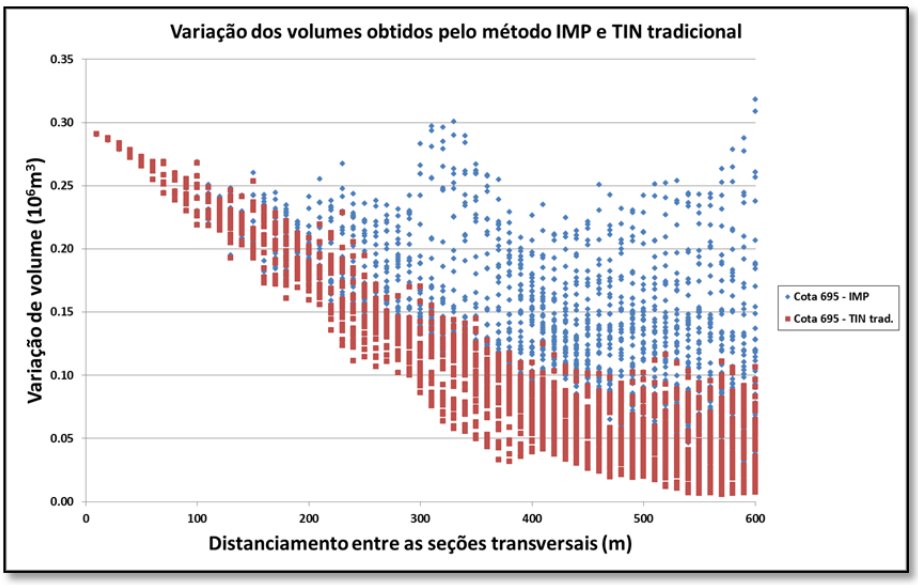

Figura 59 – Comparação da variação dos volumes calculados com o método IMP e TIN tradicional para os diferentes distanciamentos em relação ao nível 695 metros do reservatório.

O método IMP também exibe um erro menor quando se considera a variação percentual de volume, calculados pelos dois métodos em análise (Figura 60, Figura 61 e Figura 62). Entretanto, nota-se que para a cota de 703 metros a diferença nos resultados para os dois métodos é mais discrepante e para a cota 695 metros os resultados são mais próximos. Como exemplo pode-se citar o distanciamento de 100 metros no caso 1, onde a variação do volume para a cota 703 metros, utilizando o método de modelagem TIN tradicional, é de 2,64% e para o método IMP 1,06%, já para a cota 695 metros é de de 7,92% e 7,52%, respectivamente. Esse padrão ocorre pois o método proposto corrige triangulação da batimetria junto a borda do reservatório, tendo maior influência no volume calculado para as cotas mais elevadas e menor influência em cotas mais próximas ao seu leito.

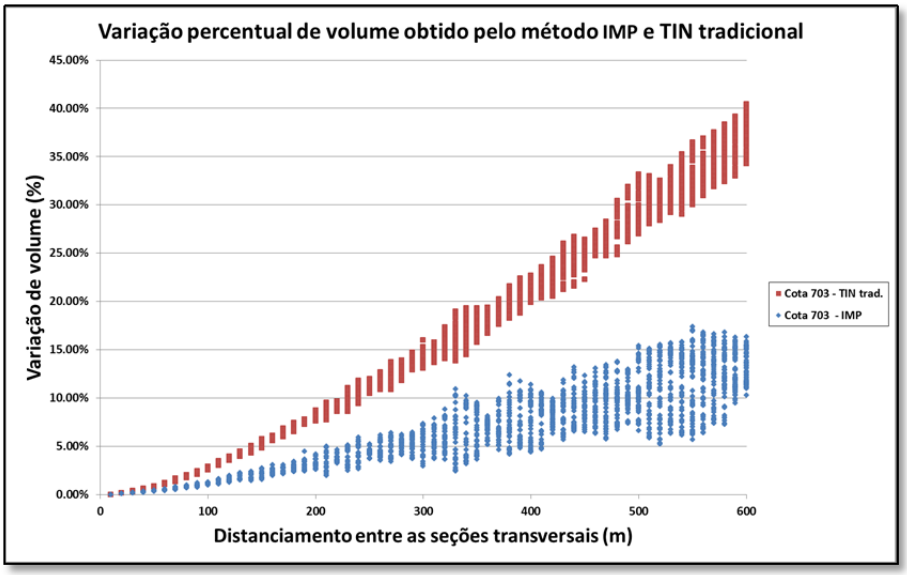

Figura 60 – Comparação da variação percentual do volume, para a cota de 703 metros, calculados pelos métodos IMP e TIN tradicional.

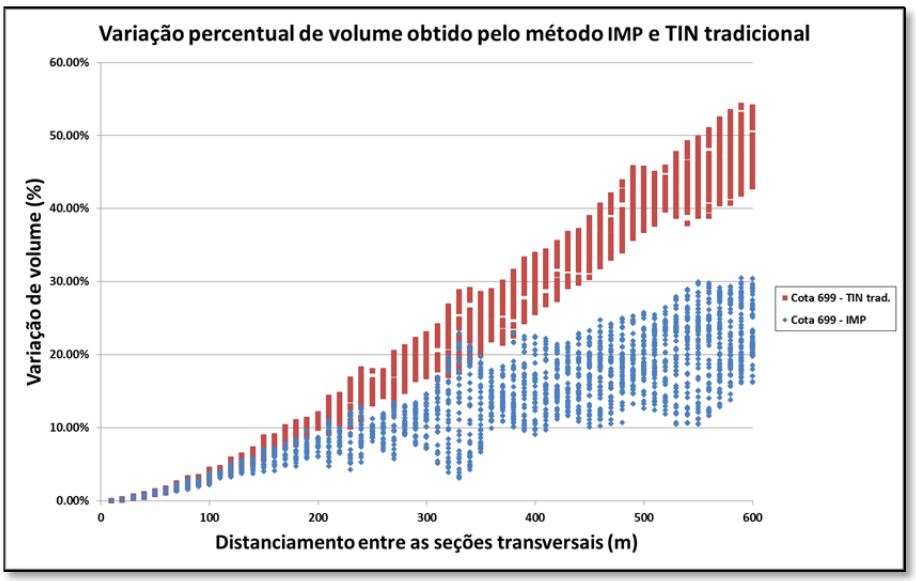

Figura 61 – Comparação da variação percentual do volume, para a cota de 699 metros, calculados pelos métodos IMP e TIN tradicional.

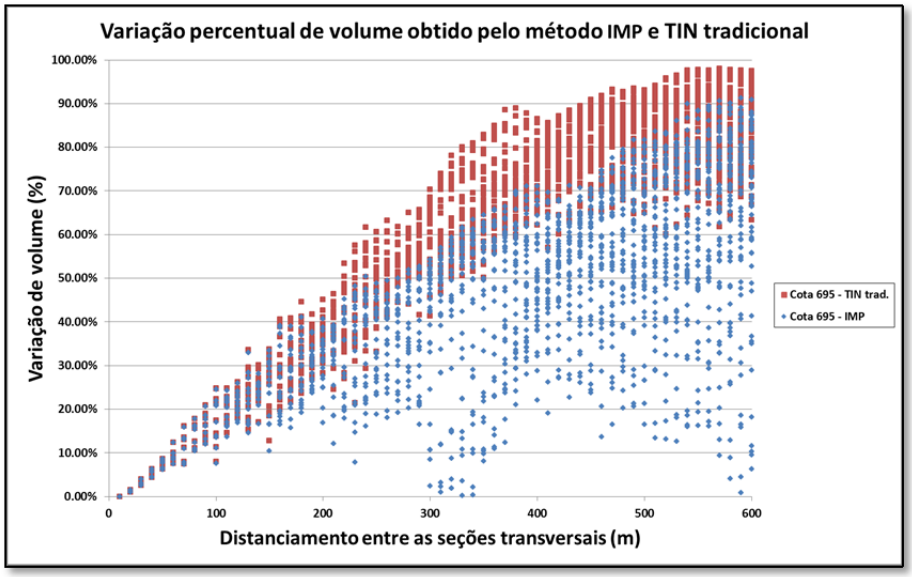

Figura 62 – Comparação da variação percentual do volume, para a cota de 695 metros, calculados pelos métodos IMP e TIN tradicional.

Obtendo-se a relação entre os volumes obtidos pelo método IMP e pelo método TIN tradicional para todas as combinações dos distanciamentos para cota 703 metros, têm-se o gráfico de dispersão (Figura 63). Observa-se que para todos os casos, o resultado obtido pelo método IMP é maior e, portanto, mais próximo do volume obtido para a batimetria original ($21{,}43 \times 10^6\ m^3$).

Realizando-se uma regressão linear dos dados, pode-se observar também que o coeficiente angular de inclinação da reta (α) é igual a 0,3525, ou seja, um ângulo de 19,42 graus. Valores de coeficiente angular igual 1 (um) e de coeficiente de determinação (R^2) também igual a 1 (um) indicam uma reta passando pela origem com um ângulo de 45 graus, com uma perfeita associação entre as variáveis, ou seja, indicaria que o volume calculado com o método IMP e o método TIN tradicional seriam iguais.

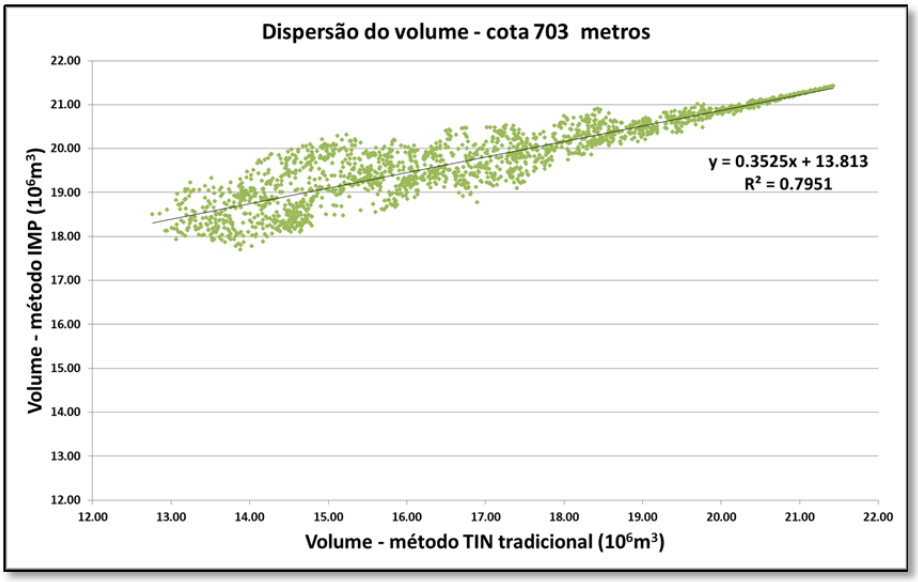

Figura 63 - Correlação entre o método IMP e TIN tradicional para os 1830 diferentes casos para a cota 703 metros.

Para a cota 695 metros, a comparação entre volumes para os dois métodos é apresentada na Figura 64. O valor do R^2, igual a 0,5723, indica que há uma maior dispersão entre os dados, em relação aos resultados obtidos para cota 703 m. Porém, o ângulo de inclinação da reta, de 35,84 graus, indica que na grande maioria dos dados os valores de volumes calculados tendem a ser próximos. Visualmente é possível verificar que para volumes de 0,20 a 0,29 (10^6 m^3), sendo estes calculados para distanciamentos entre as seções transversais de 10 a 180 metros, há uma pequena variação entre os dados. As variações mais pronunciadas começam a surgir para alguns casos de espaçamentos maiores que 300 metros, onde a pouca quantidade e a má distribuição dos transectos não possibilita uma boa caracterização da topografia do reservatório.

Analisando as regressões é possível concluir que o método IMP melhora a qualidade da modelagem principalmente para cotas mais altas, próximas do nível máximo do reservatório, do que para as cotas mais baixas, próximas ao fundo do reservatório. Isso ocorre devido à influência do erro gerado pelas bordas do reservatório na modelagem TIN tradicional, que são corrigidas pelo método IMP.

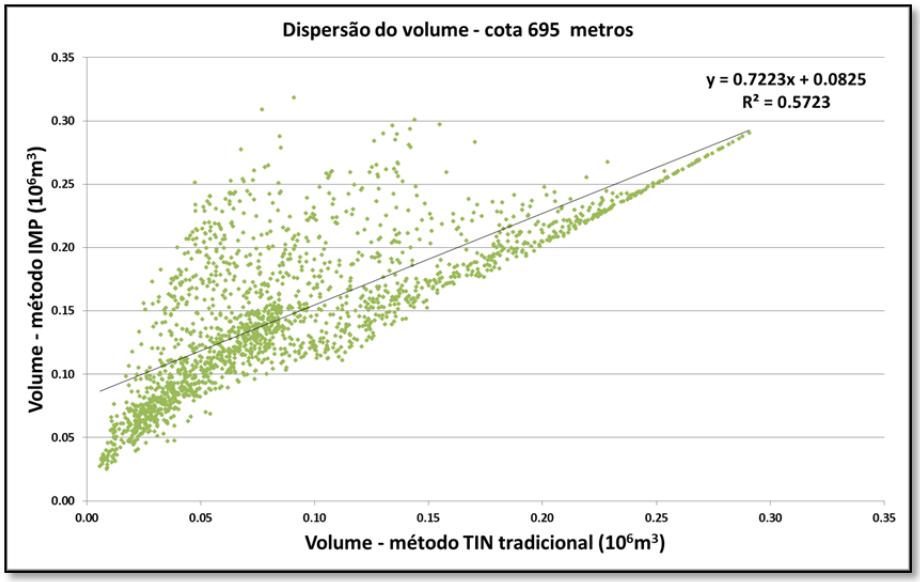

Figura 64 - Correlação entre o método IMP e TIN tradicional para os 1830 diferentes casos para a cota 695 metros.

A Tabela 5 mostra a comparação dos volumes calculados para o primeiro caso de alguns dos distanciamentos analisados, onde há uma redução do erro (variação percentual do volume) de mais de 50% para o distanciamento de 100 metros (caso 1). Para o distanciamento de 600 metros o volume obtido pelo método TIN tradicional é 35,85% menor que o volume de referência, enquanto o método IMP apresenta uma variação de volume de 11,64%, que corresponde a uma redução de 67% no erro.

Tabela 5 - Comparação dos volumes calculados pelos métodos TIN tradicional e IMP

	Método TIN tradicional		**Método IMP**	
Reservatório-Distanciamento-Caso	**Volume (m^3x10^6)**	**Variação Volume (%)**	**Volume (m^3x10^6)**	**Variação Volume (%)**
Broa-10	21,43	-	21,43	-
Broa-100-1	20,86	2,64%	21,20	1,06%
Broa-200-1	19,64	8,35%	20,63	3,72%
Broa-300-1	18,29	14,62%	19,98	6,75%
Broa-400-1	16,83	21,47%	19,78	7,71%
Broa-500-1	14,85	30,72%	19,14	10,68%
Broa-600-1	13,85	35,38%	18,94	11,64%

As comparações apresentadas mostraram que o método IMP apresenta resultados melhores que o método TIN tradicional em todos os casos estudados para o reservatório do Lobo.

5.3.2. Resultado da batimetria do reservatório do Lobo

São apresentados nesta seção os resultados da batimetria do reservatório completo, ou seja, com as áreas que foram suprimidas para que o método proposto fosse corretamente analisado. A relação cota-área-volume é apresentada na Figura 65 e na Tabela 13 é apresentada no Apêndice A. Os resultados foram obtidos aplicando-se o método IMP.

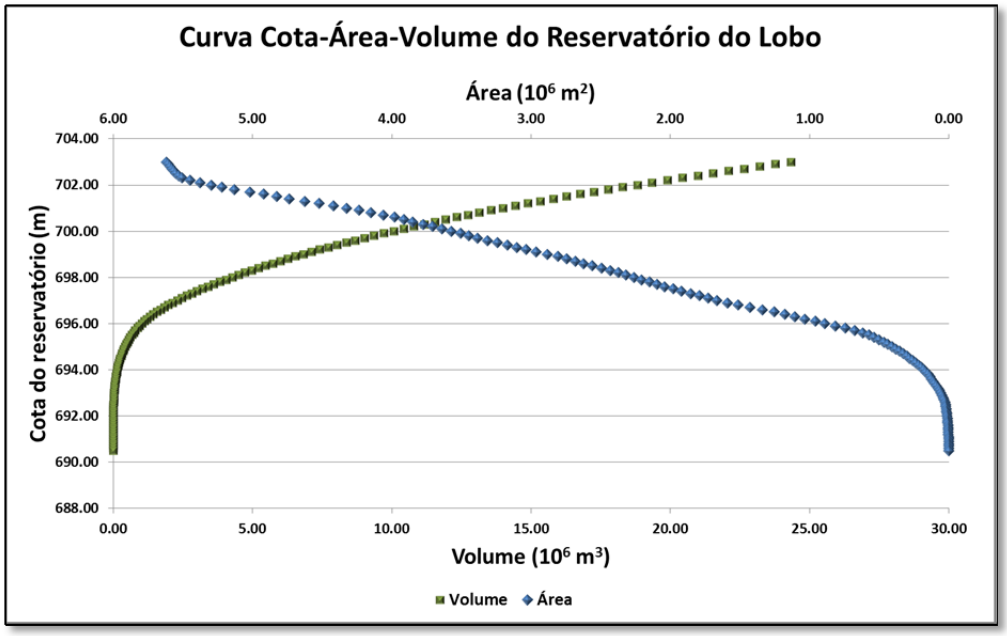

Figura 65 - Curva Cota-Área-Volume do reservatório do Lobo calculado pelo método IMP.

Também foi produzido como resultado a atualização das características morfométricas (Tabela 6) apresentadas por Tundisi et al. (2004). Foi adotado como base o nível do reservatório na cota 703 metros.

Tabela 6 - Características morfométricas do reservatório do Lobo

Característica	Valor
Cota média	698,68 m
Cota mínima	690,52 m
Cota máxima	703,3 m
Cota *Max Maximorum*	704 m
Largura Mínima	408 m
Largura Máxima	1585 m
Comprimento	6,2 km
Perímetro	18,6 km
Área	5,6 x 10^6 m^2
Volume	24,3 x10^6 m^3

Considerando a referência do nível *máximo maximorum* do reservatório (704,5 metros), tem-se a profundidade máxima do reservatório de 14 metros e a profundidade média de 5,80 metros.

5.4. Bariri

Utilizando a ferramenta computacional CAV-NH foram gerados para o reservatório de Bariri diferentes modelos digitais de terreno utilizando como base os levantamentos batimétricos com diferentes espaçamentos: 500m, 1000m e 1500m. Os MDTs foram gerados utilizando a modelagem pelo método TIN tradicional e o pelo método IMP.

A Figura 66 mostra parte do reservatório de Bariri, com o distanciamento das seções de 500m, onde foram gerados os MDTs fazendo o uso do método TIN tradicional (à esquerda) e com inserção da malha de pontos (à direita). Pode-se notar, nesta figura, que ao simplesmente gerar um MDT utilizando o método TIN sem as correções propostas, algumas regiões próximas às margens e entre os transectos apresentam uma região de topografia excessivamente influenciada pela cota da borda do reservatório.

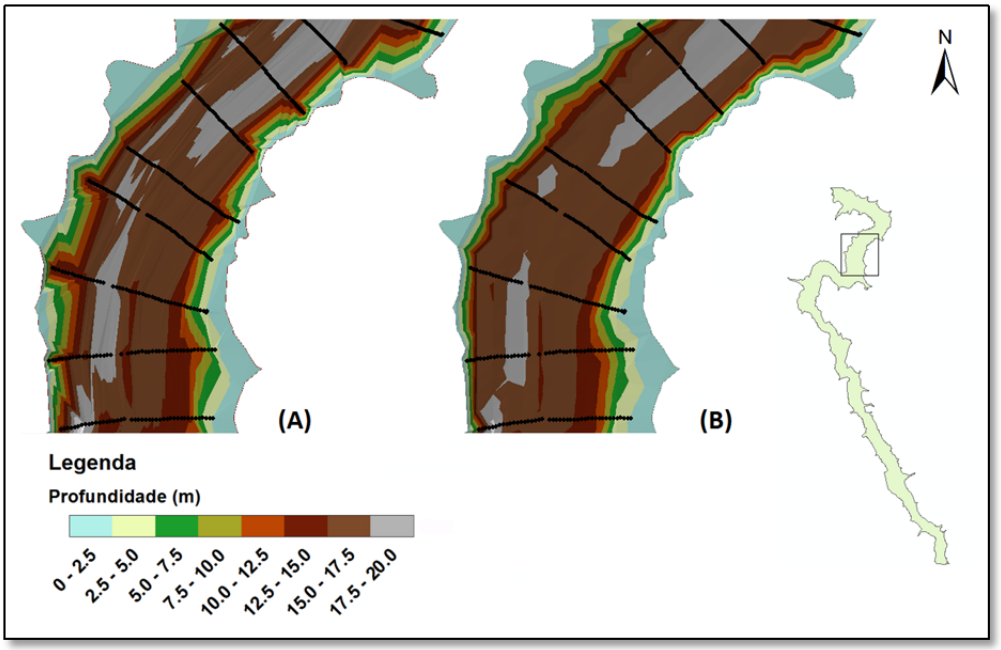

Figura 66 - Detalhes dos MDTs gerados para o reservatório de Bariri com espaçamento entre os transectos de 500m, pelo método TIN tradicional (A) e pelo o método IMP (B).

Na Figura 67 e Figura 68 são mostrados exemplos de distanciamento de 1000 metros e de 1500 metros respectivamente, onde se pode observar que o efeito da borda se agrava à medida que o distanciamento entre as seções transversais aumenta. No primeiro caso (Figura 67 A) o reservatório começa a perder a sua forma. No distanciamento de 1500 metros pode-se ver nitidamente esta questão, onde as bordas se conectam quando o TIN é gerado.

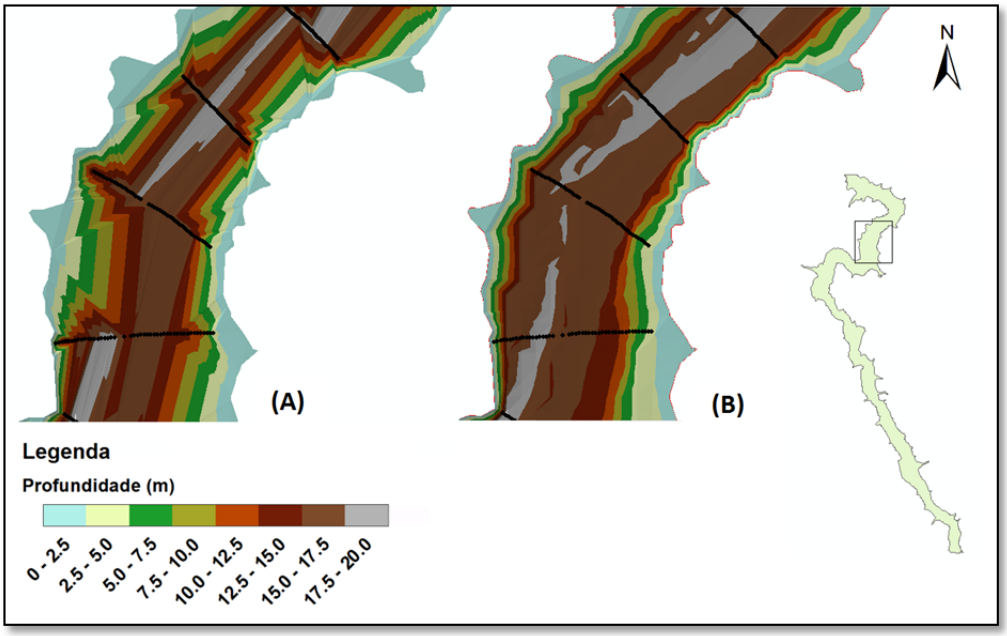

Figura 67 - Detalhes dos MDTs gerados para o reservatório de Bariri com espaçamento entre os transectos de 1000m, pelo método TIN tradicional (A) e pelo o método IMP (B).

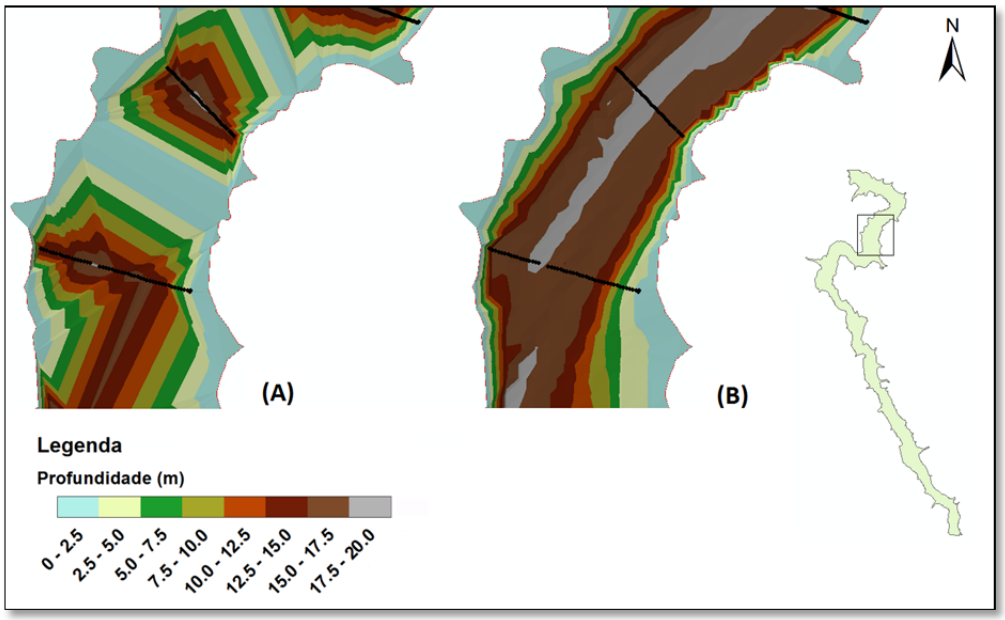

Figura 68 - Detalhes dos MDTs gerados para o reservatório de Bariri com espaçamento entre os transectos de 1500m, pelo método TIN tradicional (A) e pelo o método IMP (B).

Podem-se observar, para cada caso, as diferenças entre os MDTs gerados com a modelagem pelo método TIN tradicional, que apresentaram dados finais de baixa qualidade e consequentemente, perdas de volume.

Comparando-se somente os MDTs gerados pelo método IMP (Figura 66-B, Figura 67-B e Figura 68-B) pode-se observar que mesmo com o aumento do distanciamento entre seções, a topografia do terreno não varia muito, preservando parcialmente suas características originais.

Foram calculadas as diferenças de volumes percentuais para cada caso em relação ao menor distanciamento de transecto (500m). Posteriormente, foram comparados os volumes obtidos pelos métodos TIN tradicional e IMP. Os resultados são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Variação dos volumes obtidos pelo método TIN tradicional (1) e método IMP (2) para os diferentes distanciamentos entre os transectos

Distanciamento entre os transectos (m)	Variação de volume (1)	Variação de volume (2)
500 (original)	-	-
1000 (Caso 1)	23,0%	3,3%
1000 (Caso 2)	27,9%	7,4%
1500 (Caso 1)	47,6%	6,7%
1500 (Caso 2)	51,5%	10,6%
1500 (Caso 3)	55,6%	15,3%

Nota-se que o distanciamento e a disposição dos transectos influenciam no cálculo do volume. Há uma perda considerável que atinge 55,6% do volume para o distanciamento de 1500 metros obtido pelo método TIN tradicional e uma variação que chega a 15,3% quando se aplica o método IMP.

O volume obtido para a batimetria original do reservatório de Bariri utilizando o método TIN tradicional foi de 380,27 x 10^6 m^3 e para o método IMP foi de 398,99 x $10^6 m^3$. Considerando que para todos os casos estudados para reservatório do Lobo, em sua cota máxima, sempre ouve uma redução do volume em relação ao volume de referência, sendo este nunca superestimado, pode-se afirmar que o método IMP melhorou em 4,9% o resultado do volume final para o reservatório de Bariri.

5.5. Ibitinga

Analogamente ao reservatório de Bariri, com objetivo de se avaliar a eficácia do método IMP, este foi aplicado ao corpo principal do reservatório de Ibitinga para diferentes distanciamentos entre as seções.

A Figura 69 ilustra os efeitos da triangulação dos dados do levantamento batimétrico com a borda do reservatório de Ibitinga. Em concordância aos casos do Reservatório do Lobo e de Bariri, a modelagem pelo método TIN tradicional também gerou grandes faces planas e descontinuidades, que não traduzem a topografia do terreno. Este efeito aumenta com o distanciamento entre as seções ocasionando erros no cálculo do volume. Pode-se observar que quanto maior o distanciamento entre as seções, maiores são as faces planas geradas. Na Figura 69-D o TIN foi gerado após a aplicação do método IMP com distanciamento de 500 metros. Serão mostrados nas próximas figuras os MDTs gerados para estes TINs.

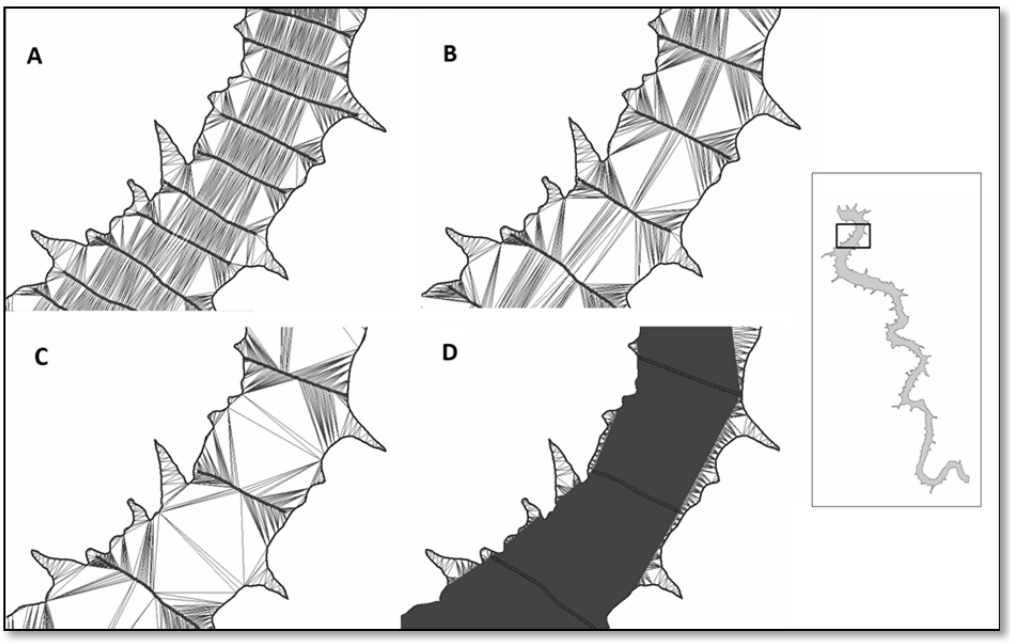

Figura 69 - TIN obtido para diferentes distanciamentos entre os transectos para o reservatório de Ibitinga. A) 500 metros. B) 1000 metros. C) 1500 metros. D) 1500 metros com método IMP.

A Figura 70 mostra parte do reservatório de Ibitinga, com o distanciamento das seções de 500 m, onde foram gerados os MDTs pelo método IMP e pelo método TIN tradicional onde os erros de borda também são visíveis.

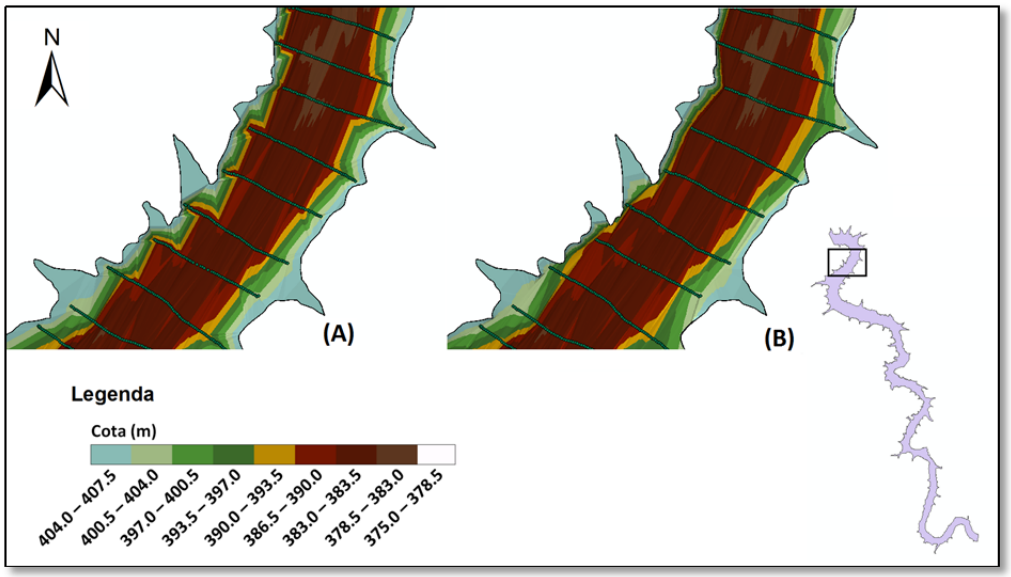

Figura 70 - Detalhes dos MDTs gerados para o reservatório de Ibitinga com espaçamento entre os transectos de 500m, pelo método TIN tradicional (A) e pelo método IMP (B).

Na Figura 71 e Figura 72 são mostrados exemplos de distanciamento de 1000 de 1500 metros respectivamente, onde se observa que o efeito da borda se agrava à medida que o distanciamento entre as seções transversais aumenta. No primeiro caso (Figura 71-A) a influência da borda já se faz considerável. No caso do distanciamento de 1500 metros (Figura 72-A) as bordas se conectam para o método TIN tradicional, entretanto, o mesmo não ocorre para o método IMP.

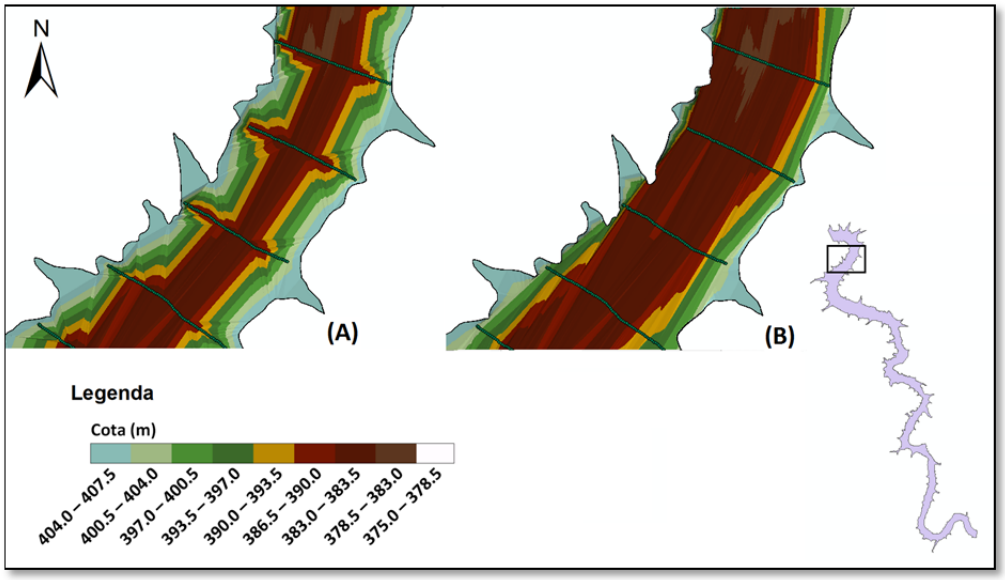

Figura 71 - Detalhes dos MDTs gerados para o reservatório de Ibitinga com espaçamento entre os transectos de 1000m, pelo método TIN tradicional (A) e pelo método IMP (B).

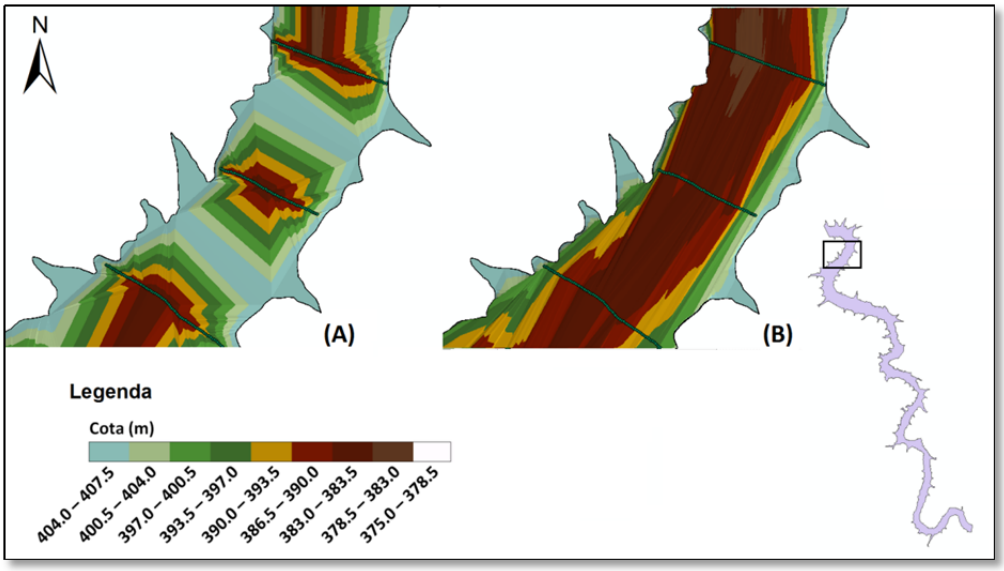

Figura 72 - Detalhes dos MDTs gerados para o reservatório de Ibitinga com espaçamento entre os transectos de 1500m, pelo método TIN tradicional (A) e pelo método IMP (B).

Assim como ocorrido para o reservatório de Bariri, verifica-se a melhoria na qualidade dos MDTs obtidos pelo método IMP (figuras à direita) em relação aos obtidos pelo método TIN tradicional (figuras à esquerda).

Foram calculadas as diferenças de volumes percentuais para cada caso em relação ao menor distanciamento de transecto (500m). Posteriormente foram comparados os volumes calculados a partir do cálculo do TIN sem a malha de pontos e do TIN com a malha de pontos. Os resultados são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Variação de volume sem a inserção da malha de pontos (1) e com a inserção da malha de pontos (2) para os diferentes distanciamentos entre os transectos.

Distanciamento entre os transectos (m)	Variação de volume (1)	Variação de volume (2)
500 (original)	-	-
1000 (Caso 1)	20,40%	3,48%
1000 (Caso 2)	20,86%	1,66%
1500 (Caso 1)	41,79%	6,14%
1500 (Caso 2)	41,86%	3,05%
1500 (Caso 3)	45,55%	6,60%

A variação chegou a 45,55% com o distanciamento de 1500 metros em relação ao cálculo do volume sem a inserção da malha pontos e a 6,60% quando aplicado o método proposto, obtendo uma melhora considerável no erro, com uma diferença de quase um quarto do volume calculado para a batimetria de original.

O volume obtido para a batimetria original do reservatório de Bariri utilizando o método TIN tradicional foi de 1000,87 x 10^6 m^3 e para o método IMP foi de 1078,25 x 10^6 m^3. Pode-se afirmar, considerando que o método IMP não superestima o volume calculado para a cota máxima do reservatório, que este melhorou a qualidade do resultado final em 7,73%.

5.6. Análise da Orientação da ANA

Esta análise baseia-se no documento “Orientações para Atualização das Curvas Cota x Área x Volume” publicado pela Agência Nacional de Águas (ANA) em outubro de 2011 (ANA, 2011), onde é proposto que as seções batimétricas, no levantamento da área molhada de reservatórios, sejam equidistantes e que o espaçamento obedeça a Equação (3) pra PCHs e a Equação (4) para UHEs, que foram apresentadas anteriormente na seção 3.2.4.

O interesse desta seção é avaliar o erro percentual do volume calculado que estas equações carregam intrinsicamente, quando propõem o espaçamento entre as seções transversais. Também foi analisada qual a melhoria dos resultados gerados pelo método IMP. Com este propósito, a ferramenta CAV-NH foi utilizada para a modelagem por meio do método TIN tradiconal e método IMP aplicados ao corpo principal dos reservatórios do Lobo, Bariri e Ibitinga.

As duas equações, tanto para PCHs quanto pra UHEs, tiram proveito de duas variáveis, a área do reservatório (A), em seu nível *máximo maximorum* dada em hectares, e a extensão do corpo principal do reservatório (D), dada em quilômetros. Para os reservatórios em questão, estas variáveis são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Área e extensão dos reservatórios.

Reservatório	Área analisada (ha)	Extensão (km)
PCH Lobo	499,07	5,90
UHE Bariri	4773,46	41,70
UHE Ibitinga	8759,18	67,30

Aplicando-se a equação (3) para a PCH do Lobo e a equação (4) para as UHEs de Bariri e Ibitinga obtêm-se os distanciamentos apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Distanciamento entre as seções batimétricas.

Reservatório	Distanciamento entre as seções (m)
PCH Lobo	200,28
UHE Bariri	325,50
UHE Ibitinga	249,43

Os levantamentos batimétricos dos reservatórios de Bariri e Ibitinga foram realizados com espaçamento de 500 metros, inviabilizando a análise proposta.

Admitindo o distanciamento de 200 metros proposto pela orientação da ANA para o reservatório do Lobo, são apresentados na Tabela 11 os resultados, calculados pelo método TIN tradicional e IMP, da batimetria original com espaçamento de 10 metros, utilizada como referência, e os vinte diferentes arranjos gerados para o espaçamento de 200 metros.

Tabela 11 – Volume calculado com espaçamento de 200 metros para o reservatório do Lobo.

	Volume (10^6 m^3) Método TIN tradicional			**Volume (10^6 m^3) Método IMP**		
Reservatório-distanciamento-caso	**Cota (m)**					
	Cota 703	**Cota 699**	**Cota 697**	**Cota 703**	**Cota 699**	**Cota 697**
Broa-10-1	21,43	5,73	1,70	21,43	5,73	1,70
Broa-200-1	19,64	5,13	1,46	20,63	5,31	1,53
Broa-200-2	19,56	5,05	1,41	20,58	5,25	1,49
Broa-200-3	19,57	5,06	1,40	20,58	5,24	1,47
Broa-200-4	19,67	5,10	1,42	20,65	5,27	1,47
Broa-200-5	19,67	5,09	1,41	20,73	5,27	1,46
Broa-200-6	19,64	5,06	1,37	20,76	5,27	1,43
Broa-200-7	19,66	5,08	1,40	20,80	5,29	1,46
Broa-200-8	19,74	5,13	1,42	20,87	5,35	1,49
Broa-200-9	19,77	5,16	1,44	20,87	5,39	1,50
Broa-200-10	19,77	5,16	1,43	20,84	5,38	1,50
Broa-200-11	19,80	5,16	1,43	20,87	5,38	1,49
Broa-200-12	19,77	5,11	1,37	20,80	5,31	1,42
Broa-200-13	19,78	5,14	1,37	20,78	5,31	1,41
Broa-200-14	19,72	5,07	1,34	20,75	5,25	1,38
Broa-200-15	19,72	5,08	1,36	20,80	5,30	1,42
Broa-200-16	19,72	5,10	1,37	20,65	5,24	1,40
Broa-200-17	19,71	5,11	1,39	20,74	5,30	1,45
Broa-200-18	19,72	5,13	1,42	20,71	5,29	1,47
Broa-200-19	19,68	5,14	1,46	20,54	5,25	1,49
Broa-200-20	19,67	5,13	1,46	20,64	5,31	1,54
Maior	19,80	5,16	1,46	20,87	5,39	1,54
Menor	19,56	5,05	1,34	20,54	5,24	1,38
Média	19,70	5,11	1,41	20,73	5,30	1,46

A variação percentual em relação à batimetria original é apresentada na Tabela 12, onde pode ser verificado que para a cota 703 metros, para o método TIN tradicional, a maior

variação ou maior erro, foi de 8,74%, enquanto para o método IMP foi de 4,15%. Para a cota de referência do volume morto, de 699 metros, os maiores erros foram de 11,87% e 8,64% para o método TIN tradicional e IMP respectivamente.

Tabela 12 – Variação percentual do volume calculado com espaçamento de 200 metros para o reservatório do Lobo.

	Variação do volume (%) Método TIN tradicional			**Variação do volume (%) Método IMP**		
Reservatório-distanciamento-caso	**Cota (m)**					
	Cota 703	**Cota 699**	**Cota 697**	**Cota 703**	**Cota 699**	**Cota 697**
Broa-10-1	-	-	-	-	-	-
Broa-200-1	8,35	10,56	13,71	3,72	7,43	9,54
Broa-200-2	8,74	11,87	16,76	3,98	8,42	12,13
Broa-200-3	8,68	11,80	17,47	3,97	8,58	13,38
Broa-200-4	8,22	10,98	16,32	3,63	8,02	13,06
Broa-200-5	8,22	11,22	17,09	3,27	8,06	14,09
Broa-200-6	8,37	11,70	19,08	3,11	8,01	15,49
Broa-200-7	8,25	11,38	17,50	2,95	7,64	14,02
Broa-200-8	7,87	10,57	16,12	2,62	6,63	12,43
Broa-200-9	7,75	9,93	14,90	2,63	6,04	11,33
Broa-200-10	7,72	10,05	15,47	2,75	6,08	11,70
Broa-200-11	7,62	9,91	15,60	2,61	6,06	12,17
Broa-200-12	7,75	10,83	19,05	2,93	7,28	16,01
Broa-200-13	7,67	10,29	18,96	3,04	7,29	16,91
Broa-200-14	7,98	11,54	20,74	3,16	8,33	18,54
Broa-200-15	7,99	11,33	19,74	2,92	7,56	16,38
Broa-200-16	7,99	11,09	19,13	3,66	8,64	17,55
Broa-200-17	8,03	10,85	17,93	3,24	7,53	14,42
Broa-200-18	7,96	10,56	16,56	3,37	7,65	13,21
Broa-200-19	8,16	10,24	13,98	4,15	8,40	12,09
Broa-200-20	8,19	10,50	13,65	3,70	7,43	8,91
Maior	8,74	11,87	20,74	4,15	8,64	18,54
Menor	7,62	9,91	13,65	2,61	6,04	8,91
Média	8,07	10,86	16,99	3,27	7,55	13,67

O erro médio do volume calculado para o método TIN tradicional foi de 8,07% e para o método IMP de 3,27%, resultando em uma redução no erro de 40% em média.

Para análise mais acurada será transcrito o texto da orientação da ANA que trata da modelagem dos dados coletados na batimetria (ANA, 2011):

> *"O Modelo Digital do reservatório, em formato TIN – Triangular Irregular Network, deverá ser gerado a partir de todos os pontos mensurados durante o levantamento das partes seca e molhada daquele. Para adensar e qualificar o referido modelo deve-se usar a linha do contorno do reservatório como breakline."*

A modelagem proposta pela agência se encaixa no método TIN tradicional utilizado, visto que o contorno do reservatório também foi empregado como *breakline.* Uma *breakline* define e controla o comportamento da superfície do terreno e também delimita a área da na triangulação.

Como evidenciado, a modelagem pelo método IMP apresenta melhores resultados que o método TIN tradicional, uma vez que minimiza os erros provenientes da triangulação com a borda do reservatório.

6. Conclusões

Neste trabalho foi exposto um novo método para a modelagem do levantamento batimétrico em reservatórios e apresentada uma nova ferramenta computacional que auxilia a obtenção da curva Cota-Área-Volume, fazendo uso do método proposto.

Este método, denominado Inserção de Malha de Pontos (IMP) foi avaliado em relação ao método de modelagem de terrenos TIN, que é uma técnica tradicionalmente citada e utilizada por vários autores (USACE, 2002; FERRARI, 2006; FERRARI; COLLINS, 2006; WILSON; RICHARDS, 2006; FURNANS; AUSTIN, 2008a) na obtenção dos MDTs de reservatórios. Nesta análise, comparou-se o efeito que o espaçamento entre as seções do levantamento batimétrico produz no cálculo do volume para os reservatórios do Lobo-SP, de Bariri-SP e de Ibitinga-SP.

Um levantamento batimétrico com alto grau de detalhamento, com 10 metros de espaçamento entre as seções transversais, foi realizado no reservatório da PCH do Lobo, sendo adotados como referência o MDT e o volume obtido para este levantamento. Omitindo-se seções da batimetria original foram produzidos levantamentos com espaçamentos variando de 20 até 600 metros, sendo realizadas para cada espaçamento todas as combinações possíveis, ou seja, para 20 metros de espaçamento foram produzidas 2 batimetrias distintas, para 600m de espaçamento foram produzidas 60 batimetrias distintas, totalizando 1830 batimetrias.

A comparação destes levantamentos, utilizando o método TIN tradicional, suportou a hipótese de que quanto maior a distância entre seções menor é o volume calculado em relação ao volume real do reservatório. Foi possível observar, com o aumento do espaçamento entre as seções, o surgimento de singularidades e de regiões planas próximas as bordas do reservatório, em concordância com Furnans e Austin (2008b) e Estigoni et al. (2010). Os efeitos de borda aumentam com o maior espaçamento entre as seções e em regiões onde este distanciamento é próximo da largura do reservatório, há uma interpolação entre as bordas gerando planos de mesma cota.

Por meio da análise da variação dos resultados para os diferentes espaçamentos a diferentes cotas, pode-se afirmar que as regiões mais profundas são mais afetadas pelo aumento da distância, em relação a sua variação percentual do volume. Este fato se deve a alta relação que a área molhada tem com o volume calculado para cotas próximas ao fundo do reservatório, sendo que esta relação diminui para as cotas mais altas. Porém, é para as cotas superiores que são apresentados os maiores valores absolutos na variação do volume, devido ao efeito que a borda produz na modelagem do terreno.

O método IMP apresentou erros menores que o método TIN tradicional, considerando as 1830 combinações de espaçamento analisadas para o reservatório do Lobo. O mesmo ocorreu para os reservatórios de Bariri e Ibitinga. Este método reduz significamente a extensão da influência da borda na modelagem, reduzindo as grandes áreas planas e não permitindo que as bordas sejam interpoladas entre si. Para cotas mais altas, onde os efeitos das bordas são mais pronunciados, o método obtém melhores resultados, já para cotas mais baixas, próximas ao leito do reservatório, não há grandes variações no volume calculado por ambos os métodos na maioria dos casos.

Outra característica do método IMP é se adaptar melhor que o método TIN tradicional quando há um maior espaçamento entre as seções transversais, conduzindo a um erro menor na estimativa do volume final. As análises indicam que o procedimento adotado provê uma modelagem mais condizente com o relevo do terreno de fundo, obtendo-se uma maior acurácia, possibilitando a diminuição do trabalho de coleta de dados em campo sem prejudicar o cálculo do volume do reservatório.

É importante ressaltar que nenhum método promove uma boa modelagem do reservatório se as seções transversais não estiverem devidamente adensadas e alocadas.

A ferramenta computacional apresentada, denominada CAV-NH, se apresenta como uma ferramenta flexível, por possuir quatro módulos, possibilitando diferentes dados de entrada, e assim, proporcionando ao usuário escolher a melhor maneira de modelar o levantamento batimétrico. A ferramenta CAV-NH foi exaustivamente utilizada neste trabalho para obtenção dos resultados e mostrou-se uma ferramenta eficiente e ágil no processo de geração da curva Cota-Área-Volume, tanto na utilização do método IMP quanto para o método TIN tradicional.

Com o auxílio do módulo 4 da ferramenta CAV-NH, que faz uso do método IMP, obteve-se a relação CAV atual (Apêndice A) para o reservatório do Lobo com o distanciamento entre as seções transversais de 10 metros. Também foi produzido como resultado a atualização das características morfométricas apresentadas por Tundisi et al. (2004). Este foi o levantamento batimétrico mais detalhado já realizado neste reservatório após a PCH ter entrado em operação.

Este levantamento batimétrico foi utilizado como base para a análise da orientação da ANA sobre atualizações das curvas Cota-Área-Volume (ANA, 2011), onde o método IMP teve uma redução no erro do cálculo do volume de 40% em média para a cota 703 m do reservatório do Lobo. Verificou-se também, que este documento apresenta uma lacuna no tópico sobre a modelagem dos dados batimétricos, demonstrando que podem ser obtidos valores de volumes com erros significativos dependendo do método de modelagem empregado.

Uma curva CAV bem definida e com uma precisão adequada é uma importante ferramenta para o Operador Nacional do Sistema (ONS), que pode administrar melhor a rede de aproveitamentos hidroelétricos. As concessionárias também se beneficiam podendo atualizar seu sistema de suporte a decisão (SSD) e gerenciar melhor seus reservatórios em seus usos múltiplos, otimizando a geração de energia sem o detrimento dos serviços de abastecimento de água, recreação e sistemas de amortecimento de cheias.

O conhecimento de dados básicos, sendo estes bem coletados e bem tratados, é essencial para um bom gerenciamento de recursos hídricos, para o avanço da ciência e para o desenvolvimento sustentável.

7. Recomendações

Recomenda-se que o método IMP seja adotado pela Agência Nacional de Águas como método de modelagem para estudos de levantamentos batimétricos em reservatórios.

Deve-se avaliar qual a precisão desejada para os levantamentos batimétricos em reservatórios de aproveitamentos hidroelétricos de usos múltiplos, pois pequenas variações na relação Cota-Área-Volume podem definir parâmetros imprecisos, como: volume útil, volume morto, volume de espera, energia firme, taxa de assoreamento, etc. e também acarretar tomadas de decisões equivocadas no gerenciamento de recursos hídricos e em sistemas de suporte a decisão (SSD).

Sugere-se que para a atualização da curva CAV, cada reservatório possua um estudo anterior avaliando a melhor disposição e número de seções a serem levantadas, tendo em vista suas especificidades e o nível de precisão desejado. Para tal, deve-se tomar como base o levantamento planialtimétrico do terreno antes do enchimento do reservatório e/ou um levantamento batimétrico detalhado.

8. Referências

AES BRASIL. Histórico no Brasil. Disponível em: <http://www.aesbrasil.com.br/ogrupo/Paginas/historiconobrasil.aspx>. Acesso em: 14 mar. 2012.

AES TIETÊ. Bariri. Disponível em: <http://www.aestiete.com.br/usinas/Paginas/Bariri.aspx>. Acesso em: 14 mar. 2012.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual de Estudos de Disponibilidade Hídrica para Aproveitamentos Hidrelétricos**. Manual do Usuário. Jul. 2009. 43 p. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2009/ManualdeEstudosdeDisponibilidadeHidrica.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2012.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume**. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. Brasília: ANA, SGH, 2011.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **BIG - Banco de Informações de Geração. Usinas e Centrais Geradoras**. 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/UsinaListaSelecao.asp>. Acesso em: 11 mar. 2012.

ANEEL. Resolução Nº 396, de 04 de Dezembro de 1998. Estabelece as condições para implantação, manutenção e operação de estações fluviométricas e pluviométricas associadas a empreendimentos hidrelétricos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, seção 1, v. 136, n. 234-E, p. 47, 07 Dez. 1998.

ANEEL/ANA. Resolução Conjunta Nº 03, de 10 de Agosto de 2010. Estabelecer as condições e os procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos, e dar outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, seção 1, v. 147, n. 201, p. 124, 20 Out. 2010.

ASCHER, D.; LUTZ, M. **Aprendendo Python**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.

BLANTON, J. O. **Procedures for Monitoring Reservoir Sedimentation**: Technical Guideline for Bureau of Reclamation. Denver, Colorado, USA: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Oct. 1982.

BRANCO, S. M.; ROCHA, A. A. **Poluição, Proteção e Usos Múltiplos de Represas**. São Paulo: Edgard Blucher, CETESB, 1977.

BRASIL. Decreto Nº 24.643, de 10 de Julho de 1934. Decreta o Código de Águas. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 27 Jul. 1934. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d24643.htm>. Acesso em: 14 abr. 2012.

BRASIL. Lei Nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 9 Jan. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/l9433.htm>. Acesso em: 14 abr. 2012.

BRUK, S. (Org.) **Methods of Computing Sedimentation in Lakes and Reservoirs**. Unesco, Paris, 1985. p. 45-47.

CARVALHO, N. O. et al. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatório**. Brasília, DF: ANEEL, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000.

CARVALHO, N. O. **Hidrosedimentologia Prática**. 2. ed., rev., atual., e ampliada. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2008.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro: CPRM/Eletrobrás, 1994.

CESP – Companhia Energética de São Paulo. Disponível em: <http://www.cesp.com.br/portalCesp/portal.nsf/V03.02/Empresa-Historia?OpenDocument>. Acesso em: 14 mar. 2012.

COIADO, E. M. Assoreamento de reservatórios. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (Orgs.). **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 395-426.

COLE, J. J. et al. Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget. **Ecosystems**, v. 10, n. 1, p. 172-185, 2007.

CORRÊA FILHO, C. R. R.; MAUAD, F. F.; ALBERTIN, L. L. Levantamento Batimétrico de um Grande Reservatório Formado por Barragem Utilizando a Sonda Acustic Doppler Profiler - ADP. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2005, João Pessoa, PB. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, João Pessoa - PB, ABRH, 2005.

DEAN, W. E.; GORHAN, E. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs and peatlands. **Geology**, v. 26, n. 6, p. 535-538, 1998.

DELELLO, D. **Composição e distribuição (espacial e temporal) de macrófitas aquáticas no reservatório do Lobo (Broa), Itirapina, SP**. 2008. 156 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2008.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Relatório Zero - Diagnóstico da situação atual dos Recursos Hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia hidrográfica do Tietê- Jacaré**. Relatório Final Nº 40.674. 2000.

EAKIN, H. M. **Silting of Reservoirs**. Technical Bulletin No 524. United States Department of Agriculture. Revised by Brown, C. B. Washington, D.C. U. S. Government Printing Office, 1939.

ESRI. 2012. Disponível em: <http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//002z00000001000000>. Acesso em: 27 mar. 2012.

ESTIGONI, M. V.; MATOS, A. J. S.; MAUAD, F. F. comparison between two bathymetric survey methods to estimate sediment acumulation in the Lobo shp reservoir. In: Australia's National Water Conference and Exhibition - Ozwater'10, 2010, Brisbane, Australia. Australia's National Water Conference and Exhibition - Ozwater'10, 2010.

FELGUEIRAS, C. A.; GOODCHILD, M. F. An Incremental Constrained Delaunay Triangulation. In: FELGUEIRAS, C. A.; GOODCHILD, M. F. **Two papers on Triangulated Surface Modeling** - Technical Report 95-2. California, EUA: National Center for Geographic Information and Analysis, Jan. 1995. p. 31-46.

FERRARI, R. L. **Reconnaissance Techniques for Reservoir Surveys**. Denver, Colorado, USA: U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Apr. 2006.

FERRARI, R.; COLLINS, K. Reservoir Survey and Data Analysis. In**:** YANG, C. T. (Org.) **Erosion and Sedimentation Manual.** Denver, Colorado, USA: U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Nov. 2006. Chapter 9.

FURNANS, J.; AUSTIN, B. Hydrographic survey methods for determining reservoir volume. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, p. 139-146, 2008a.

FURNANS, J.; AUSTIN, B. Volume and Sediment Surveying Techniques for Texas reservoirs. [S.l.:s.n.], 2008b.

GLYMPH, L. M. Sedimentation of Reservoirs. In: ACKERMANN, W. C. et al. (Ed.) **Man-made lakes**: their problems and environmental. Washington DC: American Geophysical Union, 1973. p. 342-346.

GOOGLE EARTH. 2012. Disponível em: <http://maps.google.com.br>. Acesso em: 17 maio 2012.

HEINEMANN, H. G.; DVORAK, V. I. Improved Volumetric Survey and Computation Procedures for Small Reservoirs. In: **Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference 1963**. Miscellaneous Publication N^{o} 970. U. S. Department of Agriculture. Washington, D.C.: U. S. Government Printing Office, 1963. p. 845-856.

HETLAND, M. L. **Beginning Python from Novice to Professional**. 2. Ed. United States of America: Apress, 2008.

ICOLD - International Commission on Large Dams. **Sedimentation control of reservoirs / Maîtrise de l'alluvionnement des retenues**. Paris, Committee on Sedimentation of Reservoirs, 1989.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <http://www.cbers.inpe.br/sobre_satelite/cameras_imageadoras_cbers1e2e2b.php>. Acesso em: 15 maio 2012.

KIDNER, D. B. et al, Multiscale Terrain and Topographic Modeling with the Implicit TIN. **Transactions in GIS**, v. 4, n. 4, p. 379-408, 2000.

LEICA GEOSYSTEMS INC., Torrance, CA, USA. Disponível em: <http://www.leica-geosystems.com/>. Acesso em: 12 maio 2012.

MAIA, A. G.; VILLELA, S. C. Análise do assoreamento do reservatório de Promissão através do modelo RESSASS. **Ambiência** - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais, Guarapuava, PR , v. 5, n. 2, p. 247-262, maio/ago. 2009.

MATOS, A. J. S.; ESTIGONI, M. V.; MAUAD, F. F. Variação de volume calculado em grandes reservatórios utilizando diferentes metodologias de levantamentos batimétricos. In: XIV WORLD WATER CONGRESS, 2011, Porto de Galinhas, PE. **Anais...** 1 CD-ROM.

MAUAD, F. F **Previsão do assoreamento de reservatórios formados por barragens**. Relatório Técnico. Convênio Universidade de São Paulo - AES Tietê, São Carlos, 2005.

MORRIS, G. L.; FAN, J. **Reservoir Sedimentation Handbook**: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use. New York: McGraw-Hill, 1997.

MOTHEO, D. F. **Estudo limnológico na represa Carlos Botelho (Itirapina / Brotas - SP)**: Uma reavaliação comparativa do sistema Lobo-Broa. 2005. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.

OMNISTAR, 2012. Disponível em: <http://www.omnistar.com/SubscriptionServices/OmniSTARVBS.aspx>. Acesso em: 13 jul. 2012.

PAIVA, E. M. C. D; PAIVA, J. B. D.; REINERT, D. J. Estimativa do assoreamento do reservatório de DNOS, em Santa Maria, RS. In: XVII CONGRESSO NACIONAL DEL ÁGUA, II SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DEL CONOSUR, 1998, Santa Fé, Argentina. **Anais...** ABRH Digital, 1998. v. 3, p. 452-461.

Palma, E. **A precisão possível com GPS L1/CA em georreferenciamento**: o desafio do multicaminho. 2005. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2005.

PYTHON Programming Language - Oficial Website. Disponível em: <http://www.python.org/>. Acesso em: 27 mar. 2012.

RAUSCH, D. L.; HEINEMANN, H. G. **Reservoir Sedimentation Survey Methods**. Research Bulletin 939. University of Missouri. College of Agriculture. Agricultural Experiment Station. Columbia, Missouri, 1968.

SIGRH – Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br>. Acesso em: 14 jan. 2012.

SYQWEST INCORPORATED. BATHY-500MF Survey Echo Sounder Manual. 2006.

THE DUBLIN statement on water and sustainable development. Dublin, Ireland, 26-31 Jan. 1992. Disponível em: http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/documents/english/icwedece.html>. Acesso em: 14 abr. 2012.

TRANVIK, L. J. et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. **Limnology and Oceanography**, v. 54, n. 6, p. 2298-2314, 2009.

TUNDISI J. G.; MATSUMURA-TUNDISI T.; ARANTES JUNIOR J. D.; TUNDISI J. E. M.; MANZINI N. F. I.; DUCROT, R. The response of Carlos Botelho (Lobo, Broa) reservoir to the passage of cold fronts as reflected by physical, chemical, and biological variables. **Brazilian Journal of Biology**, v. 64, n. 1, p. 177-186, 2004.

TUNDISI, J. G. **Água no Século XXI**: Enfrentando a Escassez. São Carlos: RiMa, IIE, 2003.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers. **Engineering and Design. SEDIMENTATION INVESTIGATION OF RIVERS AND RESERVOIRS**. Engineer Manual No 1110-2-4000. Department of the Army. Washington, D. C., 15 Dec. 1989.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers. Reservoir Sedimentation Surveys. 1 Jan. 2002. In: **Engineering and Design. HIDROGRAPHIC SURVEYING**. Engineer Manual No 1110-2-1003. Department of the Army. Washington, D. C., 1 Apr. 2004.

VANONI, V. A. **Sedimentation Engineering**. New York, NY: ASCE, American Society of Civil Engineers. 1977.

VIVONI, E. R. et al. On the effects of triangulated terrain resolution on distributed hydrologic model response. **Hydrological Processes**, v. 19, 2005.

WILSON, G. L.; RICHARDS, J. M. **Procedural Documentation and Accuracy Assessment of Bathymetric Maps and Area/Capacity Tables for Small Reservoirs**. Scientific Investigations Report 2006–5208. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 24 p., 2006.

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Manual on Sediment Management and Measurement**. Operational Hydrology Report N^{o}. 47. Geneva, Switzerland, Secretariat of the World Meteorological Organization, 2003

YUQIAN, L. **Manual on operational methods for the measurement of sediment transport**. Geneva, Switzerland: WMO, World Meteorological Organisation, 1989.

Apendice A - **Relação Cota-Área-Volume para o Reservatório do Lobo-SP**

Tabela 13 - Relação Cota-Área-Volume para o reservatório do Lobo-SP (continua)

Cota (m)	Área (km^2)	Volume (hm^3)	Cota (m)	Área (km^2)	Volume (hm^3)
703,00	5,62	24,34	**696,50**	1,25	1,57
702,90	5,61	23,78	**696,40**	1,18	1,45
702,80	5,59	23,22	**696,30**	1,10	1,33
702,70	5,58	22,66	**696,20**	1,03	1,22
702,60	5,57	22,11	**696,10**	0,96	1,13
702,50	5,55	21,55	**696,00**	0,89	1,03
702,40	5,53	21,00	**695,90**	0,82	0,95
702,30	5,50	20,44	**695,80**	0,74	0,87
702,20	5,45	19,90	**695,70**	0,67	0,80
702,10	5,38	19,35	**695,60**	0,62	0,73
702,00	5,30	18,82	**695,50**	0,58	0,67
701,90	5,22	18,29	**695,40**	0,54	0,62
701,80	5,13	17,78	**695,30**	0,50	0,57
701,70	5,02	17,27	**695,20**	0,47	0,52
701,60	4,92	16,77	**695,10**	0,44	0,47
701,50	4,82	16,29	**695,00**	0,41	0,43
701,40	4,73	15,81	**694,90**	0,38	0,39
701,30	4,63	15,34	**694,80**	0,35	0,36
701,20	4,52	14,88	**694,70**	0,33	0,32
701,10	4,42	14,44	**694,60**	0,30	0,29
701,00	4,33	14,00	**694,50**	0,28	0,26
700,90	4,24	13,57	**694,40**	0,26	0,23
700,80	4,15	13,15	**694,30**	0,24	0,21
700,70	4,06	12,74	**694,20**	0,22	0,19
700,60	3,98	12,34	**694,10**	0,20	0,17
700,50	3,91	11,94	**694,00**	0,18	0,15
700,40	3,85	11,56	**693,90**	0,16	0,13
700,30	3,78	11,17	**693,80**	0,15	0,11
700,20	3,71	10,80	**693,70**	0,14	0,10
700,10	3,64	10,43	**693,60**	0,12	0,09
700,00	3,57	10,07	**693,50**	0,11	0,08
699,90	3,51	9,72	**693,40**	0,10	0,07
699,80	3,45	9,37	**693,30**	0,09	0,06
699,70	3,38	9,03	**693,20**	0,08	0,05
699,60	3,31	8,69	**693,10**	0,07	0,04

Tabela 13 - Relação Cota-Área-Volume para o reservatório do Lobo-SP (conclusão)

Cota (m)	Área (m^2)	Volume (m^3)	Cota (m)	Área (m^2)	Volume (m^3)
699,50	3,24	8,37	**693,00**	0,06	0,03
699,40	3,17	8,05	**692,90**	0,05	0,03
699,30	3,10	7,73	**692,80**	0,04	0,02
699,20	3,03	7,43	**692,70**	0,03	0,02
699,10	2,97	7,13	**692,60**	0,03	0,02
699,00	2,88	6,83	**692,50**	0,02	0,01
698,90	2,81	6,55	**692,40**	0,02	0,01
698,80	2,74	6,27	**692,30**	0,02	0,01
698,70	2,68	6,00	**692,20**	0,02	0,01
698,60	2,63	5,73	**692,10**	0,01	0,01
698,50	2,56	5,47	**692,00**	0,01	0,01
698,40	2,49	5,22	**691,90**	0,01	0,005
698,30	2,43	4,98	**691,80**	0,01	0,004
698,20	2,37	4,74	**691,70**	0,01	0,003
698,10	2,32	4,50	**691,60**	0,01	0,002
698,00	2,26	4,27	**691,50**	0,005	0,002
697,90	2,21	4,05	**691,40**	0,004	0,001
697,80	2,15	3,83	**691,30**	0,003	0,001
697,70	2,10	3,62	**691,20**	0,002	0,001
697,60	2,04	3,41	**691,10**	0,002	0,001
697,50	1,98	3,21	**691,00**	0,001	0,000
697,40	1,92	3,02	**690,90**	0,001	0,000
697,30	1,85	2,83	**690,80**	0,001	0,000
697,20	1,79	2,64	**690,70**	0,001	0,000
697,10	1,73	2,47	**690,60**	0,000	0,000
697,00	1,66	2,30	**690,50**	0,000	0,000
696,90	1,59	2,14	**690,40**	0,000	0,000
696,80	1,51	1,98	**690,30**	0,000	0,000
696,70	1,43	1,83	**690,20**	0,000	0,000
696,60	1,34	1,70	**690,10**	0,000	0,000

Apendice B - **Código Fonte CAV-NH**

```
'''
Created on 27/12/2011

@author: Artur Matos
'''
# Import system modules
import os, arcgisscripting, time
#sys, os

# Create the Geoprocessor object
gp = arcgisscripting.create()

# Set the necessary product code
gp.SetProduct("ArcInfo")

# Check out any necessary licenses
gp.CheckOutExtension("3D")
gp.CheckOutExtension("spatial")

# Load required toolboxes...
gp.AddToolbox("C:/Program Files (x86)/ArcGIS/ArcToolbox/Toolboxes/Data Management Tools.tbx")
gp.AddToolbox("C:/Program Files (x86)/ArcGIS/ArcToolbox/Toolboxes/3D Analyst Tools.tbx")
gp.AddToolbox("C:/Program Files (x86)/ArcGIS/ArcToolbox/Toolboxes/Spatial Analyst Tools.tbx")
gp.AddToolbox("C:/Program Files (x86)/ArcGIS/ArcToolbox/Toolboxes/Conversion Tools.tbx")
#gp.AddToolbox("C:/Program Files (x86)/ArcGIS/ArcToolbox/Toolboxes/PointToLine.tbx")

def point2line(inPts, outLine, IDField, sortField):
    gp = arcgisscripting.create(9.3)
    gp.OverWriteOutput = 1

    # Input point FC
    #inPts = gp.GetParameterAsText(0)
    # Output polyline FC
    #outLine = gp.GetParameterAsText(1)
    # LineID Field
    #IDField = gp.GetParameterAsText(2)
    # Sort Field
    #sortField = gp.GetParameterAsText(3)
    if sortField == "#":
        sortField = ""
```

```
    if sortField == "":
        cursorSort = IDField
    else:
        cursorSort = IDField + ";" + sortField

    createLinesFromPoints(gp, inPts, outLine, IDField, cursorSort)

def createLinesFromPoints(gp, inPts, outLine, IDField, cursorSort):
    try:
        # Assign empty values to cursor and row objects
        iCur, sRow, sCur, feat = None, None, None, None

        shapeName = gp.Describe(inPts).ShapeFieldName

        # Create the output feature class
        #
        outPath, outFC = os.path.split(outLine)
        gp.CreateFeatureClass(outPath, outFC, "Polyline", inPts, "", "", inPts)

        # Open an insert cursor for the new feature class
        #
        iCur = gp.InsertCursor(outLine)
        sCur = gp.SearchCursor(inPts, "", None, cursorSort, cursorSort)

        sRow = sCur.Next()

        # Create an array and point object needed to create features
        #
        lineArray = gp.CreateObject("Array")
        pt = gp.CreateObject("Point")

        # Initialize a variable for keeping track of a feature's ID.
        #
        ID = -1
        while sRow:
            pt = sRow.GetValue(shapeName).GetPart(0)
            currentValue = sRow.GetValue(IDField)

            if ID == -1:
                ID = currentValue
            if ID <> currentValue:
```

```
            if lineArray.count > 1:
                feat = iCur.NewRow()
                if ID: #in case the value is None/Null
                    feat.SetValue(IDField, ID)
                feat.SetValue(shapeName, lineArray)
                iCur.InsertRow(feat)
            else:
                gp.AddWarning("Not enough points to create a line for %s: %s" % (IDField, str(ID)))
            lineArray.RemoveAll()

        lineArray.Add(pt)
        ID = currentValue
        sRow = sCur.Next()

    # Add the last feature
    #
    if lineArray.count > 1:
        feat = iCur.NewRow()
        if ID: #in case the value is None/Null
            feat.SetValue(IDField, currentValue)
        feat.SetValue(shapeName, lineArray)
        iCur.InsertRow(feat)
    else:
        gp.AddWarning("Not enough points to create a line for %s: %s" % (IDField, str(ID)))
    lineArray.RemoveAll()

except Exception, err:
    print err.message
    gp.AddError(err.message)

finally:
    if iCur:
        del iCur
    if sRow:
        del sRow
    if sCur:
        del sCur
    if feat:
        del feat


print "iniciando..."
t = time.localtime()
```

```
print "hora min seg:"
print t[3], t[4], t[5]

indice_que_parou = 12
distanciamento_que_parou = 140
contador_de_rodadas = 0

indice = indice_que_parou

while indice <=60:

    distanciamento = indice*10
    #distanciamento = 640
    if indice == indice_que_parou:
        distanciamento = distanciamento_que_parou
    while distanciamento <=600:



        # Local variables...

        print "carregando dados de entrada..."

        reservatorio = "Broa"
        distanciamento_numero = str(distanciamento)+"_"+str(indice)
        #reservatorio = Linha1
        #distanciamento_numero = Linha2



        reservatorio_distanciamento_numero = reservatorio + "_" + distanciamento_numero
        batimetria_distanciamento_numero = "Batimetria_" + distanciamento_numero

        print reservatorio_distanciamento_numero

        endereco_saida = "D:\\Reservatorio\\saida\\" + reservatorio_distanciamento_numero + "\\"
        endereco_entrada = "D:\\Reservatorio\\entrada_broa\\"
        endereco_entrada_distanciamento = "D:\\Reservatorio\\entrada_broa\\" +
batimetria_distanciamento_numero + "\\"

        diretorio = endereco_saida.replace("\\","/")
        if not os.path.exists(diretorio):
            os.makedirs(diretorio)
```

```
batimetria_txt = endereco_entrada_distanciamento + batimetria_distanciamento_numero + ".txt"
batimetria_shp = endereco_saida + batimetria_distanciamento_numero
#print batimetria_txt

Borda_direita_txt = endereco_entrada_distanciamento + "Borda_direita_" + distanciamento_numero + ".txt"
Borda_direita_shp = endereco_saida + reservatorio_distanciamento_numero + "_BD"

Borda_esquerda_txt = endereco_entrada_distanciamento + "Borda_Esquerda_" + distanciamento_numero +
".txt"
Borda_esquerda_shp = endereco_saida + reservatorio_distanciamento_numero + "_BE"

Borda_superior_txt = endereco_entrada + reservatorio + "_BordaS.txt"
Borda_superior_shp = endereco_saida + reservatorio_distanciamento_numero + "_BS"

Borda_inferior_txt = endereco_entrada + reservatorio + "_BordaI.txt"
Borda_inferior_shp = endereco_saida + reservatorio_distanciamento_numero + "_BI"



# Process: Make XY Event Layer...
gp.MakeXYEventLayer_management(batimetria_txt, "x", "y", batimetria_shp, "")

# Process: Feature Class To Shapefile (multiple)...
gp.FeatureClassToShapefile_conversion(batimetria_shp, endereco_saida)



# Process: Make XY Event Layer...
gp.MakeXYEventLayer_management(Borda_direita_txt, "x", "y", Borda_direita_shp, "")

# Process: Feature Class To Shapefile (multiple)...
gp.FeatureClassToShapefile_conversion(Borda_direita_shp, endereco_saida)



# Process: Make XY Event Layer...
gp.MakeXYEventLayer_management(Borda_superior_txt, "x", "y", Borda_superior_shp, "")

# Process: Feature Class To Shapefile (multiple)...
gp.FeatureClassToShapefile_conversion(Borda_superior_shp, endereco_saida)

# Process: Make XY Event Layer (2)...
gp.MakeXYEventLayer_management(Borda_inferior_txt, "x", "y", Borda_inferior_shp, "")

# Process: Feature Class To Shapefile (multiple) (2)...
gp.FeatureClassToShapefile_conversion(Borda_inferior_shp, endereco_saida)
```

```
    # Process: Make XY Event Layer (4)...
    gp.MakeXYEventLayer_management(Borda_esquerda_txt, "x", "y", Borda_esquerda_shp, "")

    # Process: Feature Class To Shapefile (multiple) (4)...
    gp.FeatureClassToShapefile_conversion(Borda_esquerda_shp, endereco_saida)

    Borda_direita_shp = Borda_direita_shp + ".shp"
    Borda_direita_LINE_shp = endereco_saida + reservatorio_distanciamento_numero + "_BD_Line.shp"

    # Process: Add Field...
    gp.AddField_management(Borda_direita_shp, "line", "LONG", "", "", "", "", "NON_NULLABLE",
"NON_REQUIRED", "")

    # Process: Calculate Field...
    gp.CalculateField_management(Borda_direita_shp, "line", "1", "VB", "")

    # Process: Point To Line...
    #gp.PointToLine_dm(Borda_direita_shp, Borda_direita_LINE_shp, "line", "FID")

    # Input point FC
    inPts = Borda_direita_shp
    # Output polyline FC
    outLine = Borda_direita_LINE_shp
    # LineID Field
    IDField = "line"
    # Sort Field
    sortField = "FID"

    point2line(inPts, outLine, IDField, sortField)

    Borda_esquerda_shp = Borda_esquerda_shp + ".shp"
    Borda_esquerda_LINE_shp = endereco_saida + reservatorio_distanciamento_numero + "_BE_Line.shp"

    # Process: Add Field...
    gp.AddField_management(Borda_esquerda_shp, "line", "LONG", "", "", "", "", "NON_NULLABLE",
"NON_REQUIRED", "")

    # Process: Calculate Field...
    gp.CalculateField_management(Borda_esquerda_shp, "line", "1", "VB", "")

    # Process: Point To Line...
    # gp.PointToLine_dm(Borda_esquerda_shp, Borda_esquerda_LINE_shp, "line", "FID")
```

```
# Input point FC
inPts = Borda_esquerda_shp
# Output polyline FC
outLine = Borda_esquerda_LINE_shp

point2line(inPts, outLine, IDField, sortField)

Borda_superior_shp = Borda_superior_shp + ".shp"
Borda_superior_LINE_shp = endereco_saida + reservatorio_distanciamento_numero + "_BS_Line.shp"

# Process: Add Field...
gp.AddField_management(Borda_superior_shp, "line", "LONG", "", "", "", "", "NON_NULLABLE", "NON_REQUIRED", "")

# Process: Calculate Field...
gp.CalculateField_management(Borda_superior_shp, "line", "1", "VB", "")

# Process: Point To Line...
#gp.PointToLine_dm(Borda_superior_shp, Borda_superior_LINE_shp, "line", "FID")
# Input point FC
inPts = Borda_superior_shp
# Output polyline FC
outLine = Borda_superior_LINE_shp

point2line(inPts, outLine, IDField, sortField)

Borda_inferior_shp = Borda_inferior_shp + ".shp"
Borda_inferior_LINE_shp = endereco_saida + reservatorio_distanciamento_numero + "_BI_Line.shp"

# Process: Add Field...
gp.AddField_management(Borda_inferior_shp, "line", "LONG", "", "", "", "", "NON_NULLABLE", "NON_REQUIRED", "")

# Process: Calculate Field...
gp.CalculateField_management(Borda_inferior_shp, "line", "1", "VB", "")

# Process: Point To Line...
#gp.PointToLine_dm(Borda_inferior_shp, Borda_inferior_LINE_shp, "line", "FID")
# Input point FC
inPts = Borda_inferior_shp
# Output polyline FC
outLine = Borda_inferior_LINE_shp
```

```
point2line(inPts, outLine, IDField, sortField)

Contorno_poligono_menor_shp = endereco_saida + reservatorio_distanciamento_numero + "_poligono.shp"
arquivo_poligono = Borda_superior_LINE_shp + ';' + Borda_inferior_LINE_shp + ';' + Borda_esquerda_LINE_shp + ';' + Borda_direita_LINE_shp

# Process: Feature To Polygon...
gp.FeatureToPolygon_management(arquivo_poligono, Contorno_poligono_menor_shp, "", "ATTRIBUTES", "")

# Local variables...


Batimetria_shp = endereco_saida + "batimetria_" + distanciamento_numero + ".shp"
Contorno_poligono_Maior_shp = endereco_entrada + reservatorio + "_Contorno_Pol.shp"
Contorno_poligono_menor_shp = endereco_saida + reservatorio_distanciamento_numero + "_poligono.shp"

Raster_TIN1 = endereco_saida + "Raster_TIN1"
Rast_TIN1_pol = endereco_saida + "Rast_TIN1_pol"
rastertopoint_shp = endereco_saida + "rastertopoint.shp"
TIN_1 = endereco_saida + "TIN_1"
TIN_final = endereco_saida + "TIN_final"

gp.CreateTin_3d(TIN_1, "")

print "Process: Edit TIN..."
configuracao_TIN1 = """ + Batimetria_shp + "' Z <None> masspoints false"
gp.EditTin_3d(TIN_1, configuracao_TIN1)

gp.TinRaster_3d(TIN_1, Raster_TIN1, "FLOAT", "LINEAR", "Cellsize 4", "1")

gp.ExtractByMask_sa(Raster_TIN1, Contorno_poligono_menor_shp, Rast_TIN1_pol)

gp.RasterToPoint_conversion(Rast_TIN1_pol, rastertopoint_shp, "Value")
gp.CreateTin_3d(TIN_final, "")

configuracao_TIN_final = Contorno_poligono_Maior_shp + ' Id <None> softclip false;' + rastertopoint_shp + ' GRID_CODE <None> masspoints false;' + Batimetria_shp + ' Z <None> masspoints false'
gp.EditTin_3d(TIN_final, configuracao_TIN_final)

t = time.localtime()
print "iniciando calculo do EAV..."
```

```
        print "hora min seg:"
        print t[3], t[4], t[5]

        limite_inferior = 691.0
        limite_superior = 704
        intervalo_EAV = 0.5

        n_iteracoes = (abs(limite_superior - limite_inferior) / abs(intervalo_EAV)) + 1
        i = 1
        while i <= n_iteracoes:
            EAV_txt = endereco_saida + "EAV_" + reservatorio_distanciamento_numero + ".txt"
            batimetria_EAV = endereco_saida + "tin_final"
            limite_superior_str = str(limite_superior)

            gp.SurfaceVolume_3d(batimetria_EAV, EAV_txt, "BELOW", limite_superior_str , "1")

            limite_superior = limite_superior - abs(intervalo_EAV)
            i = i + 1

        t = time.localtime()
        print "hora final do indice:"
        print t[3], t[4], t[5]
        contador_de_rodadas = contador_de_rodadas + 1
        print contador_de_rodadas

        distanciamento = distanciamento + 10
    print "sleep 5 min"
    time.sleep(1)
    indice = indice + 1

t = time.localtime()
print "hora FINAL:"
print t[3], t[4], t[5]
        print "FIM"
```