UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS E ECOLOGIA APLICADA
PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL

MARCUS VINÍCIUS ESTIGONI

Influência da quantidade e disposição de dados na modelação de terrenos aplicada a batimetria de reservatórios. Estudos de caso:
UHE Três Irmãos – SP e UHE Chavantes – SP

São Carlos – SP.

2012

MARCUS VINÍCIUS ESTIGONI

Influência da quantidade e disposição de dados na modelação de terrenos aplicada a batimetria de reservatórios. Estudos de caso:
UHE Três Irmãos – SP e UHE Chavantes – SP

Dissertação 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 a obtenção do título de Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Fabio Mauad

São Carlos – SP.

2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

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

Estigoni, Marcus Vinicius

E81i   Influência da quantidade e disposição de dados na modelação de terrenos aplicada a batimetria de reservatórios - estudo de caso : UHE Três Irmãos-SP e UHE Chavantes-SP / Marcus Vinicius Estigoni ; orientador Frederico Fabio Mauad. — São Carlos, 2012.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Sedimentologia. 2. Batimetria. 3. Modelação de terrenos. 4. Assoreamento.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MARCUS VINÍCIUS ESTIGONI**

Título da dissertação: "Influência da quantidade e disposição de dados na modelação de terrenos aplicada a batimetria de reservatórios. Estudo de caso: UHE Três Irmãos - SP e UHE Chavantes - SP".

Data da defesa: 20/01/2012

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Frederico Fábio Mauad (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Irani dos Santos**
(Universidade Federal do Paraná)

Resultado:

Aprovado

Aprovado

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental:

Prof. Dr. **Frederico Fabio Mauad**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

Este trabalho é fruto de esforço de 3 pessoas, e é a elas que eu o dedico. Sr. Antonio Milton, Sr^a. Maria Aparecida e Eduardo Henrique... Pai, Mãe e Irmão que sempre me apoiaram e deram suporte em todas as etapas de minha vida.

Dedico também a minha querida Avó, obrigado por sempre olhar por mim.

In memoriam

Agradecimentos

A Deus, por toda força nos momentos difíceis, dons concedidos e por sempre colocar pessoas boas em meu caminho.

À toda minha família, em especial a minha madrinha Maria Lucia e minha Tia Albertina, por todo apoio.

Aos meus pais por todo amor incondicional, apoio irrestrito e compreensão.

Ao grande amigo Prof. Dr. Frederico F. Mauad, pela orientação, pela amizade, ensinamentos, oportunidades e pela confiança depositada.

Aos companheiros de pesquisa do Núcleo de Hidrometria, especialmente a Artur José Soares Matos e a Dr^a. Juliana Moccellin por todo incentivo e ajuda na execução deste trabalho.

Aos companheiros de moradia, José “Frodo” Dimas, Gustavo “Pintor” Cavalcante. Aos membros da minha “família” da República FURA ZOiO, pela amizade, apoio, boas risadas e momentos de diversão. Em especial, a Julio “Pankada” Kuwajima, companheiro de moradia e de pesquisa, pelos oito peculiares anos de convivência.

Ao Prof. Paulo César Lima Segantine pelos conselhos e pelo empréstimo de equipamentos.

Ao técnico hidrometrista Waldomiro Antônio Filho não só pelo auxílio, mas também pela boa companhia durante os trabalhos em campo.

Aos amigos e Funcionários do CRHEA.

À FIPAI pelo apoio à apresentação de trabalhos e suporte das atividades de coleta de dados.

À CESP pelo auxílio e suporte à pesquisa do estudo de caso da UHE Três Irmãos (SP)

À Duke Energy International pelo auxílio e suporte à pesquisa do estudo de caso da UHE Chavantes (SP).

À CAPES e ao programa PRÓ – ENGENHARIAS, pela bolsa concedida.

“A bove majore discit arare minor”
“O boi mais velho ensina o mais novo a arar”

Resumo

ESTIGONI, M. V., *Influência da quantidade e disposição de dados na modelação de terrenos aplicada a batimetria de reservatórios. Estudos de caso: UHE Três Irmãos – SP e UHE Chavantes – SP*. 124p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos – SP, 2012.

Visando garantir a disponibilidade hídrica em seus diferentes usos são construídos reservatórios, estes sempre associados a problemas de perda de volume de armazenamento devido ao processo de assoreamento. A atualização destes dados, bem como a quantificação do assoreamento geralmente é feita através de Levantamento Batimétrico. Apesar da grande importância do tema não é observado na literatura um método padronizado para a realização de estudos batimétricos, autores e organizações apresentam métodos dispares quanto à quantidade e disposição dos dados. Deste modo, a presente pesquisa buscou elencar os métodos apresentados na literatura e analisá-los quanto a precisão obtida no cálculo de volume do reservatório, utilizando como estudo de caso o reservatório da UHE Três Irmãos (SP). Observou-se que os MDTs gerados pelos métodos não representavam com fidelidade trechos estreitos do reservatório (braços) bem como o talvegue. Foi então proposto um método para a determinação do espaçamento entre seções bem como uma rotina para geração de MDT considerando características do talvegue. O método proposto para determinação do espaçamento entre seções se mostrou capaz de representar com relativa boa precisão trechos dos braços (diferença máxima encontrada de 5,01%) e apresentou tempo de coleta de dados de 60% do método mais preciso apresentado na literatura. A rotina de geração de MDT proporcionou em média melhora de aproximadamente 30% na qualidade dos dados de volume calculados. Por meio da aplicação dos métodos desenvolvidos na UHE Chavantes foi calculado um assoreamento de 3,91%, de acordo com os resultados, sem a utilização da rotina de geração de MDT desenvolvida cálculo do volume do reservatório seria subestimado em 1,61%, superestimando o cálculo do assoreamento.

Palavras-chave: Batimetria, Sedimentologia, Modelação de Terrenos, Assoreamento.

Abstract

ESTIGONI, M. V., *The influence of sampling rate and location for terrain modeling applied in reservoir bathymetric surveys. Cases of Studies: Tres Irmaos – SP Reservoir and Chavantes Reservoir – SP*. 124p. Dissertation (Master degree) – Graduate Program in Environmental Engineering Sciences, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos – SP, 2011.

Water reservoirs are built with the main purpose of guaranteeing water supply, however, their volume always decreases due the sedimentation processes. Bathymetric surveys can be deployed to assess the current volumetric capacity of a given reservoir and to estimate and quantify the sedimentation process. Although Bathymetric surveys are considered to be a key factor when analyzing and assessing properties of a given reservoir, a standard method for its deployment is yet to be defined. Authors and research groups presents different methods about the sampling rate as well as the choice of adequate spots for data collection. The overall goal of this research was to identify and analyze the different methods deployed in previous published literature analyzing the accuracy of the volume data provided by these different methods. Três Irmãos reservoir (São Paulo) was used as a case study where methods were compared. It was pointed out that the DEMs obtained were unable to accurately represent narrower reservoirs areas (tributaries) and the thalweg. Therefore was proposed a new method for determining the distance among survey sections as well as a routine for DEM generation takes into account the thalweg characteristics. Results revealed that the data pulled out was able to represent with accuracy the tributary areas (maximum difference was 5.01%). In addition, a reduced data collection time was observed (60%) when compared against the most accurate method found in published literature. The proposed technique for DEM generation indicated approximately 30% of quality improvement in the data calculated for the reservoir volume. The developed method was applied on a bathymetric survey conducted on the Chavantes reservoir (São Paulo). The loss of reservoir capacity assessed was 3.19%. According to results, a bathymetric survey which does not deploy the new method proposed would underestimate the reservoir's volume by 1.61% and overestimate the sedimentation process.

Key-words: Bathymetry, Sedimentology, Terrain modeling, Sedimentation.

Lista de Figuras

Figura 1 – Esquema de formação de depósitos de sedimentos nos reservatórios e seus principais problemas (Adaptado de CARVALHO, 2008).	9
Figura 2 – a) Exemplo do planejamento de seções de levantamento batimétrico tradicionais utilizando de coordenadas locais e poligonal básica para determinação de seções transversais (adaptado de CARVALHO, 1994); b) Exemplo de técnicas convencionais para determinação do posicionamento dos locais de coleta de dados (adaptado de US Army Corps of Engineers, 2004).	40
Figura 3 – a) Esquema da montagem dos equipamentos; b) Princípios de funcionamento de uma sonda acústica (adaptado de US Army Corps of Engineers, 2004).....	40
Figura 4 – Localização da UGRHI – 19 no estado de São Paulo (http://www.sigrh.sp.gov.br Acesso em outubro de 2011).	54
Figura 5 – Cultivo de cana-de-açúcar até as margens do reservatório.	57
Figura 6 – Solo exposto devido à época de plantio de cana-de-açúcar: potencial área de ocorrência de erosão laminar.....	57
Figura 7 – Presença de ravina em pastagem.....	58
Figura 8 – Localização da UGRHI – 19 no estado de São Paulo (Disponível em http://www.sigrh.sp.gov.br Acesso em outubro de 2011).	59
Figura 9 – Vista de jusante do alto do barramento da UHE Chavantes (SP).	60
Figura 10 – Ecobatímetro modelo BATHY-500MF da fabricante <i>SyQwest. Inc</i> (Fonte: http://www.syqwestinc.com) e barco com ecobatímetro realizando varredura.....	62
Figura 11 – Transdutor da sonda (tradução livre de SYQWEST INCORPORATED, 2006).	62
Figura 12 – a) Equipamento GPD - GS20 da Leica Geosystems (Fonte: http://www.leica-geosystems.com); b) Receptor 3000L da Fugro.....	63
Figura 13 – Tela de navegação do módulo <i>Survey</i> do HYPACK MAX.	65
Figura 14 – Tela de tratamento dos dados do módulo <i>Single Beam Processing</i> do HYPACK MAX.....	66
Figura 15 – Articulação das cartas topográficas.....	69
Figura 16 – Digitalização, georreferenciamento e registro das cartas topográficas do IBGE.	69
Figura 17 – MDT de Referência.....	73
Figura 18 – Exemplo da simulação de uma seção de levantamento batimétrico.	73
Figura 19 - Região analisada separadamente	75

Figura 20 – Regiões analisadas separadamente	75
Figura 21 – Exemplo do método de simulação de dados batimétricos para o compartimento Braço 2.	76
Figura 22 – Exemplo do problema apresentado pela modelagem TIN na representação do canal de drenagem para o compartimento Principal 3.	79
Figura 23 – Exemplos de regiões que apresentam triângulos planos para o espaçamento entre seções de 1000m no compartimento Braço 1.....	79
Figura 24 – Melhoria na precisão do cálculo do volume utilizando o método de Geração de MDT considerando características do talvegue. Os dados correspondem à diferença percentual em relação ao volume do MDT de referência.....	86
Figura 25 – Seções de levantamento de dados executadas no reservatório de Chavantes (SP).....	88
Figura 26 – Tela do programa Survey do pacote HYPACK que mostra o posicionamento da embarcação em tempo real. Destaque para a embarcação em cinza navegando em região que segundo os dados fornecidos seria terra firme.	89
Figura 27 – Diferença entre o contorno fornecido e as imagens SPOT após as devidas transformações de sistema de referência.....	90
Figura 28 – Imagens SPOT utilizadas, destaque em vermelho para a localização do reservatório da UHE Chavantes (SP).....	91
Figura 29 – Destaque para a diferença na localização de coordenadas planas quando utilizados sistemas de referência distintos sem a utilização de parâmetros de correção. Imagens SPOT coordenadas aproximadas 7449000N e 630500E, UTM 22S, SIRGAS 2000.	92
Figura 30 – Detalhe do contorno baseado em processo erosivo.	93
Figura 31 – Detalhe do contorno baseado em obras.	93
Figura 32 – Detalhe do contorno baseado nos limites da cultura.	93
Figura 33 – Exemplo de uma seção de seção com dados anômalos, após tratamento automático e manual.....	95
Figura 34 - Exemplo de uma seção de levantamento apresentando. a) medidas discrepantes antes do tratamento; b) após o tratamento.....	96
Figura 35 – Exemplo rotina de geração do MDT considerando o talvegue. a) e b) Encontro do Rio Itararé com o Rio Paranapanema, grade TIN e MDT sem o emprego da rotina; c) e d) Encontro do Rio Itararé com o Rio Paranapanema, grade TIN e MDT após o emprego da rotina. e) e f) Trecho sinuoso no rio Itararé, grade TIN e MDT sem o emprego da rotina; c) e d) Trecho sinuoso no rio Itararé, grade TIN e MDT após o emprego da rotina.....	98

Lista de Tabelas

Tabela 1– Exemplos de grandes UHEs que foram construídas nos anos 50, 60 e 70.	21
Tabela 2 – Quadro resumo da análise geral sobre as obras citadas (ESTIGONI <i>et al</i> , 2010b).	44
Tabela 3 – Distanciamento das seções transversais (CARVALHO <i>et al</i> , 2000).	49
Tabela 4 – Características da Barragem da UHE Três Irmãos (SP) (Adaptado de www.cesp.com.br acesso em 2008).	55
Tabela 5 – Continuação da Tabela 4. Características da Barragem da UHE Três Irmãos (SP) (Adaptado de www.cesp.com.br acesso em 2008).	56
Tabela 6 – Informações gerais da UHE Chavantes (SP) (Fonte: DUKE ENERGY, 2011b).	60
Tabela 7 – Continuação da Tabela 6. Informações gerais da UHE Chavantes (SP) (Fonte: DUKE ENERGY, 2011b).	61
Tabela 8 – Cartas topográficas do IBGE utilizadas para digitalização.	68
Tabela 9 – Diferença entre o volume calculado para cada método e o volume de referência.	77
Tabela 10 – Diferença entre o volume produzido pelos diferentes métodos e o volume do MDT de referência para os compartimentos Principal 1 e Principal 4.	80
Tabela 11 – Diferença entre o volume calculado e o volume de referência.	82
Tabela 12 – Estimativa do tempo gasto com levantamento de campo.	83
Tabela 13 – Diferença percentual do cálculo de volume sem utilizar e utilizando a rotina de geração de MDT considerando o Talvegue.	85
Tabela 14 – Resumo dos dados da curva CAV apresentados em relação ao volume máximo normal de operação.	101
Tabela 15 – Parâmetros da equação polinomial de quarto grau que relaciona cota X área.	102
Tabela 16 – Comparação entre as áreas observadas e as áreas obtidas pela regressão matemática.	102
Tabela 17 – Parâmetros da equação polinomial de quarto grau que relaciona cota X volume. ...	103
Tabela 18 – Comparação entre os volumes observados e os volumes obtidos pela regressão matemática.	103
Tabela 19 – Cálculo do assoreamento baseado na comparação entre as CAV.	104
Tabela 20 – Resumo da situação do assoreamento do reservatório.	105
Tabela 21 – Resumo da situação do assoreamento compreendido no volume útil.	105
Tabela 22 – Resumo da situação do assoreamento compreendido no volume morto.	105

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos
AC – Corrente Alternada
AGENERSA – Agência Reguladora de Energia e Saneamento Básico do Estado do Rio de Janeiro
ÁGUASPARANÁ – Instituto das Águas do Paraná
ANA – Agência Nacional de Águas
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CAV – Cota X Área X Volume
CC – Corrente Contínua
CDE – Conta de Desenvolvimento Energético
CEHPAR – Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza
CEMIG – Companhia de Eletricidade de Minas Gerais S.A.
CESP – Companhia Energética de São Paulo
CETEC – Centro Tecnológico de Lins - SP
CBH – Comitê de Bacia Hidrográfica
CGH – Centrais Geradoras Hidrelétricas
CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
CHM – Centro Hidrográfico da Marinha
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM – Serviço Geológico do Brasil
CNAEE – Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica
CRHEA – Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada
DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica (estado de São Paulo)
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DGPS – Differential Global Positioning System
DHN – Departamento Hidrográfico Nacional
DNAE – Departamento Nacional de Energia
DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral
EESC – Escola de Engenharia de São Carlos
ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S. A.
FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations
FIPAI – Fundação para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial
GPS – Global Positioning System
GNSS – Global Navigation Satellite System
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS – Imposto Circulação de Mercadorias e Serviços
ICOLD – International Commission on Large Dams

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas
IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas
IQA – Índice de Qualidade das Águas
ITRS – International Terrestrial Reference Frame
LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LH – Levantamentos Hidrográficos
MDU – Ministério do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente
NAVISTAR – Navigation Satellite with Time and Ranging
NORMAM – Normas da Autoridade Marítima
ONS – Operador Nacional do Sistema
PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas
PCJ – Piracicaba, Capivari, Jundiaí
P & D – Pesquisa e Desenvolvimento
PNMA – Política Nacional do Meio Ambiente
PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos
PRO-ENGENHARIAS – de apoio ao Ensino e à Pesquisa Científica e Tecnológica em Engenharias
PS – Paraíba do Sul
MDT – Modelo Digital de Terreno
MLT – Vazão Média a Longo Termo
MMA – Ministério do Meio Ambiente
MME – Ministério de Minas e Energia
N.A. – Nível d'água
NH – Núcleo de Hidrometria
NMEA – National Marine Electronics Association (Estados Unidos)
SAD – South American Datum
SEMA – Secretaria Especial do Meio Ambiente
SIG – Sistema de Informação Geográfica
SINGREH – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente
TIN – Triangular Irregular Network
TWDB – Texas Water Development Board
UFGRS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFPR – Universidade Federal do Paraná
UGRHI – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UHE – Usinas Hidrelétricas de Energia
USP – Universidade de São Paulo
UTM – Universal Transverse Mercator
VBS – Virtual Base Station
WGS – World Geodetic System

Sumário

Resumo	xi
Abstract	xiii
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
Lista de Abreviaturas e Siglas	xix
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
3. REVISÃO DE LITERATURA	6
3.1. Histórico da Hidrossedimentologia	6
3.2. Assoreamento em Reservatórios	7
3.3. Tipos de Depósitos de Sedimentos	8
3.4. Considerações Gerais sobre o Assoreamento de Reservatórios	10
3.5. Aspectos Legais	13
3.5.1. <i>Histórico dos Órgãos Competentes e da Legislação</i>	14
3.6. Órgãos competentes em exercício	25
3.6.1. <i>Estruturação e atribuições da ANA</i>	25
3.6.2. <i>Estruturação e atribuições da CPRM</i>	27
3.6.3. <i>Estruturação e atribuições da ANEEL</i>	29
3.7. Legislação pertinente ao monitoramento hidrossedimentológico	30
3.7.1. <i>Resolução ANEEL N° 396, de 4 de Dezembro de 1998</i>	31
3.7.2. <i>Resolução Conjunta N° 003, de 10 de Agosto de 2010 – ANEEL – ANA</i>	32
3.7.3. <i>Análise da Resolução ANEEL N°396 e ANEEL – ANA N°003</i>	34
4. LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS	37
4.1. Métodos de levantamentos	38
4.2. Intervalo entre levantamentos	41
4.3. Revisão de Literatura – Estado da Arte Nacional	42
4.4. Divergências no planejamento de Batimetria em reservatório	48
4.4.1. <i>NORMAM 25 do DHN</i>	48
4.4.2. <i>Espaçamento delimitado em função da escala de representação do mapa</i>	48
4.4.3. <i>Utilização de equações para determinação da distância entre seções</i>	49
4.4.4. <i>Espaçamento fixo entre seções de levantamento</i>	50
4.4.5. <i>Considerando a precisão no cálculo do volume do reservatório</i>	51

4.4.6.	<i>Experiência do Núcleo de Hidrometria – EESC – USP</i>	51
5.	MATERIAIS	53
5.1.	Estudos de Casos	53
5.1.1.	<i>UHE Três Irmãos – SP</i>	54
5.1.2.	<i>UHE Chavantes – SP</i>	59
5.2.	Ecobatímetro – BATHY 500 MF (SyQwest. Inc)	61
5.3.	Sistema GPS com Correções Diferenciais	63
5.4.	Pacote HYPACK (Hypack, Inc.)	64
5.5.	Software Arcview 9.3	66
5.6.	Demais equipamentos de apoio às atividades de Campo	67
5.7.	Cartas do IBGE	67
6.	MÉTODOS	71
6.1.	<i>UHE Três Irmãos (SP) – Estudo dos métodos presentes na literatura</i>	72
6.1.1.	<i>Resultados das simulações</i>	77
6.1.2.	<i>Análise preliminar</i>	78
6.1.3.	<i>Proposta de método de determinação de espaçamento entre de seções</i>	81
6.1.3.1.	<i>Resultados e análise</i>	82
6.1.4.	<i>Proposta de rotina para geração de MDT considerando características do talvegue</i>	84
6.1.4.1.	<i>Resultados e análise</i>	85
6.2.	<i>UHE Chavantes (SP) – Aplicação do método proposto</i>	88
6.2.1.	<i>Planejamento das seções de levantamento</i>	88
6.2.2.	<i>Levantamento de dados em Campo</i>	94
6.2.3.	<i>Tratamento dos Dados</i>	95
6.2.4.	<i>Processamento dos Dados</i>	97
6.2.5.	<i>Criação das tabelas CAV</i>	99
6.2.6.	<i>Resultados</i>	101
6.2.7.	<i>Cálculo do Assoreamento</i>	104
6.2.8.	<i>Estimativa de Vida Útil do Reservatório</i>	106
6.2.9.	<i>Discussão do estudo de caso</i>	106
7.	DISCUSSÃO E CONCLUSÕES GERAIS	108
8.	RECOMENDAÇÕES	113
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

1. INTRODUÇÃO

A água é indispensável para a manutenção da vida na Terra, tal que todos os organismos vivos, incluindo o homem, dependem da água para sua sobrevivência. Ela é utilizada no consumo humano, atividades industriais, geração de energia, irrigação, lazer, entre outros usos e é fonte de riqueza e desenvolvimento, desempenhando, assim, um papel fundamental no desenvolvimento de qualquer sociedade.

Sua utilização até poucos anos sempre se deu sob o pensamento de dádivas da natureza, reservatórios inesgotáveis capazes de fornecer água pura indefinidamente. Numa visão em que setenta por cento do nosso planeta é coberto por água pode parecer perfeitamente normal, porém noventa e sete e meio por cento corresponde a água salgada, aproximadamente dois e meio por cento está nas geleiras ou regiões subterrâneas de difícil acesso, sobrando apenas sete milésimos de ponto percentual (0,007%) de água doce disponível em rios, lagos e atmosfera.

Segundo Machado (2004) outro ponto importante a ser considerado é a má distribuição deste recurso no globo. De acordo com FAO (2003) o Brasil apresenta se destaca no cenário mundial por possuir aproximadamente doze por cento da água doce disponível do planeta.

Há muito a sociedade brasileira mostra preocupação com os recursos hídricos. A primeira lei sobre o tema é o Código das Águas de 1934 que até hoje vigora. A lei mais recente data de 1997, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) através da Lei N° 9433. Planos e metas definidos pela PNRH e pelas legislações complementares ainda se encontram em fase de implementação, seja por falta de recursos, falta de órgãos responsáveis consolidadas, por normas pouco claras, normas muito recentes ou mesmo ausência de normas regulamentadoras. Desta forma, o levantamento de dados hidrológicos e hidrométricos e as pesquisas na área de gerenciamento de recursos hídricos são necessários, e considerando que o Brasil possui aproximadamente doze por cento do total mundial de água doce mostra-se a grande importância destes tipos de estudos.

Existem dois fatores que determinam a disponibilidade hídrica: o fator espacial, o qual é determinado pelas características da região, como clima, solo, topografia, etc.; e o fator temporal, o qual a disponibilidade de água em uma

determinada região não é constante ao longo de um ano hidrológico, apresentando períodos bem distintos de cheia e de seca.

Considerando certa continuidade na disponibilidade de recurso hídrico o crescimento populacional gera aumento da demanda por este bem em suas diversas utilidades (abastecimento urbano, industrial, produção agrícola e de energia elétrica, garantia da vazão ecológica, etc.). Tal crescimento na demanda gera conflitos sobre utilização da água e, conseqüentemente, problemas para seu planejamento atual e futuro.

Existem duas formas para a resolução de tais conflitos, uma focada no aumento da disponibilidade e outra na diminuição da demanda. A presente pesquisa não é focada na redução da demanda, não entrando no mérito da sustentabilidade e do uso racional do bem Água, sendo focada em sua disponibilidade.

Uma forma de se proporcionar o “aumento” da disponibilidade é a utilização de reservatórios, os quais armazenam o excedente de água da época de cheia de modo que este possa ser utilizado na época de seca, sendo o volume disponível diretamente relacionado com a capacidade de armazenamento do reservatório que por sua vez é ligado com a topografia do terreno o qual é construído.

A capacidade de armazenamento, também chamado de capacidade ou volume de reservação, é o dado base para a gestão de um reservatório. Todo o gerenciamento de um reservatório é feito através dos dados de volume, geralmente expressos por uma curva que relaciona a cota (termo erroneamente utilizado pela Hidrologia para definir o termo “altitude”, neste caso “cota” possui o significado de profundidade relacionada a um marco de referencial altimétrico conhecido em relação ao nível do mar), a área do espelho d’água e o volume a ela associados. Sendo assim, com uma simples leitura de nível das águas do reservatório, se verifica a área de seu espelho d’água e o volume que este possui no exato momento, fornecendo subsídio para se determinar vazões a serem utilizadas em seus diversos usos, a abertura ou fechamento de comportas, etc.

Com o passar do tempo há a alteração da topografia do fundo do reservatório, geralmente tendo como conseqüência a perda da capacidade de armazenamento devido ao assoreamento, sendo assim o levantamento topográfico prévio ao enchimento do reservatório não mais condiz com a atualidade e quanto maior a idade do reservatório menor será a fidelidade do dado pré-enchimento com a condição real, podendo vir a gerar problemas de gestão (ESTIGONI *et al*, 2009).

Corrêa Filho *et al* (2005) afirmam que no Brasil diversos reservatórios têm feito suas políticas de operação utilizando o volume útil do projeto do reservatório, ainda fazem a ressalva de que a curva cota X volume utilizada para o projeto de uma barragem deve ser utilizada apenas como ponto de partida para o plano de gestão dos seus recursos hídricos, além do fato que nem sempre são baseadas em levantamentos topográficos de escala adequada, disponíveis na época de sua construção.

A revisão e atualização destes dados é feita através de estudos batimétricos, os quais consistem no levantamento do relevo do fundo do reservatório. Estes dados além de fornecerem o volume real (da época do levantamento de dados) que um reservatório pode armazenar ao serem trabalhados em conjunto com os dados anteriores ao enchimento, ou com batimetrias anteriores, fornecem dados quantitativos do assoreamento e também a previsão do tempo de vida útil do reservatório. Tal que a realização de estudos desta natureza é de grande importância para a gestão de recursos hídricos.

Lembrando que no Brasil 71,02% da geração elétrica é proveniente desta fonte, sendo 67,75% proveniente de Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE), 3,10% de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e 0,17% de Centrais Geradoras Hidrelétricas (ANEEL, 2011a), é de suma importância a realização de estudos hidrológicos nos reservatórios das Usinas Hidrelétricas (UHE) para o Operador Nacional do Sistema (ONS) realizar o gerenciamento e planejamento do setor elétrico. Desta forma a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 4 de dezembro de 1998 publicou a Resolução N° 396 e posteriormente a Resolução Conjunta N° 003 ANEEL – ANA de 10 de Agosto de 2010, que dispõem sobre os estudos hidrossedimentológicos em aproveitamentos hidrelétricos, dentre os quais prevê levantamentos batimétricos periódicos (a cada dez anos).

Muitos são os estudos batimétricos realizados no Brasil e no exterior, porém é observada a ausência de uma padronização de como se deve realizar o levantamento de dados. Autores e organizações se divergem ante a este fato, apresentando em seus métodos quantidade e disposição no reservatório dos dados muito distintos, sendo que a utilização de diferentes métodos geram divergências nos volumes calculados como apontado por Estigoni *et al* (2009) e Estigoni *et al* (2010a)

Deste modo, a presente pesquisa buscou respostas aos questionamentos sobre a consistência dos dados produzidos por alguns métodos apontados na literatura e também quanto à comparação destes métodos, além de realizar uma contribuição

significativa à literatura sobre o tema, analisando as principais obras nacionais relacionadas estudos sedimentológicos e temas sob a ótica da batimetria e também a produção de uma linha histórica da legislação, bem como uma análise técnica da legislação vigente.

Neste trabalho foram utilizados dois estudos de caso: o reservatório da UHE Três Irmãos (SP), sob concessão da Companhia Energética de São Paulo (CESP), este que frente a situação apresentada anteriormente é o primeiro reservatório desta concessionária a realizar a revisão das curvas cota X área e cota X volume através de uma parceria com o Núcleo de Hidrometria (NH) do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA – USP) no ano de 2008; e o reservatório da UHE Chavantes (SP), sob concessão da Duke Energy International, também primeiro reservatório desta concessionária a realizar a revisão das curvas cota X área e cota X volume através de uma parceria com o NH no ano de 2011.

2. OBJETIVOS

O presente estudo teve como objetivo geral analisar a precisão do cálculo de volume de reservatórios obtidos por diferentes métodos de realização de levantamento batimétrico.

Os objetivos específicos foram:

- Elencar os métodos apresentados nas principais obras referentes ao tema;
- Aplicar os métodos selecionados no reservatório da UHE Três Irmãos (SP) através de simulação de dados batimétricos e analisar sua precisão do cálculo de volume;
- Propor um método de planejamento de seções batimétricas e estabelecer uma comparação aos métodos existentes na literatura;
- Estudar o processo de assoreamento do reservatório da UHE Chavantes (SP) utilizando o método proposto;
- Calcular o volume real do reservatório da UHE Chavantes (SP), seu assoreamento e estimativa de vida útil.

Podem também ser apresentados como objetivos secundários:

- Analisar as principais obras da literatura nacional referentes aos estudos sedimentológicos e temas afins, hidrologia e recursos hídricos;
- Realizar levantamento histórico da criação e estruturação dos órgãos nacionais competentes ao tema de hidrossedimentologia (ANA, ANEEL e CPRM);
- Realizar um histórico da legislação pertinente ao tema;
- Realizar uma análise crítica da legislação vigente.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Histórico da Hidrossedimentologia

A disciplina que estuda os sedimentos é a sedimentologia que tem como base os processos hidroclimatológicos e quando restrita aos cursos d'água e lagos recebe o nome de hidrossedimentologia (CARVALHO, 2008). Desta forma podemos destacar o importante papel que é desempenhado pelo estudo do fluxo de água no estudo dos sedimentos, remetendo assim o nascimento dos princípios da hidrossedimentologia aos princípios da hidráulica.

A hidráulica e, em geral, os primeiros avanços na área do transporte de sedimentos aparentemente se desenvolveram na China e paralelamente na Mesopotâmia e no Egito em aproximadamente 4000 a.C., seus vestígios ainda podem ser encontrados na costa oeste da Anatólia, que apresentam grandes aquedutos, túneis e cisternas. Na época do renascimento da Itália se deu uma nova fase, dos estudos de sedimentos. Por volta do ano de 1452, ano no qual nasceu Leonardo da Vinci, teve início um novo período, onde o desenvolvimento das ciências ocorreu mais rapidamente na Europa e depois na América. Leonardo da Vinci foi o primeiro homem a ensinar o conceito de modelagem hidráulica estudando e observando a movimentação dos sedimentos (SIMONS & SENTÜRK, 1992).

No Brasil não são encontrados relatos de estudos de sedimentos anteriores a 1950, sendo o primeiro trabalho efetuado no rio Camaquã – RS, com a finalidade de fazer previsão do assoreamento e cálculo do tempo de vida útil do reservatório da barragem de Paredão (CARVALHO *et al*, 2000a).

As primeiras obras brasileiras a abordar de forma direta o tema foram o “*Manual de Hidrometria – Sedimentometria*”¹ de 1965 publicado pela Companhia de Eletricidade de Minas Gerais S.A. (CEMIG) e o “*Guia prático para estabelecimento de uma curva-chave. Vida útil de reservatórios*”² de autoria de Serebrenick & Carvalho publicado em 1970 pelo extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

---

¹ CEMIG – Companhia de Eletricidade de Minas Gerais S.A. (1965), *Manual de Hidrometria-Sedimentometria*, Belo Horizonte, MG.

² SEREBRENICK, R. & CARVALHO, N. O. (1970), *Guia Prático para estabelecimento de uma curva-chave. Vida útil dos reservatórios*, DNAEE, Rio de Janeiro, RJ.

(DNAEE). Atualmente ambas as obras são raras e pouco difundidas tanto no meio acadêmico quanto nas empresas do setor.

Com a criação da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH) em 1977, as publicações sobre o assunto aumentaram, possibilitando maior discussão do tema e maior divulgação, tanto em periódicos como em anais de simpósios e congressos.

3.2. Assoreamento em Reservatórios

As represas servem à humanidade por mais de 4500 anos. Com o tempo, as funções e usos sofreram notáveis alterações havendo um avanço significativo na construção de represas para controlar o fluxo dos rios e para garantir o armazenamento da água. As mudanças tecnológicas foram paralelas à construção de represas cada vez maiores na intenção de se ganhar o controle de fontes de água cada vez maiores (STERNBERG, 2006).

Os processos e estudos sedimentológicos são complexos e dependem de diversos fatores. Eles são de grande importância, principalmente no caso de países com grande quantidade de recursos hídricos e com matriz energética predominantemente hidráulica, como é o caso do Brasil (MIRANDA, 2011)

A definição de “assoreamento” é muitas vezes confundido com “erosão” ou “sedimentação” que na verdade são processos que fazem parte do “assoreamento”, sendo este um termo mais amplo. Todos os processos correspondentes à geração, transporte e deposição de sedimento é que correspondem a definição de “assoreamento”.

Erosão hídrica é o resultado do desgaste abrasivo ou da desagregação por embate, feito pela água sobre um substrato mineral com o qual tem contato. A ação mecânica ou impactante produz partículas sólidas de diversos tamanhos e formas. O processo erosivo é precedido de intemperismos, ação de agentes desagregadores físicos, químicos e biológicos ativos, potencializados pelas condições em que se encontra o corpo em erosão, por exemplo, a posição topográfica e o tipo de cobertura vegetal que o reveste. A erosão torna-se acelerada principalmente nas vertentes mais íngremes, onde a vegetação é rala ou inexistente, com solos arenosos e quando são aplicadas técnicas agrícolas inadequadas às condições dos terrenos (EMMERICH e MARCONDES, 1975).

Todos os corpos hídricos naturais apresentam a propriedade de carrear sedimentos e o volume deste material depende da região drenada pelo curso d'água. O material transportado, partículas de rochas, solos e de matéria orgânica, caracterizam o tipo dos sedimentos do rio (BRANCO *et. al*, 1977).

A construção de uma barragem e a formação de seu reservatório implica em modificações nas condições naturais do corpo d'água a partir da redução na velocidade da corrente e, conseqüentemente, na capacidade de transporte de sedimentos pelo rio, favorecendo sua deposição nos reservatórios que, aos poucos, vão perdendo sua capacidade de armazenar água. Portanto, seja o reservatório para fins de geração de energia, de irrigação, de abastecimento ou de outros usos, o conhecimento da vida útil desse empreendimento dependerá diretamente do fluxo de sedimentos no corpo hídrico (LIMA *et. al*, 2003).

O fluxo de sedimentos que chega a um reservatório é originado na área de drenagem a montante e é transportada até o reservatório através dos cursos d'água principais e, em menor quantidade, através de fluxo superficial a partir de áreas adjacentes ao reservatório (ICOLD, 1989).

Os parâmetros da bacia hidrográfica influenciam na produção de sedimentos e características do reservatório determinam a taxa de sedimentação. Alguns dos mais importantes parâmetros são: relevo da bacia, uso da terra e cobertura vegetal; declividade e densidade da rede de drenagem; características físicas e químicas do sedimento (granulometria, composição mineral, esfericidade, etc.); quantidade e intensidade das chuvas; características hidráulicas da drenagem; tamanho e a forma do reservatório; a razão entre a capacidade do reservatório e tamanho da bacia; razão entre a capacidade do reservatório e o deflúvio afluente (DENDY³, 1968 *apud* MAIA, 2006; ICOLD, 1989).

3.3. Tipos de Depósitos de Sedimentos

Podemos classificar os depósitos do sedimento como: de remanso, de delta, de fundo e de margem. Os três primeiros casos são apresentados na Figura 1. Os depósitos de remanso se localizam próximos as entradas dos corpos hídricos nos reservatório, na região onde o corpo hídrico sofre influência do efeito do remanso gerado pelo reservatório, são encontrados sedimentos de granulometria maior e de acordo com

---

³ DENDY, F. E. (1968), Sedimentation in the Nation's Reservoirs, *Journal of Soil and Water Conservation*. v. 23. p. 135-137. jul./aug.

Miranda *et al* (2009) citando Coiado⁴ (2001), os depósitos de remanso “[...] não implicam necessariamente em perda de capacidade útil do reservatório, mas podem agravar os problemas causados pelas enchentes a montante do reservatório”.

Figura 1 – Esquema de formação de depósitos de sedimentos nos reservatórios e seus principais problemas (Adaptado de CARVALHO, 2008).

No reservatório propriamente dito, encontram-se os outros três tipos de depósitos. Os depósitos de Delta são encontrados nas desembocaduras dos rios, sendo os grãos de maior granulometria encontrados mais a montante do depósito. Este tipo de depósito causa diminuição do volume útil do reservatório e também podem prejudicar a navegação (CARVALHO *et al*, 2000a, MAIA, 2006).

Os depósitos de fundo são compostos pelos materiais mais finos que não depositam facilmente. Estendem-se para jusante dos depósitos de delta, e se acumulam nos trechos mais baixos do reservatório, e mais próximos à barragem. Este tipo de depósito pode impossibilitar a operação de comportas de órgão de adução ou de descarga (COIADO, 2001).

⁴ COIADO, E. M. (2001), *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, p. 395-426

Os depósitos da margem são formados por desbarrancamentos do talude das margens causados pelas ondas e oscilações do nível do reservatório e erosão do solo adjacente ao reservatório. Tendem a se tornar ambiente propício para o crescimento de plantas aquáticas. Essas plantas, com a elevação do nível do reservatório, são removidas e transportadas para jusante. Esse material vegetal pode se decompor, formando depósitos de fundo, alterando a qualidade da água. Outra parte pode chegar à tomada de água, prejudicando a operação caso não sejam removidas (GUIMARÃES, 2008 e CARVALHO *et al*, 2000a).

À medida que a deposição de sedimentos aumenta, a capacidade de armazenamento do reservatório diminui e a influência do remanso intensifica para montante. Assim, a velocidade do fluxo no lago aumenta e maior quantidade de sedimentos passa a escoar para jusante, diminuindo a eficiência de retenção das partículas, demonstrando que a evolução de fundo do reservatório depende fortemente da geometria do reservatório e do tamanho do sedimento depositado (CABRAL, 2005).

3.4. Considerações Gerais sobre o Assoreamento de Reservatórios

Todo reservatório, independente da sua finalidade e característica de operação, está fadado ao processo de assoreamento. Segundo CARVALHO (1994), o assoreamento gradual do reservatório, pode vir a impedir a operação do aproveitamento. No caso de usinas hidrelétricas, isso ocorre quando o sedimento depositado alcança a tomada d'água. Porém, essa retenção de sedimentos no reservatório é de certa forma benéfica, pois promove a limpeza da água para seus diversos usos, embora a sedimentação contínua possa resultar em assoreamento indesejável.

Carvalho (1994) cita ainda que o assoreamento dos reservatórios podem causar os seguintes efeitos:

- Redução do volume d'água acumulado até inviabilizar o empreendimento;
- Efeitos sobre as estruturas; aumento de pressão na barragem, corrosão dos canais de adução e fuga, pás das turbinas e obstrução do sistema de refrigeração;
- Afogamento de locais de desova, alimentação e abrigo dos peixes;

- Formação de barras (bancos de areia) alterando e dificultando as rotas de navegação;
- Dificuldade ou impedimento da entrada da água nas tomadas d'água de sistemas de captação para fins agrícolas, pecuários, de saneamento urbano, industriais, etc.;
- Alteração ou destruição da vida aquática;
- Degradação do uso consuntivo da água.

O assoreamento não apresenta problemas somente a montante do barramento, mas também a jusante. Devido à retenção de sedimentos promovida pelo represamento, as águas escoadas pelas comportas e vertedouros possuem baixa concentração de sedimentos em suspensão, apresentando um maior potencial erosivo, propiciando nas regiões imediatamente a jusante ao barramento, o acontecimento de processos erosivos no leito do rio e em suas margens (CARVALHO, 2008; COIADO, 2001).

Todas as políticas de operação de um reservatório são feitas baseadas em dados do volume do mesmo e no Brasil geralmente os dados utilizados são os de projeto (CORRÊA FILHO *et al*, 2005). Assim, o assoreamento do reservatório é responsável pela redução do volume disponível e dependendo da sua localização pode afetar a operação do mesmo, reduzindo, por exemplo, a vazão regularizada, principalmente em períodos de estiagens. Em centrais hidrelétricas, com a diminuição da capacidade de armazenamento do reservatório há perdas energéticas e, conseqüentemente, financeiras. Já em outros projetos hidráulicos, além das perdas financeiras, pode haver também problemas que afetam a saúde pública, produção agrícola e navegação (MIRANDA *et al*, 2009).

Em se tratando de reservatórios nacionais, é impossível não se falar de geração hidrelétrica, visto que no Brasil a geração de energia hidrelétrica corresponde à 71,02% do total de energia gerada (ANEEL, 2011a) e que praticamente todos os grandes reservatórios tem por finalidade a geração de energia, dentre outros usos, como abastecimento público, navegação e lazer. Deste modo, a realização de estudos hidrossedimentológicos têm grande importância para o gerenciamento e planejamento do setor energético nacional.

Além da redução de receita com a diminuição gradual da produção energética, o assoreamento também pode ocasionar problemas de manobras de operação nas estruturas hidráulicas, como a tomada d'água, válvulas de descarga, comportas, dentre outros e também pode gerar gastos com dragagem de sedimentos (ANA, 2009; MAIA & VILLELA, 2009)

A UHE Funil no rio das Contas-BA construída em 1962, teve sua operação interrompida no período de janeiro de 1992 a março de 1993, acarretando para CHESF uma perda de faturamento estimada em US\$ 1.200.000,00. Para recolocar a usina em operação foi necessário a dragagem de 32.880 m³ do reservatório e a retirada de 1.000 m³ de sedimento dos condutos forçados, ao custo aproximado de US\$ 220.000,00 (CARVALHO, 1999).

Como outros exemplos pode-se citar a UHE Mascarenhas na região do Baixo Guandu - ES que passa por constantes dragagens (CASTRO *et al*, 1999), a PCH Casca I (que se encontra atualmente desativada segundo ANEEL, 2011b), a PCH Casca II e a UHE Casca III, as três localizadas no norte do Mato Grosso, que encontram-se com sua geração comprometida em função da alta concentração de sedimentos em seus reservatórios (RIBEIRO & SALOMÃO, 2001) e também casos que o aproveitamento teve que ser interrompido como UHE Melissa em Nova Aurora - PR (KS Construtora Galvan, 2000) e o reservatório da captação de água do município de Jundiaí - SP (DAE Jundiaí, 2008).

Na esfera ambiental, o carreamento de sedimentos forma uma porção significativa da carga de nutrientes e poluentes aos reservatórios, podendo acarretar em eutrofização, carga interna de metais, e conseqüente inviabilização de outros usos do corpo d'água (i.e. recreação, abastecimento de água, navegação, etc.). Num outro ponto de vista, devido à sua capacidade de reter sedimentos, reservatórios são apontados como um dos principais sumidouros de carbono, literalmente enterrando matéria orgânica e promovendo a fixação do carbono no solo. Alguns autores destacam que o reservatórios apresentam taxas de enterro de carbono similares ou superiores aos oceanos (DEAN & GORHAN 1998; COLE *et al*, 2007; TRANVIK *et al*, 2009).

3.5. Aspectos Legais

Na história recente, podemos destacar a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Serviço Geológico do Brasil (CPRM, sigla originada do antigo nome “Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais”) como responsáveis pelo monitoramento hidrossedimentológico. A ANA tem a competência de legislar e elaborar normas sobre o tema, além de compilar as informações do monitoramento e a CPRM responsável pela operação propriamente dita da rede de monitoramento nacional.

A partir do ano de 1998, passa a contribuir neste quadro a ANEEL com a resolução da ANEEL Nº 396, de 4 de Dezembro, esta que dispunha sobre o estabelecimento de monitoramento hidrossedimentológico em empreendimentos hidrelétricos, passando ao concessionário de cada aproveitamento a responsabilidade pela realização do monitoramento junto ao empreendimento.

Tanto para a ANA quanto para a ANEEL, encontra-se na literatura referências sobre o histórico de cada agência, a ANA em trabalhos voltados aos recursos hídricos, principalmente aspectos legais, e a ANEEL em trabalhos e regulamentação do setor de energia, com destaque para trabalhos sobre a reestruturação do setor, privatização e comercialização de energia. Quanto ao histórico da CPRM não são encontradas muitas referências na literatura.

Analogamente à situação apresentada sobre o histórico dos órgãos competentes, podemos citar o caso da legislação pertinente ao tema.

Desta forma, optou-se pela elaboração de um documento que compilasse os aspectos históricos dos três órgãos nacionais competentes ao tema de hidrossedimentologia e também o histórico da legislação do tema, apresentando também realizada uma análise crítica de alguns aspectos da legislação em vigor que dispõe sobre o monitoramento hidrossedimentológico.

Neste estudo não serão abordados a fundo a questão dos órgãos e agências estaduais de águas, porém deve-se destacar que estes desempenham papel de grande importância no cenário nacional. Podemos destacar como sendo agências de grande representatividade e bem atuantes o IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas, o DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica (estado de São Paulo), ÁGUASPARANÁ – Instituto das Águas do Paraná, AGENERSA – Agência Reguladora de Energia e Saneamento Básico do Estado do Rio de Janeiro, entre outras.

Nos últimos anos também pô ser observado o crescimento de comitês de bacias hidrográficas (CBH), como o CBH – PCJ – Piracicaba, Capivari, Jundiaí e o CBH – PS – Paraíba do Sul, ambos no estado de São Paulo

3.5.1. Histórico dos Órgãos Competentes e da Legislação

Os primórdios das lei brasileiras datam antes mesmo da descoberta de nosso país, sendo a primeira legislação correspondente as Ordenações Afonsinas, promulgadas em 1446. Todas as leis então vigoradas em nosso país sejam elas de origem Portuguesa durante o período colonial e mesmo a Constituição Imperial do Brasil, promulgada em 1824 e a primeira Constituição Republicana, promulgada em 1891, foram omissas em relação à tutela ambiental.

Segundo Cachapuz⁵ (1990) *apud* Corrêa (2005), a Constituição de 1891 ratificou o quadro de descentralização existente, atribuindo aos Estados amplo domínio sobre as águas públicas, embora não houvesse uma cláusula específica dispondo sobre aproveitamentos hidrelétricos, sendo a concessão para esta prestação de serviços a cargo dos estados. Adentrando no século XX deu-se início a implementação de uma legislação específica para as atividades do setor de energia elétrica em âmbito federal. Foi nesse contexto, em 1903, que surgiu a Lei nº. 1.145, considerada o primeiro texto de lei brasileira sobre energia, dispondo sobre o aproveitamento da força hidráulica para a geração de energia.

No Código Civil de 1916 foi abordada a questão do direito de uso das águas. Mesmo que a abordagem seja superficial, esta pode ser considerada a primeira lei a realmente tratar do assunto.

Até 1920, não havia nenhum órgão especializado para tratar da gestão das águas nem da energia, sendo neste ano então criada a “Comissão de Estudos de Forças Hidráulicas”, que pertencia ao “Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil”, órgão do então “Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio”.

O ano de 1934 foi um ano muito importante para a história da legislação ambiental brasileira. Lima *et al* (2005) cita o trabalho de Almeida⁶ (2002) que aponta na

---

⁵ CACHAPUZ, P. B. B. (1990), *Panorama do setor de energia elétrica no Brasil*, Rio de Janeiro: Memória da Eletricidade,

⁶ ALMEIDA, C. C. (2002). *Evolução histórica da proteção jurídica das águas no Brasil*. Jus Navigandi, Teresina, a. 7, n. 60, nov.

Constituição Federal alguns dispositivos constitucionais ambientalistas, como o estabelecimento da competência privativa da União para legislar sobre: "os bens do domínio federal, riquezas do subsolo, [...], águas, energia hidroelétrica, [...]"; determinando como sendo de domínio da União "os lagos e quaisquer correntes em terrenos do seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países ou se estendam a território estrangeiro". Nota-se, ainda, a preocupação com a exploração econômica das águas, principalmente como fonte de energia elétrica, ao estabelecer, no artigo 119, que o aproveitamento industrial das águas e da energia hidráulica depende de autorização ou concessão federal, na forma da lei – dispositivo que reconheceu o valor econômico das águas.

Além da Constituição Federal de 1934 neste mesmo ano tem-se a publicação do Código da Águas. Correa, M. L. (2005) retrata que as primeiras conversas sobre o código se iniciaram em 1907, ensejando um importante debate sobre a função dos poderes públicos na proteção e no incentivo às atividades econômicas, que a partir de então ficava centrado nas questões relacionadas à exploração das riquezas naturais e dos recursos energéticos. Teve uma longa tramitação na Câmara dos Deputados e, depois de 1923, não foi mais incluído na pauta de debates. Em 1930 o tema voltou a ser discutido com maior veemência, sendo em 1931 formada a comissão que editou o código. E finalmente, 27 anos após as primeiras conversas, em 10 de julho de 1934 foi publicado o decreto número 24.643, que diz:

"O Chefe do Governo Provisório da República dos Estados Unidos do Brasil, usando das atribuições que lhe confere o art. 1º do decreto nº 19.398, de 11/11/1930, e:

Considerando que o uso das águas no Brasil tem-se regido até hoje por uma legislação obsoleta, em desacôrdo com as necessidades e interesse da coletividade nacional;

Considerando que se torna necessário modificar esse estado de coisas, dotando o país de uma legislação adequada que, de acôrdo com a tendência atual, permita ao poder público controlar e incentivar o aproveitamento industrial das águas;

Considerando que, em particular, a energia hidráulica exige medidas que facilitem e garantam seu aproveitamento racional;

Considerando que, com a reforma porque passaram os serviços afetos ao Ministério da Agricultura, está o Governo aparelhado, por seus órgãos competentes, a ministrar assistência técnica e material, indispensável a consecução de tais objetivos;

Resolve decretar o seguinte Código de Águas (...)"

Até os dias de hoje o Código das Águas encontra-se em vigor.

Possui uma estruturação em três livros, os quais abordam separadamente os temas “Águas em geral e sua Propriedade”, “Aproveitamento da Águas” e “Forças Hidráulicas – Regulamentação da Indústria Hidroelétrica”. Deve-se notar que a abordagem do uso da água para aproveitamento hidráulico é tratado separadamente dos demais usos, evidenciando a grande importância que era dada ao tema na época.

Das regulamentações quanto ao direito de exploração hidrelétrica, é dada exclusividade a brasileiros ou a empresas organizadas no Brasil. Também é dada prioridade ao aproveitamento hidroenergético a demais usos que por ventura possam ser instalada nos corpos hídricos ou regiões de possível alagamento para construção de barragens.

Nos estudos dos traçados de estradas de ferro e de rodagem, nos trechos em que elas se desenvolvam ao longo das margens de um curso d'água, será sempre levado em consideração o aproveitamento da energia desse curso e será adaptado, dentre os traçados possíveis, sob o ponto de vista econômico, o mais vantajoso a esse aproveitamento (BRASIL, 1934).

O Artigo 144 do Código trata da responsabilidade para estudos de avaliação de potencial hidráulico, auxílio técnico e administrativo destas atividades e da fiscalização das mesmas, sendo estas atribuições de cargo do Serviço de Águas.

Já o Artigo 178 trata especificamente da fiscalização, explicitando a responsabilidade do Serviço de Águas do Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM sob as atividades de aproveitamento da força hidráulica, com o triplice objetivo de assegurar serviços adequados, regulamentação tarifária e garantir a estabilidade financeira das empresas exploradoras, incluído fiscalização da contabilidade das empresas. A princípio o controle econômico da atividade visava assegurar prosperidade ao setor de energia que possui importância estratégica ao país, porém com o passar do tempo este “engessamento” associado as elevadas taxas de inflação da década de 80 e 90 levaram ao sucateamento do setor.

Neste primeiro momento da implementação do Código das Águas, fica a cargo do Serviço de Águas a fiscalização das atividades, porém o órgão competente sobre a regulamentação das atividades era o Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica - CNAEE, devendo o Departamento de Águas sempre se reportar ao Conselho, como explicitado no Artigo 179. Caso os estados apresentem órgãos com corpo técnico administrativo e sob permissão da União, poderão autorizar ou conceder o

aproveitamento hidráulico para geração de energia em cursos d'água sob seu domínio, desde que o aproveitamento não seja superior à 10MW.

Mesmo voltado para a priorização da energia elétrica, o Código de Águas de 34, como ficou conhecido, inicia um trabalho de mudança de conceitos relativos ao uso e a propriedade da água. No transcorrer das mudanças econômicas e sociais, que se deram no Brasil e no mundo, abriram espaço para o estabelecimento de uma Política Nacional de Gestão de Águas (SERIGNOLLI, 2009).

Estão presente no Código os princípios de valoração da água que permitiram a criação dos instrumentos de gestão que possibilitam a cobrança pelo uso da água. Nele também se encontra os princípios do instrumento de outorga:

“Art. 43 - As águas públicas não podem ser derivadas para as aplicações da agricultura, da indústria e da higiene, sem a existência de concessão administrativa, no caso de utilidade pública e, não se verificando esta, de autorização administrativa, que será dispensada, todavia, na hipótese de derivações insignificantes. (...)”

Segundo o artigo 44, a concessão para o aproveitamento de águas destinadas a serviço público deveria ser feita por meio de concorrência pública, “salvo os casos em que as leis ou regulamentos a dispensem” (LIMA *et al*, 2005).

Faz-se necessário, todavia, para perfeito entendimento da evolução do órgão fiscalizador dos serviços de energia elétrica no País, mencionar o CNAEE, criado pelo Decreto-lei nº 1.285, de 18 de maio de 1939, diretamente subordinado à Presidência da República, como órgão de consulta, orientação e controle quanto à utilização dos recursos hidráulicos e de energia elétrica, com jurisdição em todo o território nacional, e mais tarde também com atribuições executivas (ANEEL, 2011c).

Em 1960, a partir do desligamento do DNPM do “Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio” foi criado o Ministério de Minas e Energia – MME, lei nº 3.782, de 22 de Julho de 1960, A “Divisão de Águas” e o CNAEE passaram então a serem subordinados ao MME.

A Lei nº 4.904, de 17 de dezembro de 1965, dispõe sobre a organização do Ministério das Minas e Energia. A partir dela, todas as empresas subsidiárias e a própria Centrais Elétricas Brasileiras S. A. – ELETROBRÁS, criadas pela Lei 3.890-A de 25 de Abril de 1961, passam a ser de tutela do MME. Também é criado o Departamento Nacional de Energia (DNAE).

“Do Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica

Art. 10. O Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica, diretamente subordinado ao Ministro de Estado, é órgão consultivo, orientador e controlador da utilização dos recursos hidráulicos e da energia elétrica.”

“Do Departamento Nacional de Águas e Energia (D.N.A.E.)

Art. 19. O Departamento Nacional de Águas e Energia, diretamente subordinado ao Ministro de Estado, é o órgão incumbido de promover e desenvolver a produção de energia elétrica, bem como de assegurar a execução do Código de Águas e leis subsequentes.”

Segundo ANEEL (2011c) o DNAE passou a ter as mesmas competências do CNAEE, o que ocasionou durante alguns anos dificuldades que se refletiam na política energética nacional.

Em 1968 este embaraço burocrático causado pela coexistência do DNAE e do CNAEE começou a ser resolvido com o Decreto-Lei nº 63.951, de 31 de dezembro, que aprova a estrutura básica do MME, revogando a Lei nº 4.904, de 17 de dezembro de 1965. Nele o Departamento Nacional de Águas e Energia - DNAE é substituído pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE. Este passa a incorporar as atribuições do Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica. Passam a ser de competência do DNAEE e da ELETROBRÁS:

"Deverá ser iniciado o processo de absorção, pelos Departamentos a seguir indicados, das atribuições ora afetas aos órgãos adiante mencionados:

a) Pelo DNAE, que passa a se denominar DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DNAEE, as atribuições do Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica, no prazo de 60 dias.”

“Art. 13. O Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica é o órgão orientador e controlador da política de utilização dos recursos hídricos e da energia elétrica, cabendo-lhe:

I - Supervisionar e estimular o uso correto da água e da eletricidade;

II - Fomentar as pesquisas hídricas e elétricas, no campo científico e tecnológico;

III - Assegurar a execução do Código de Águas e legislação subsequente;

IV - Supervisionar a aplicação do Imposto Único sobre energia elétrica.”

“Art. 18. A Centrais Elétricas Brasileiras S.A. - Eletrobrás, sociedade de economia mista, tem por objeto, diretamente ou através de subsidiárias ou associadas:

I - A realização de estudos, projetos, construção e operação de usinas, produtos e linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica;

II - A celebração dos atos de comércio decorrentes dessas atividades.”

O Decreto-Lei nº 689, de 18 de Julho de 1969 extingue o Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica, do Ministério das Minas e Energia, passando o DNAEE a ser o único órgão competente da União a legislar, fiscalizar e dispor sobre as águas e energia no país. Segundo ANEEL (2011c) foi neste momento que foram resolvidos os entraves burocráticos existentes.

O regimento interno do DNAEE é estabelecido pela Portaria nº 234, de 17 de fevereiro de 1977, que o declara como órgão supremo e único da União nos assuntos relacionados à de recursos hídricos e energia elétrica, bom como sendo responsável por toda a fiscalização e gerenciamento de todas as atividades dos setores citados. Estas atribuições são explicitadas em seu artigo primeiro, que diz:

"Art.1º - O Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, instituído pela Lei nº 4.904, de 17 de dezembro de 1965, com autonomia financeira assegurada pelo art. 18 do Decreto nº 75.468 de 11 de março de 1975, é o Órgão Central de Direção Superior responsável pelo planejamento, coordenação e execução dos estudos hidrológicos em todo o território nacional; pela supervisão, fiscalização e controle dos aproveitamentos das águas que alteram o seu regime; bem como pela supervisão, fiscalização e controle dos serviços de eletricidade."

O DNAEE era não só o órgão responsável pelo setor de energia elétrica como, também, pela gestão dos recursos hídricos federais quanto aos seus aspectos quantitativos, cabendo ao Ministério de Meio Ambiente a responsabilidade pelos aspectos qualitativos do uso da água (GAVIÃO *et al*, 2003).

Outro ponto de destaque é a centralização de outorgas para exploração de empreendimentos hidrelétricos no DNAEE, mesmo quando em águas estaduais, evidenciando a grande preocupação do país quanto ao setor hidrelétrico.

Juntamente com a criação do DNAEE temos o Decreto – Lei nº 764, de 15 de agosto de 1969 que cria a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM,

vinculada ao MME. Como definido no artigo quarto do presente Decreto – Lei , a CPRM tem como objetivos:

“I - Estimular o descobrimento e intensificar o aproveitamento dos recursos minerais e hídricos do Brasil.

II - Orientar, incentivar e cooperar com a iniciativa privada na pesquisa e em estudos destinados ao aproveitamento dos recursos minerais e hídricos.

III - Suplementar a iniciativa privada, em ação estritamente limitada ao campo da pesquisa dos recursos minerais e hídricos;

IV - Dar apoio administrativo e técnico aos órgãos da administração direta do Ministério das Minas e Energia.”

A CPRM passa então a ser o braço operacional do DNAEE responsável pela realização das atividades de estudos e pesquisas hídricas e energéticas. Sendo o órgão responsável pela operação e manutenção da rede hidrometeorológica nacional. Para efeitos de custeio de suas atividades é concedida e incentivada à CPRM a cooperação com entidades governamentais e privadas para cumprimento de seus objetivos, podendo fazer ajuste e contratos de prestação de serviços mediante remuneração ou ressarcimento de despesas.

Em se tratando da gestão das águas, temos o surgimento/aumento dos conglomerados urbanos, crescimento industrial e da agricultura e pecuária. Todos estes grandes consumidores e poluidores em potencial. De modo que os conflitos pelo uso passam a aumentar e a gestão das águas passou a se tornar cada vez mais complexa.

No setor hidrelétrico, desde a década de 50 temos grandes investimentos e o surgimento de várias grandes usinas hidrelétricas. Alguns exemplos são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1– Exemplos de grandes UHEs que foram construídas nos anos 50, 60 e 70.

UHE	Potencia Instalada [MW]	Área alagada [km ²]	Ano de início das Obras
Jurumirim ¹	98	449	1958
Furnas ²	1.216	1.440	1958
Chavantes ¹	414	400	1959
Ilha Solteira ³	3.444	1.195	1968
Itumbiara ²	2.082	778	1974
Tucuruí ⁴	8.370	2.850	1975
Itaipu ⁵	14.000	1.350	1975

¹ Fonte: <http://www.duke-energy.com.br> Acesso 03/06/2011

² Fonte: <http://www.furnas.com.br> Acesso 03/06/2011

³ Fonte: <http://www.cesp.com.br> Acesso 03/06/2011

⁴ Fonte: <http://www.eln.gov.br> Acesso 03/06/2011

⁵ Fonte: <http://www.itaipu.gov.br> Acesso 03/06/2011

Neste período, o setor hidrelétrico é majoritariamente de empresas estatais, investimentos privados eram somente previstos para autoprodutores e investimentos em PCHs. Sendo que entraves jurídicos, burocráticos e outros fatores, passaram a causar o sucateamento do setor de geração.

A década de 1980 e o início dos anos 90 são marcados pela conclusão de grandes obras e também por crises financeiras do setor hidrelétrico, reflexo dos grandes investimentos públicos realizados nas décadas anteriores. De um lado, o preço da energia os reajustes das tarifas eram regulados rigorosamente pelo DNAEE, de outro o próprio DNAEE fiscalizava a saúde financeira das empresas concessionárias, e investiam grandes montantes financeiros originários de impostos no setor.

Prefeito *et al* (2005) afirma que a Constituição Federal de 1988 agravou o processo de crise do setor de energia, uma vez que, ao invés de procurar resolver as questões nacionais, transferiu os recursos tributários que competiam à União para os Estados e Municípios, sem a correspondente transferência da prestação de serviços. Acabando com os impostos da União que alimentavam os investimentos em infraestrutura de energia, sendo o ICMS, Imposto Circulação de Mercadorias e Serviços, transferido para o âmbito estadual, o que representou um duro golpe na fonte de recursos do setor elétrico.

Em 1989, a Lei 7.990 de 28 de Dezembro institui a compensação financeira para Estados, Distrito Federal e Municípios de atividades de exploração de recursos

hídricos para fins de geração de energia elétrica, entre outras providencias. Esta compensação era de 6% do faturamento calculado. Sendo esta mais uma ação que agravou a crise do setor elétrico.

A crise iniciada nos anos 80 caminhou até meados dos anos 90, culminando em diversas alterações legais para que o setor energético pudesse passar por um processo de privatização.

De 1977 até 1997 não foi feita nenhuma alteração profunda relacionada a política das águas, porém diversas leis correlatas foram criadas nestes período.

O ano de 1981 é de grande importância em âmbito geral. Em 31 de Agosto foi publicada a Política Nacional do Meio Ambiente – PNMA (Lei nº 6.938). Nela estão definidas a constituição do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e criação do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Estruturalmente falando a PNMA serviu de modelo para a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH).

Em 15 de março de 1985 foi criado o Ministério do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente, através do decreto nº 91.145, sendo transferidos para o MDU, o CONAMA e a Secretaria Especial do Meio Ambiente – SEMA. A lei nº 7.735 de 22/02/1989 extinguiu a SEMA entre outras providencias, criando o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, passando em 1992 a ser parte do então criado Ministério do Meio Ambiente – MMA, através da lei nº 8.490 de 19 de novembro.

A crise instaurada no setor elétrico não se ateve somente às concessionárias e empresas de energia, sendo ela estendida também à seu órgão competente, o DNAEE. Ele não foi capaz de contornar a crise e assegurar o crescimento do setor. Isto, associado ao crescimento da corrente ambientalista no âmbito legal, associado à uma época transitória de modelos de governo e a crise econômica em meados de 80 e 90, tornava iminente a mudança estrutural de todo o setor, sendo optado pelo desmembramento do DNAEE em um órgão responsável pela energia e outro pelas águas. Desta forma temos acontecendo concomitantemente o processo de privatização do setor elétrico e sucateamento, seguido da extinção do DNAEE.

Por questões estratégicas, a criação de um órgão competente relacionado a energia se deu prioritariamente à criação de um órgão ligado às águas. Em 26 de Dezembro de 1996 foi publicada a Lei 9.427 que constituiu a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, e em 6 de outubro de 1997 com o Decreto 2.2335 que

aprovou seu regimento interno, ficando então extinto o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE.

Em 4 de Dezembro de 1998, a Resolução 396 da ANEEL, ainda como herança do DNAEE, estabelece as condições para implantação, manutenção e operação de estações fluviométricas e pluviométricas associadas a empreendimentos hidrelétricos. Porém a ANEEL não mais possui em suas atribuições o monitoramento hidrológico, ou mesmo corpo técnico direcionado para tal atividade. Sendo esse fato, associado a ausência de uma cláusula prevendo penalidade pelo descumprimento desta resolução, responsáveis pela não realização de monitoramento hidrológico por parte das empresas concessionárias. Ficando a operação do parque energético nacional totalmente no escuro.

Associando um período de anos hidrológicos secos consecutivos no final dos anos 90, à ausência de investimento no setor elétrico durante o processo de privatização e a não realização de investimentos das novas concessionárias do setor também, adicionado ao fato de ainda não ter sido instaurado órgão nacional competente sobre assuntos hidrológicos (criação da ANA somente em 2000). Houve em 2001 uma crise energética no país, popularmente conhecida como “Apagão”.

Voltando ao ano de 1997, através da Lei 9.433 de 8 de janeiro, temos a criação da Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH e a criação o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH, mas ainda foram necessários mais três anos para que se criasse o órgão responsável pelas águas. Em 17 de Julho de 2000, com a Lei 9.984 foi criada a Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da PNRH e de coordenação do SINGREH.

Neste momento é sacramentada a separação da gestão das águas da gestão da energia. Como citado anteriormente, esta separação deu a liberdade para a ANA escolher suas prioridades, permitindo a evolução no aspecto de gerenciamento dos recursos hídricos e assuntos não relacionados a geração de energia.

De forma análoga a ANEEL também pôde se dedicar a demais atividades. Em 2000 através da Lei 9.991 de 24 de julho cria uma política de investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento por parte das empresas de energia, posteriormente regulamentada pelo Decreto 3.867 de 16 de Julho de 2001. Em 2001 com a Lei 10.295 de 17 de Outubro cria uma Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, no ano seguinte em 26 de Abril publica a Lei 10.438 criando o Programa de Incentivo às Fontes Renováveis de Energia, além de apoiar a diversificação da matriz

energética nacional com a Conta de Desenvolvimento Energético – CDE visando assegurar competitividade da energia produzida por fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas, biomassa, gás natural e carvão mineral nacional, nas áreas atendidas pelos sistemas interligados.

Porém, em um país com a abundância de recursos hídricos e topografia favorável, a desvinculação da geração de energia da matriz hidráulica que representa 71,02% da matriz energética (ANEEL, 2011a), que é uma fonte limpa e renovável, é extremamente complicada, e até mesmo pode ser considerada impossível de se concretizar a total separação. Isto se evidencia nas próprias atribuições de ambas as agências, as quais em seus regimentos prevêm que o processo de outorga para uso de potencial de energia hidráulica em corpo hídrico deverá ser requerido pela empresa interessada à ANEEL, e esta por sua vez obter junto a ANA (ou órgão estadual competente) declaração de reserva de disponibilidade hídrica.

Após a crise de 2001, a comunicação entre os setores de energia e de águas têm melhorado muito, o que é evidenciado pelo grande crescimento do setor de energia. Porém, a operação dos reservatórios e a implementação de novos empreendimentos hidrelétricos ainda carecem de maior embasamento hidrológico. Por outro lado a ANA não apresenta recursos financeiros e nem corpo técnico capaz de realizar monitoramento hidrológico em todos os corpos d'água que apresentem, ou que possivelmente possam ser instalados, empreendimentos hidrelétricos.

Desta forma, em um esforço conjunto de ambas as agências foi publicada em 10 de Agosto de 2010 a Resolução Conjunta Nº 003 ANEEL – ANA, dispondo sobre a realização de monitoramento hidrossedimentológico em empreendimentos hidrelétricos. É previsto que as concessionárias de energia sejam responsáveis pela realização do monitoramento, criando um enorme investimento majoritariamente privado no levantamento de dados hidrológicos. Estes dados são então encaminhados a ANA que fiscaliza a atividade, passando estes dados a fazerem parte de seu banco de dados, possibilitando a melhoria no processo de gerenciamento dos recursos hídricos. Diferente da resolução Nº 396 da ANEEL, o descumprimento da resolução é punido com multas aplicadas pela ANEEL. Maiores detalhes desta resolução serão tratados em tópico separado devido sua importância para o tema de assoreamento de reservatórios.

3.6. Órgãos competentes em exercício

Como já exposto ao longo da história da legislação pertinente e na história dos órgãos competentes, hoje encontram-se em exercício de funções correlatas ao tema de monitoramento hidrossedimentológico em reservatórios três órgãos federais: a ANA, a CPRM e a ANEEL.

3.6.1. Estruturação e atribuições da ANA

A Agência Nacional de Águas - ANA, autarquia sob regime especial, com autonomia administrativa e financeira, vinculada ao Ministério do Meio Ambiente. Possui Diretoria Colegiada composta por cinco membros nomeados pelo Presidente da República, com mandatos não coincidentes de quatro anos, podendo esta ser reeleita somente uma única vez.

O artigo vigésimo da Lei 9.984 de 2000 dispõe sobre o patrimônio e a receita da agência. Como origem da receita temos recursos oriundos do Orçamento-Geral da União, créditos especiais, créditos adicionais, recursos decorrentes da cobrança pelo uso de água de corpos hídricos de domínio da União, recursos provenientes de convênios, acordos ou contratos, multas aplicadas em decorrência de ações de fiscalização e de produtos da alienação de bens, objetos e instrumentos utilizados na prática de infrações.

Complementando a origem de receita, seu artigo vigésimo oitavo altera a redação do artigo décimo sétimo da Lei 9.648 de 1998, que passa a vigorar com o seguinte texto:

"Art. 17. A compensação financeira pela utilização de recursos hídricos de que trata a Lei no 7.990, de 28 de dezembro de 1989, será de seis inteiros e setenta e cinco centésimos por cento sobre o valor da energia elétrica produzida, a ser paga por titular de concessão ou autorização para exploração de potencial hidráulico aos Estados, ao Distrito Federal e aos Municípios em cujos territórios se localizarem instalações destinadas à produção de energia elétrica, ou que tenham áreas invadidas por águas dos respectivos reservatórios, e a órgãos da administração direta da União."

Essa distribuição dos 6,75% do valor da energia elétrica produzida oriunda de fonte hidrelétrica, considerando a redação do vigésimo oitavo altera a redação do artigo

décimo sétimo da Lei 9.648 de 1998, e do artigo vigésimo nono que altera a redação do art. 1º da Lei no 8.001, de 13 de março de 1990, é distribuída da seguinte forma:

- 0,75 % destinado ao MMA para aplicação na implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e na gestão da rede hidrometeorológica nacional, ou seja, destinados a ANA;
- 2,70% destinado aos Estados;
- 2,70% destinado aos Municípios;
- 0,264% destinado ao MMA para usos gerais;
- 0,216% destinado ao MME;
- 0,12% destinado ao Ministério de Ciência e Tecnologia.

Desta forma temos a vinculação financeira do setor elétrico ao setor de águas. Esta vinculação também se dá na forma das atribuições e competências da ANA.

O objetivo maior da agência é a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. Sendo de sua competência a articulação dos planejamentos nacional, regionais, estaduais e dos setores usuários elaborados pelas entidades que integram o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos.

Dentre suas competências temos a supervisão, controle e avaliação de atividades pertinentes à recursos hídricos, legislar sobre o tema, outorgar e fiscalizar as atividades nos corpos de água de domínio da União, fornecer suporte técnico para elaboração da cobrança pelo uso da água, estimular a estruturação de Comitês de Bacia Hidrográfica, arrecadar, distribuir e aplicar receitas anteriormente citadas, estimular a pesquisa e a capacitação de recursos humanos para a gestão de recursos hídricos.

É também atribuído a ANA:

“XII – definir e fiscalizar as condições de operação de reservatórios por agentes públicos e privados, visando a garantir o uso múltiplo dos recursos hídricos, conforme estabelecido nos planos de recursos hídricos das respectivas bacias hidrográficas;

(...)

§ 3º Para os fins do disposto no inciso XII deste artigo, a definição das condições de operação de reservatórios de aproveitamentos hidrelétricos será efetuada em articulação com o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.”

“XX - organizar, implantar e gerir o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB); (Incluído pela Lei nº 12.334, de 2010)

XXI - promover a articulação entre os órgãos fiscalizadores de barragens; (Incluído pela Lei nº 12.334, de 2010)

XXII - coordenar a elaboração do Relatório de Segurança de Barragens e encaminhá-lo, anualmente, ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), de forma consolidada. (Incluído pela Lei nº 12.334, de 2010)”

Em ambas as citações, Inciso XII e Incisos XX, XXI e XXII do artigo quarto da Lei 9.984 de 17 de Julho de 2000, é mostrada a interligação entre as atividades da ANA e da ANEEL. No primeiro caso temos a ANA sendo responsável por fornecer subsídios e ditar as condições de operação de reservatório de geração de energia hidrelétrica, e no segundo caso a implementação de ferramentas que fiscalizem e assegurem as estruturas de barragens utilizadas para geração de energia, bem como demais finalidades.

Também compete a ANA a emissão de outorgas de direito de uso de recursos hídricos para concessionárias e autorizadas de serviços públicos e de geração de energia hidrelétrica. Para uma empresa licitar a concessão ou autorização do uso de potencial de energia hidráulica em corpo de água de domínio da União, esta deve requerer a licença junto a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, esta, por sua vez, promoverá junto à ANA a obtenção de declaração de reserva de disponibilidade hídrica. Sendo necessário/obrigatório a regulamentação da ANA no processo de licenciamento de atividades geração hidrelétrica.

3.6.2. Estruturação e atribuições da CPRM

Atualmente denominada Serviço Geológico do Brasil, a CPRM mantém a sigla de seu antigo nome Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Foi criada em 1969 pelo Decreto-Lei 764 e era vinculada ao Ministério de Minas e Energia, com a missão estratégica de organizar e sistematizar o conhecimento geológico do território brasileiro. Executava os programas do Departamento Nacional de Produção Mineral, DNPM, do Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica, DNAEE e ainda vendia no mercado, serviços de sondagens para água e pesquisa mineral (CPRM, 2008a).

A partir da segunda metade dos anos 80, levaram a mudanças institucionais profundas na vida da CPRM. Em 1994 a Lei 8.970 de 27 de dezembro, altera o regime jurídico vigente para empresa pública.

Novas atribuições são dadas a este órgão, mas no que tange o aproveitamento de recursos hídricos para geração de energia, estas se mantêm praticamente inalteradas. São mantidas as competências de estímulo do descobrimento e aproveitamento de recursos minerais e hídricos, orientação e incentivo a realização de pesquisas e estudos destinados ao aproveitamento dos recursos minerais e hídricos, elaboração de sistemas de informações, cartas e mapas que traduzam o conhecimento, porém é dada ênfase em se disponibilizar o conhecimento à interessados, e dar apoio técnico e científico aos órgãos da administração pública federal, estadual e Municipal.

Das novas atribuições temos:

“IV - elaborar sistemas de informações, cartas e mapas que traduzam o conhecimento geológico e hidrológico nacional, tornando-o acessível aos interessados;

V - colaborar em projetos de preservação do meio ambiente, em ação complementar à dos órgãos competentes da administração pública federal, estadual e municipal;

VI - realizar pesquisas e estudos relacionados com os fenômenos naturais ligados à terra, tais como terremotos, deslizamentos, enchentes, secas, desertificação e outros, bem como os relacionados à paleontologia e geologia marinha;”

É de sua competência a implantação e operação de redes hidrometeorológicas, telemétricas, de qualidade de água e sedimentométricas bem como monitoramento de níveis em açudes. Atualmente opera a rede hidrometeorológica nacional constituída de cerca de 2.500 estações, sendo 200 telemétricas via satélite. Além de coletar, a CPRM consiste e armazena cerca de 240.000 dados hidrológicos anuais. A análise de consistência é realizada de acordo com as Diretrizes para Tratamento de Dados Hidrométricos, elaborada em parceria com a Agência Nacional de Águas e o armazenamento é efetuado através do Banco de Dados HIDRO – ANEEL/ANA (CPRM, 2008b).

3.6.3. Estruturação e atribuições da ANEEL

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, criada pela Lei 9.427 de 26 de Dezembro de 1996, é uma autarquia sob regime especial, vinculada ao Ministério de Minas e Energia. Tem por finalidade regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal.

Com sua criação foram transferidas as atribuições do DNAEE referentes a energia para a agência. Da Lei 8.987 de 13 de fevereiro de 1995 que regulamenta a prestação de serviços públicos, adquire as atribuições de intervir na prestação do serviço quando necessário, bem como aplicar penalidades às concessionárias, homologar e revisar as tarifas pertinentes e zelar pela boa qualidade do serviço, sempre estimulando o aumento da qualidade, produtividade, preservação do meio-ambiente e conservação, bem como a competitividade.

Em aditivo é também de competência da ANEEL “implementar as políticas e diretrizes do governo federal para a exploração da energia elétrica e o aproveitamento dos potenciais hidráulicos (...)”, promover e gerir os contratos de prestação de serviços de produção, transmissão e distribuição, bem como outorga de concessão para aproveitamento de potenciais hidráulicos, além de definir e regulamentar todos os aspectos tarifários, permissionários e comerciais envolvendo produção, transmissão e distribuição de energia.

Deve-se atentar que é de competência da ANEEL a gestão da produção elétrica incluindo potenciais hidráulicos, porém não é de sua competência a realização de estudos hidrológicos. Desta forma, o gerenciamento de potenciais hidráulicos, só pode ser feito de forma eficiente através de diálogo aberto entre ANEEL e ANA

Possui estrutura de diretoria análoga a ANA, com Diretor-Geral e os demais Diretores nomeados pelo Presidente da República, cumprindo mandatos não coincidentes de quatro anos.

A receita da ANEEL, como disposto no artigo décimo primeiro da Lei 9.427 de 1996, é oriunda de cobrança da taxa de fiscalização sobre serviços de energia elétrica, recursos ordinários do Tesouro Nacional consignados no Orçamento Fiscal da União, recursos provenientes de convênios, acordos ou contratos celebrados com entidades, organismos ou empresas, públicos ou privados. Do total dos recursos arrecadados cinquenta por cento, no mínimo, serão destinados para aplicação em

investimentos no Setor Elétrico das Regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, dos quais metade em programas de eletrificação rural, conservação e uso racional de energia e atendimento de comunidades de baixa renda.

3.7. Legislação pertinente ao monitoramento

hidrossedimentológico

Dentre os órgãos hoje atuantes no tema, as agências possuem a competência de legislar. Em um contexto de produção energética nacional majoritariamente de origem hidráulica, mediante a iminente crise do setor energético do fim da década de 90, foi a ANEEL a primeira a publicar uma resolução sobre o tema.

Para melhor entendimento da Resolução ANEEL N° 396 publicada em Dezembro de 1998, deve-se entender o cenário que pairava sobre o setor energético nacional. A década de 90 foi marcada por mudanças significativas no setor energético e setores afins. Podemos destacar:

- Crise do setor energético;
- Diminuição dos investimentos públicos;
- Sucateamento das grandes estatais;
- Empresas privadas recém inseridas no mercado nacional de energia realizando poucos investimentos e buscando rápido retorno financeiro de seus grandes aquisições;
- Reestruturação dos órgãos competentes, com extinção do DNAEE e criação da ANEEL (1996) e ANA (2000), além da reestruturação da CPRM (1995).

Segundo a estrutura já apresentada, a implantação e manutenção de uma rede de monitoramento hidrometeorológica e sedimentológica nacional é de responsabilidade da CPRM. Em aspectos práticos, esta tarefa contava com grande apoio por parte das estatais do setor, as quais mantinham equipes compostas por Hidrólogos e técnicos hidrometristas, sendo grande parte das estações fluviométricas, sedimentométricas e pluviométricas operadas pelas próprias estatais.

A crise do setor forçou a redução do quadro de funcionários das empresas e congelou as contratações de novo pessoal por parte das estatais. Por parte das empresas

privadas recém ingressantes no setor, de maneira geral se tem o corte de custos operacionais das usinas (uma das medidas foi o corte de funcionários), de modo a agilizar o processo de retorno do investimento realizado das aquisições.

Como a crise também se espalhou para o DNAEE, este diminui drasticamente a oferta de cursos de capacitação em técnicas hidrométricas, os quais eram muito fortes na década de 80, com parcerias com instituições de ensino consagradas e centros de referência no assunto como o Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada da Escola da Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (CRHEA – USP), CPRM sede Manaus, Divisão de Controle de Recursos Hídricos do DNAEE em Brasília, entre outras.

Desta forma, temos evidenciada grande retração das atividades de monitoramento hidrossedimentológico dos empreendimentos hidrelétricos. Sem o conhecimento dos parâmetros hidrológicos a operação as usinas hidrelétricas passa a ser realizado “às escuras”. Tal fato, associado a um período de pouco investimento na expansão do parque de geração e também a anos hidrológicos com pluviosidade abaixo da média, culminaram na crise de energia de 2001, popularmente conhecida como “apagão”.

3.7.1. Resolução ANEEL Nº 396, de 4 de Dezembro de 1998

Antevendo a iminente crise, a ANEEL tenta no ano de 1998 através da Resolução nº 396 intervir no único fator possível, a realização de monitoramento hidrológico para que a operação dos reservatórios fosse feita da melhor forma possível. Sendo este monitoramento de responsabilidade das concessionárias, sendo todo o investimento e custos associados de responsabilidade das mesmas.

“Art. 1º Estabelecer que, em todos os aproveitamentos hidrelétricos, os Concessionários e os Autorizados ficam obrigados a instalar, manter e operar estações fluviométricas e pluviométricas na região do empreendimento, nas condições previstas nesta Resolução.”

Para a instalação dos postos de monitoramento fluviométrico e pluviométrico, são estabelecidas normas que definem a quantidade de postos a serem instalados unicamente em função da área de drenagem incremental do empreendimento, porém nada é falado sobre a localização dos mesmos.

Também é exposta a obrigatoriedade de se manter a Curva-Chave das estações, bem como a curva Cota x Área x Volume (curva CAV) do reservatório, atualizadas.

3.7.2. Resolução Conjunta Nº 003, de 10 de Agosto de 2010 – ANEEL – ANA

Em um país como o Brasil com matriz energética majoritariamente hidráulica é de grande importância que os órgãos competentes do setor de energia e do setor de águas mantenham boa relação e comunicação. O estreitamento da relação entre ANEEL e ANA se dá com esta resolução, em que ambas as agências se beneficiam.

De um lado a ANEEL, que tem a necessidade de dados consubstanciados sobre os regimes de operação dos reservatórios de aproveitamento hidrelétricos, para subsidiarem a tomada de decisão quanto às atividades de fiscalização, regulação e operação do setor elétrico, além da importância da qualidade e disponibilidade de dados para definição do aproveitamento ótimo do potencial hidráulico, bem como para operação do parque hidrelétrico do Sistema Interligado Nacional, ganha um importante suporte técnico.

De outro lado a ANA que é responsável pela implementação e gestão do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos recebe grandes investimentos financeiros e de mão de obra de origem majoritariamente privada para implementação e operação de estações hidrometeorológicas e sedimentológicas que irão compor a rede de monitoramento nacional, possibilitando assim que seus recursos possam ser destinados a outras finalidades.

A Resolução Conjunta nº 003 ANEEL – ANA revoga as disposições da resolução ANEEL nº 396. Diferente da resolução anterior, nesta resolução o monitoramento previsto engloba fluviometria, pluviometria, sedimentometria e qualidade de água, como disposto no artigo primeiro da resolução:

“Art. 1º 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, linimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos, e dar outras providências.”

O método para determinação do número de estações de monitoramento é análogo ao previsto na resolução anterior, sendo este em função da área de drenagem incremental de cada aproveitamento, a exceção se dá quanto ao monitoramento de qualidade de água, o qual é função da área do espelho d'água do reservatório.

O monitoramento linimétrico deverá ser realizado junto ao barramento,

O parágrafo 10 dispõe sobre o monitoramento sedimentométrico, em casos a instalação de 2 ou mais postos de monitoramento sedimentométrico deverá ser realizado preferencialmente a montante e a jusante do aproveitamento, com vistas à determinação das descargas sólidas totais afluentes e defluentes do aproveitamento.

Em aproveitamentos com área inundada superior a 3 km², o monitoramento da qualidade da água deverá ser realizado em um local do reservatório, considerando os parâmetros Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Fósforo Total, Nitrogênio Total, Clorofila A, Transparência, pH e Temperatura.

Excetuando o posto de monitoramento linimétrico, e os postos de jusante do barramento, a escolha dos locais de monitoramento não possui um método definido, ficando a cargo da concessionária de energia definir um local e então submeter para previa aprovação da ANA.

São também definidos intervalos entre medições, quatro medições anuais, e como deve ser feito o envio de dados para ANA, envio por telemetria em tempo real, com um relatório anual de consistência de dados.

A revisão das curvas operacionais do reservatório, curvas CAV, deverá ser feita através de levantamentos batimétricos a cada 10 anos. Não são definidos métodos de realização destes estudos, sendo disposto nos parágrafos primeiro e segundo do inciso II do artigo oitavo:

“§ 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.”

Notadamente, nesta resolução estão previstas exceções as regras expostas na tabela 4 e quanto ao intervalo entre revisões das curvas CAV, de modo que caso seja requerido pela ANA, desde que sob fundamentação, pode ser requerida a instalação de

número superior ao previsto, como citado no parágrafo 11 sobre aproveitamentos com área de drenagem incremental de 0 a 500 km², parágrafo 13 e 14 sobre qualidade de água, bem como que a revisão das curvas operacionais em intervalo de tempo inferior a 10 anos.

Nesta resolução estão previstas penalidades às concessionárias que descumprirem as normas, ficando facultada a ANA comunicar a ANEEL no caso de irregularidades. Do Artigo 12. “O descumprimento de quaisquer obrigações fixadas nesta Resolução sujeitará os concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica às penalidades previstas na Resolução Normativa ANEEL nº 63, de 12 de maio de 2004, e nos artigos 15 e 50 da Lei nº 9.433, de 1997.

3.7.3. Análise da Resolução ANEEL N°396 e ANEEL – ANA N°003

A iniciativa tomada por parte das agências, ANEEL e ANA, é louvável. Em um país com tamanha participação da energia hidráulica na matriz energética a ausência de diálogo entre os setores de energia e de águas seria inconcebível.

O momento em que foi realizada esta parceria também é providencial. Em um cenário que temos para os próximos anos a previsão de franco crescimento econômico, alavancado por dois dos maiores eventos esportivos mundiais, a Copa do Mundo de Futebol e as Olimpíadas. De modo que não deve haver brechas na gestão energética nacional, assegurando o desempenho do país neste importante momento.

Anterior a qualquer análise técnica quanto as disposições da resolução nº 396 de 1998, um aspecto de grande importância na redação da mesma deve ser observado. Em nenhum momento é relatado o tema de penalidades quanto ao descumprimento das normas. Este foi um fator determinante para a não adesão do cumprimento do exposto por parte das concessionárias.

Outro ponto bem importante que não é abordado nesta resolução é a realização de monitoramento sedimentológico. A única referência feita ao tema se encontra no artigo segundo ao expor que as curvas CAV dos reservatórios devem ser mantidas atualizadas, mas em nenhum momento é abordado como devem ser feitas estas atualizações nem mesmo a frequência que elas devem ser atualizadas. O monitoramento de descargas sólidas afluentes e efluentes ao reservatório também não são abordadas na resolução.

A experiência adquirida com a Resolução ANEEL N° 396 é refletida no evidente amadurecimento da redação do texto que hoje vigora, passando a sanar grande parte dos casos omissos, como por exemplo, a periodicidade de atualização das curvas operacionais dos reservatórios e as penalidades às concessionárias em caso de descumprimento da legislação. Porém, como todo e qualquer trabalho, é sujeito a críticas.

A Resolução Conjunta N° 003 de 2010 também prevê o monitoramento da qualidade das águas e o monitoramento sedimentométrico, itens acrescidos pela regulamentação atual, proporciona a diversidade de dados que permite que seja feita a análise integrada dos recursos hídricos. Melhorando, assim a gestão das águas.

Quanto a determinação da quantidade de estações de monitoramento fluviométrico e sedimentométrico, esta é condicionada unicamente a área de drenagem incremental do aproveitamento, e como exemplificado, este método pode não ser satisfatório ao monitoramento de significativo de cargas e vazões afluentes e efluentes ao reservatório. Devem ser levados em conta fatores como: densidade de drenagem, geomorfologia do terreno da bacia de drenagem incremental e as áreas das sub-bacias. Estes parâmetros podem apontar qual o percentual de contribuição de cada corpo hídrico afluente ao aproveitamento, de modo que a quantidade e localização dos postos de monitoramento sejam definidos a partir desta análise.

A definição dos parâmetros de qualidade de água medida não corresponde aos comumente medidos no país. Sendo sugerido a alteração destes parâmetros de modo a se enquadrarem ao IQA, que é o índice mais utilizado em território nacional. A quantidade prevista de amostras ao longo do reservatório, uma amostra expansível a no máximo três, só será representativa nos casos de reservatórios muito pequenos. Mais estudos para a definição da quantidade de pontos de monitoramento e dos locais de amostragem de qualidade de água nos reservatórios devem ser feitos.

É frisada a importância do monitoramento sedimentométrico na definição dos intervalos entre as atualizações das CAV dos reservatórios, onde é estabelecida a realização destes estudos a cada 10 anos. Não sendo em nenhum momento relatado um método a ser seguido para a execução destes estudos.

A resolução não define os métodos a serem empregados, tanto para a definição dos postos de monitoramento quanto para o levantamento batimétrico. Sendo para ambos os casos estabelecido que estes sejam definidos pelas concessionárias de energia e então submetidos para prévia aprovação da ANA.

Segundo Estigoni *et al* (2011) a prévia análise de processos como está estabelecido em lei acarreta em trabalho demasiado por parte da ANA. O Brasil possui 908 empreendimentos hidrelétricos, entre CGHs, PCHs e UHEs, em 2001 esse número era de 436, já em 2002 passou a ser de 485 (ANEEL, 2011a). Em uma estimativa conservadora de que ao menos 25% destes empreendimentos hidrelétricos em operação em 2002 tenham realizado a revisão de suas curvas operacionais nos últimos 10 anos, temos 364 empreendimentos que deverão ser regularizados até 2012.

Ainda segundo os mesmos autores, administrativamente falando, estes números se traduzem em 364 processos de análise iniciados na ANA. Considerando as concessionárias de energia deverão atender as exigências desta resolução até a data de 10 de Agosto de 2012, e que estudos batimétricos em reservatórios geralmente demandam grande mão de obra e tempo de trabalho em campo e escritório, podemos considerar que a aprovação dos mesmos deverá ser feita até no máximo junho de 2012 para que os estudos sejam concluídos até o prazo previsto. De modo que de setembro de 2011 (data de publicação do referido trabalho) a junho de 2012, a ANA deverá analisar e julgar uma média de mais de 8 processos por semana.

Desta forma, ressaltamos a importância da ANA definir os métodos a serem utilizados o quanto antes, minimizando assim o seu trabalho futuro. Nesta ótica destacamos a importância da presente pesquisa e esperamos que seus resultados possam auxiliar a agência na definição de um padrão de levantamento batimétrico.

4. LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS

Batimetria pode ser explicada como um estudo topográfico subaquático e possui diversas finalidades, como fornecimento de dados para: construção de obras civis, como pontes, canais, etc., manutenção de hidrovias e portos, monitoramento da garantia do calado das embarcações; dragagens; e gestão de reservatórios.

A batimetria é uma das técnicas do “levantamento hidrográfico” regulamentado pelo Departamento Hidrográfico Nacional (DHN) da Marinha do Brasil. A NORMAM 25 do DHN define levantamento hidrográfico como toda a pesquisa em áreas marítimas, fluviais, lacustres e em canais naturais ou artificiais navegáveis, que tenha como propósito a obtenção de dados de interesse à navegação aquaviária. Esses dados podem ser constituídos por informações de batimetria, da natureza e configuração do fundo marinho, de direção e força das correntes, da altura e frequência da maré ou do nível das águas, e da localização de feições topográficas e objetos fixos que sirvam em auxílio à navegação.

Segundo a norma da Marinha do Brasil anteriormente citada, os levantamentos hidrográficos (LH) podem ser de duas categorias. As definições a seguir foram baseadas no site oficial do DHN (<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/levantamentoshidrograficos/levanta.html> Acesso em 13/07/2011).

Os LH do tipo ALFA normalmente são relacionados com alterações batimétricas significativas e definitivas, como por exemplo as decorrentes de dragagem, aqueles destinados a subsidiar propostas de balizamento ou propostas de alteração de calado, além de levantamentos geodésicos e/ ou topográficos realizados em apoio a estes levantamentos ou relacionados a obras sob e sobre as águas que possuem representação em cartas náuticas, além de atenderem uma série de exigências de modo que sejam aproveitados pelo Centro Hidrográfico da Marinha (CHM), órgão responsável pelo planejamento e pela validação dos dados resultantes dos Levantamentos Hidrográficos destinados à construção das cartas náuticas sob a responsabilidade da DHN e aqueles de interesse da Marinha.

São enquadrados na categoria BRAVO os levantamentos que não se enquadram na categoria ALFA, especialmente aqueles que se referem a levantamentos de caráter transitório, como é o caso dos acompanhamentos de dragagem. Outro levantamento típico da categoria BRAVO é aquele que tenha como objetivo subsidiar

estudos do leito marinho não relacionados com a segurança da navegação ou com obras sob ou sobre as águas com representação em cartas náuticas. Os levantamentos batimétricos em reservatórios com a finalidade de cálculo de assoreamento são enquadrados nesta categoria.

Eventualmente, o CHM pode requerer a alteração de categoria de levantamentos de BRAVO para ALFA de modo a utilizar seus dados, para isso o levantamento tipo BRAVO deve atender as exigências requeridas a levantamentos tipo ALFA, sendo aconselhado que todos os levantamentos devam seguir as especificações para a categoria ALFA.

A NORMAM 25 do DHN dispõe sobre equipamentos e técnicas de realização de levantamentos batimétricos. Porém possui enfoque majoritariamente para ambientes marinhos e manutenção de calado de hidrovias fluviais, com a finalidade de produção de cartas náuticas ou dar subsídios à obras de portos. Tratando-se de ambientes fluviais com propósito de determinação de volume de reservatórios algumas considerações devem ser feitas ao aplicar as técnicas previstas, deste o tipo de embarcação a ser utilizada à quantidade e o espaçamento entre seções de coleta de dados, sendo a NORMAM 25 relapsa quanto estas considerações, não sendo um documento capaz de orientar adequadamente a realização de levantamentos para esta finalidade. Estas considerações serão abordadas com maiores detalhes ao longo do texto.

4.1. Métodos de levantamentos

Os dois métodos mais comuns utilizados no levantamento de reservatórios são (ICOLD⁷, 1989 *apud* CARVALHO, 1994):

- Método de levantamento de contornos do reservatório;
- Método de levantamento de linhas topobatimétricas.

Carvalho *et al* (2000) define o primeiro 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

---

⁷ ICOLD – International Commission on Large Dams (1989), *Sedimentation control of reservoirs / Maîtrise de l'alluvionnement des retenues*, Committee on Sedimentation of Reservoirs, Paris, France.

a utilização de técnicas de Varredura Laser e utilização de imageamento de satélite de alta resolução.

Já o segundo método, o mais largamente usado, consiste em levantar dados referenciados ou georreferenciados da profundidade ou cota da superfície do fundo do reservatório, sendo levantados quantos dados forem necessários para que através de técnicas de modelagem 3D possa ser determinado seu relevo de fundo e o volume que este possui. Geralmente são coletados em linha, seções transversais ao corpo hídrico.

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 (BLANTON⁸, 1982 *apud* FERRARI & COLLINS, 2006).

Os procedimentos para o levantamento de dados batimétricos através de linhas topobatimétricas mudaram muito com o avanço da tecnologia. Os métodos mais tradicionais são bem simples, sendo feitas as medidas de profundidade com hastes graduadas ou guinchos hidrométricos, e a localização de cada ponto de amostra é feita com a fixação de um marco de referência e auxílio de cabos graduados que determinam um transecto ou então com equipamentos óticos, como o teodolito, que com uma trigonometria simples fornece os dados de localização, exemplos são mostrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Figura 2 – a) Exemplo do planejamento de seções de levantamento batimétrico tradicionais utilizando de coordenadas locais e poligonal básica para determinação de seções transversais (adaptado de CARVALHO, 1994); b) Exemplo de técnicas convencionais para determinação do posicionamento dos locais de coleta de dados (adaptado de US Army Corps of Engineers, 2004).. Os dados são coletados de forma analógica, podendo ser digitalizados para tratamento computacional. Geralmente os métodos convencionais são bem mais demorados que os métodos mais modernos.

---

⁸ BLANTON, J. O. (1982), *Procedures for Monitoring Reservoir Sedimentation: Technical Guideline for Bureau of Reclamation*, Denver, Colorado, USA.

Figura 2 – a) Exemplo do planejamento de seções de levantamento batimétrico tradicionais utilizando de coordenadas locais e poligonal básica para determinação de seções transversais (adaptado de CARVALHO, 1994); b) Exemplo de técnicas convencionais para determinação do posicionamento dos locais de coleta de dados (adaptado de US Army Corps of Engineers, 2004).

Nos métodos modernos o uso de tecnologias GNSS (*Global Navigation Satellite System*) vem a eliminar a necessidade de amarração topográfica através de marcos em cada seção e sua utilização em conjunto com sondas acústicas, ecobatímetros, facilita o trabalho de coleta de dados, sendo feito de forma mais rápida, precisa e os dados são coletados em formato digital facilitando o pós-tratamento. Um exemplo de ligação entre os aparelhos e da forma como é coletada os dados é mostrada na Figura 3.

Figura 3 – a) Esquema da montagem dos equipamentos; b) Princípios de funcionamento de uma sonda acústica (adaptado de US Army Corps of Engineers, 2004)

A determinação das seções a serem levantadas é um tema que não está muito bem definida. Autores e instituições de pesquisa apresentam métodos distintos. Sendo assim os estudos desta natureza apresentam cada um com uma metodologia diferente quanto a disposição das seções de levantamento de dados, ou até mesmo pela não apresentação de um método consolidado, a coleta aleatória. Dificultando assim a comparação entre os estudos, podendo tornar o cálculo do tempo de vida útil do

reservatório através da comparação de batimetrias menos preciso ou até mesmo inviável de ser feito.

Devido aos fatos anteriormente apresentados e por esse ser o tema central da investigação deste trabalho, este tema será tratado em capítulo separado.

4.2. Intervalo entre levantamentos

A Resolução Conjunta N° 003 ANEEL – ANA prevê que os levantamentos batimétricos para a atualização das curvas operacionais dos reservatórios sejam realizados a cada 10 anos. É também dada a liberdade para que a ANA (responsável sob aspectos técnicos do monitoramento), sob justificativa, determine periodicidade inferior a este prazo. Porém em se tratando de variáveis ambientais, a padronização deve ser realizada com cautela, além de não ser exposto sob quais condições que podem ser requeridos intervalo entre estudos batimétricos mais restritivos.

Para Carvalho (2008) a frequência dos levantamentos em reservatórios depende de alguns fatores, principalmente da acumulação de sedimentos, tamanho do reservatório e custo financeiro. O mesmo autor, citando o trabalho de VANONI, V. A.⁹ (1977), atenta que para pequenos reservatórios e aqueles cuja carga sólida afluente é grande devem ser levantados com maior frequência.

Ferrari & Collins (2006) afirmam que se deve otimizar a frequência dos levantamentos utilizando dados de taxa de sedimentação obtidos de levantamentos anteriores e dados do monitoramento sedimentométrico do reservatório. Como exemplo os autores citam o caso do lago *Fort Peck* nos Estados Unidos o qual inicialmente eram realizados levantamentos com 5 anos de intervalo, passando para 10 anos até constatar-se que seu assoreamento estava substancialmente abaixo do esperado. Então os levantamentos passaram a ser realizados com 20 anos de intervalo. Deve ser feita a ressalva que intervalos entre levantamentos muito grandes trazem incertezas à gestão de um reservatório, não sendo aconselhados intervalos superiores a 10 anos.

Na obra intitulada “Guia de Avaliação de Assoreamento em Reservatórios” (CARVALHO *et al*, 2000) publicada pela própria ANEEL, são previstos intervalos de tempo menores que na resolução (2anos, 5 anos e 10 anos para pequenos, médio e

---

⁹ VANONI V. A. (1977), *Sedimentation Engineering*. ASCE, American Society of Civil Engineers. New York, NY, USA.

grandes reservatórios respectivamente), é feita a ressalva que o padrão sugerido não é rígido e possuindo diferentes conceitos em outros países.

A frequência entre as atualizações das curvas operacionais devem ser função da estimativa do assoreamento (baseada em monitoramento sedimentométrico ou na análise de levantamentos anteriores), sendo comum a definição de um valor padrão de redução do volume do reservatório ou então fixado intervalos entre 5 a 10 anos (FERRARI *et al*, 2009; FERRARI & COLLINS, 2006). Ambos os trabalhos citados fazem referência à Collins & Ferrari (2000), que citam o caso do reservatório de *Elephant Butte* no México, onde foi definido que deverão ser feitos levantamentos sempre que acusado assoreamento superior a 5% do volume do reservatório.

Faz-se a ressalva de que poucos são os casos relatados na literatura, não sendo apresentado um método para definição de intervalos entre levantamentos, mas sim a definição de intervalos de forma empírica, baseado em estudos de caso específicos. Outro fato que merece destaque é a falta de informações sobre o processo de assoreamento nos reservatórios.

Para este primeiro momento, seria interessante a utilização de intervalos mais restritivos que previsto na legislação para um diagnóstico do processo de assoreamento, utilizando como base os dados de eficiência de retenção de sedimentos do reservatório, obtidos através do monitoramento sedimentométrico e os dados de taxas de sedimentação obtidos com levantamentos batimétricos periódicos. Sugere-se a adoção do mesmo padrão utilizado por Collins & Ferrari (2000) de taxas de assoreamento estimadas de 5% do volume.

Outros fatores também podem também ser apontados como condicionantes a definição de intervalos entre levantamentos, por exemplo, a ocorrência de cheias excepcionais, \ realização de obras e construção de barramentos a montante e a observação de depósitos de sedimentos nas hidrovias, portos e zonas de recreio.

4.3. Revisão de Literatura – Estado da Arte Nacional

Estigoni *et al* (2010b) aponta a carência na literatura nacional sobre o tema de levantamentos batimétricos em reservatórios, ressaltando a falta de divulgação da importância destes estudos em meios de fácil acesso, bem como a divulgação de métodos diferentes, e possivelmente divergentes, pode trazer complicações para a operação de reservatórios.

Desta forma, buscou-se elencar e analisar as principais obras da literatura nacional referentes à estudos sedimentológicos e temas afins, hidrologia e recursos hídricos, dando destaque para os estudos batimétricos.

No trabalho de Estigoni *et al* (2010b) é apresentado uma análise de onze obras da literatura nacional relacionadas ao tema de estudos sedimentológicos e temas afins, Hidrologia e Recursos Hídricos. As obras elencadas foram:

- Hidrologia – Autor: Lucas Nogueira Garcez (1967);
- Hidrologia Aplicada – Autores: Swami Marcondes Villela e Artur Mattos (1975);
- Hidrologia Básica – Autores: Nelson L de Souza Pinto e outros (1976);
- Hidrologia e Recursos Hídricos – Autor: Antonio Marozzi Righetto (1998);
- Hidrologia – Autores: Carlos E. M. Tucci e outros (2001);
- Hidrometria Aplicada – Autores: Irani dos Santos e outros (2001).
- Hidrologia Aplicada a Pequenas Bacias Hidrográficas – Autores: João B. Dias de Paiva, Eloíza M. C. Dias de Paiva e outros (2003);
- Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios – Autores: Newton de O. Carvalho e outros (2000);
- Guia de Práticas Sedimentométricas – Autores: Newton de O. Carvalho e outros (2000);
- Hidrossedimentologia Prática – Autor: Newton de O. Carvalho (1994);
- Hidrossedimentologia Prática 2ª Edição – Autor: Newton de O. Carvalho (2008);

A Tabela 2 apresenta um quadro resumo da análise realizada.

Tabela 2 – Quadro resumo da análise geral sobre as obras citadas (ESTIGONI *et al*, 2010b).

Número	Quais Obras	Comentário
2	Garcez, L. N. (1967) e Pinto, N. L. S. <i>et al</i> (1976)	Não abordam o tema de sedimentologia
1	Villela & Mattos (1975)	Aborda o tema de sedimentologia simplificada, não é capaz de responder a eventuais questionamentos do tema
3	Righetto, A. M. (1998), Tucci, C. E. M. (2001) e Paiva & Paiva <i>et al</i> (2003)	Abordam o tema de transporte de sedimentos, porém não retratam nada a respeito do uso de técnicas de levantamento batimétrico para estudos de assoreamento.
1	Carvalho <i>et al</i> (2000 b)	Não aborda o uso de técnicas de levantamento batimétrico para estudos de assoreamento.
4	Carvalho, N. O. (1994), Carvalho <i>et al</i> (2000 a) Santos <i>et al</i> (2001) e Carvalho, N. O. (2008)	Apresentam um total de 3 métodos diferentes para a realização de levantamentos batimétricos, convergem ao criticar o método de Morris & Fan (1997), porém cada autor indica a utilização de um método diferente.

A obra de Villela & Mattos (1975) possui uma nota dos próprios autores ainda em seu prefácio que a publicação deste livro tinha como objetivo atender a disciplina de Hidrologia ministrada em um semestre para o curso de Graduação em Engenharia Civil da EESC – USP, de modo que os capítulos “Águas Subterrâneas” e “Transporte de Sedimento” não foram desenvolvidos como desejável de modo a disciplina ser ministrada em um único semestre. São abordados os conceitos de transporte de sedimento, e possui capítulo dedicado exclusivamente ao assoreamento de reservatórios. É citado o levantamento batimétrico periódico como ferramenta de cálculo de assoreamento, porém sem retratar métodos da realização de levantamentos.

Righetto (1998) descreve por meio de definições matemáticas os processos de produção, transporte e deposição de sedimentos. No sub-item “Assoreamento de Reservatórios” o autor trata com grande ênfase o uso de modelos hidrodinâmicos do reservatório para modelação do transporte, deposição e ressuspensão do sedimento. Sendo aconselhado estas técnicas para cálculo de vida útil. A batimetria é citada como

dado primário para estes modelos. É interessante esta abordagem, pois as batimetrias oferecem medições pontuais do assoreamento, enquanto que modelos podem fornecer dados em passo temporal “constante” (diários, semanais, mensais, anuais, etc.). Porém a utilização de modelos nunca será desvencilhada dos levantamentos batimétricos, pois estes correspondem aos dados de calibração e validação dos modelos.

Tanto Tucci (2001) quanto Paiva & Paiva *et al* (2003) discorrem muito sobre os temas de assoreamento relacionado à operação de reservatórios, porém em um único parágrafo da obra de Tucci é citada a batimetria como ferramenta de cálculo de assoreamento.

De forma alguma tais críticas visam desmerecer as obras citadas, as quais aqui são elencadas como referências da literatura nacional nos temas de hidrologia e recursos hídricos. Trata-se de uma abordagem focada em estudos sedimentológicos, mais precisamente de levantamentos batimétricos.

Destaca-se como referência no tema de sedimentologia o autor Newton de Oliveira Carvalho, que contribuiu com a primeira obra nacional a tratar do assunto de vida útil de reservatórios em 1970. Em 1994 publicou a mais importante obra nacional sobre o assunto, denominada “Hidrossedimentologia Prática” reeditada em 2008, e é autor dos manuais da ANEEL relacionados ao tema.

Os manuais editados pela ANEEL, “Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios” (CARVALHO *et al*, 2000a) e “Guia de Práticas Sedimentométricas” (CARVALHO *et al*, 2000b), abordam temas distintos e complementares dentro do campo da sedimentologia.

Carvalho *et al*, (2000a) iniciam sua obra com as definições de produção, transporte e deposição de sedimentos, abordando de forma clara e concisa os problemas causados pelo assoreamento e dá grande destaque à importância dos estudos de avaliação deste processo, desta a fase de inventariado até a fase de operação do aproveitamento. Os estudos batimétricos são citados como medidas a serem tomadas durante a fase de operação do reservatório.

Trata também da instalação de redes de monitoramento sedimentométricas, bem como métodos de cálculo de descarga sólida, equipamentos utilizados para amostragem, método de coletas de amostras, análises em laboratório e eficiência de retenção de sedimentos em um reservatório. Porém estes tópicos são abordados com relativa simplicidade, sendo mais bem explorados em Carvalho *et al* (2000b).

Grande atenção é desprendida para a questão da previsão do assoreamento e tempo de vida útil de reservatórios, com especial destaque à medição do assoreamento, neste ponto tratando sobre estudos batimétricos. São apresentados os métodos de levantamentos e intervalos dos mesmos (já citados nos itens 4.1 e 4.2), bem como equipamentos utilizados, planejamento de seções à serem levantadas (como este é o foco desta pesquisa, este tema é tratado separadamente no item 4.4) e também recomendações para a realização de levantamentos batimétricos.

Já Carvalho *et al* (2000b) é focada nos métodos de amostragem de sedimentos, tanto para material de leito quanto em suspensão, bem como a definição de volumes de amostras para as análises. Sempre com um enfoque prático, apresenta importantes pontos a serem observados na escolha dos métodos e equipamentos a serem utilizados. O mesmo enfoque prático é dado na descrição das análises laboratoriais, sendo apontadas as aplicações e limitações de cada método. Apresenta também os diferentes métodos de cálculo de descarga sólida, processamento dos dados, análise de consistência e operação de uma rede sedimentométrica.

Diferente das obras feitas para a ANEEL, as quais apresentam uma linguagem relativamente simples para aplicação das técnicas apresentadas, as edições 1ª e 2ª do livro “Hidrossedimentologia Prática” (CARVALHO, 1994 e CARVALHO, 2008) apresentam o estado da arte das técnicas e equipamentos utilizados, buscando não só subsidiar a execução de trabalhos, mas também pesquisas sobre o tema, possuindo maior quantidade de informações e linguagem voltada a profissionais atuantes na área.

Em se tratando de erosão, transporte de sedimento, equipamentos e técnicas de amostragem, análises laboratoriais, métodos de cálculo de descarga sólida, bem como medidas de controle de sedimentos, o conteúdo apresentado pelas obras patrocinadas pela ANEEL possuem grande diferença para o livro Hidrossedimentologia Prática, sendo nas últimas obras citadas abordados com maior profundidade. Mas quando se trata do tema batimetria de reservatórios, pouca é a diferença conceitual.

Outra obra de grande importância é a de Santos *et al* (2001). Esta obra surge do aperfeiçoamento e da compilação de apostilas utilizadas em um curso homônimo ao livro os quais eram realizados pela parceria do Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza – CEHPAR, como a Universidade Federal do Paraná – UFPR e o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC.

Como esperado em textos que evoluem de apostilas didáticas, este livro possui linguagem clara e simples, não deixando o rigor técnico apresentado em seu conteúdo

transparecer em sua escrita. Pode ser facilmente utilizado para atividades de docência ou mesmo aconselhado para técnicos e engenheiros ingressantes na área.

Aborda com enfoque prático a coleta de dados e amostras e o respectivo tratamento aos quais estes dados e amostras devem ser submetidas, isto para aspectos de qualidade, quantidade e do transporte de sedimentos de um corpo hídrico. Possui boa descrição de equipamentos e de métodos para a coleta de dados fluviométricos, bem como o processamento da informação para a geração de curvas de descarga.

Em seu terceiro capítulo denominado “Levantamentos Topográficos e Batimétricos” é abordada a aplicação de batimetria para seções transversais de um corpo d’água, visando subsidiar os estudos fluviométricos. É válido ressaltar que neste momento a batimetria não é citada como método de cálculo de assoreamento de reservatórios, porém são caracterizados os equipamentos utilizados para este tipo de estudo, como posicionamento com equipamentos óticos e tecnologia GPS e medidas de profundidade por hastes, guinchos hidrométricos e ecobatímetros.

Um capítulo específico trata de da medição do transporte de sedimentos, abordando sua produção, transporte e deposição, incluindo um item sobre o batimetria de reservatórios. Referências primeira edição da obra “Hidrossedimentologia Prática” de 1994 (CARVALHO, 1994) são feitas, principalmente quando se retrata a importância dos levantamentos batimétricos e seus subprodutos gerados. A mesma obra é citada durante a definição dos métodos de levantamentos (levantamento de contorno e levantamento de linhas topo-batimétricas).

Ao abordar os métodos de planejamento de seções de levantamento é citado o método proposto por Carvalho (1994), e, pela primeira vez em literatura nacional, é feita referência à outros dois métodos o apresentado por Yuqian (1989) e por Morris & Fan (1997).

Destacamos que o tema de sedimentologia vêm ganhando espaço no cenário nacional nos últimos anos, vários são os pesquisadores que atualmente trabalham e contribuem com esta área de conhecimento, sendo difícil citar todos os trabalhos.

4.4. Divergências no planejamento de Batimetria em reservatório

Neste capítulo, serão expostos os diferentes métodos de planejamentos da localização das seções de levantamento de dados batimétricos propostos em manuais e livros, e também utilizados em trabalhos. Neste momento não é realizada nenhuma crítica aos métodos, sendo estas expostas no item discussão.

4.4.1. NORMAM 25 do DHN

Na NORMAM 25 do DHN possui especificações somente para os levantamentos hidrográficos tipo ALFA, não sendo estabelecido nenhum procedimento técnico para levantamentos tipo BRAVO, somente sendo aconselhado que estes adotem os mesmos procedimentos de levantamentos da categoria ALFA para eventual alteração na categoria do levantamento, e este possa ser utilizado pela Marinha do Brasil.

É relatado no Anexo J deste documento, os procedimentos para levantamentos em ambientes fluviais, visando subsidiar as hidrovias e a navegação, para levantamentos do tipo ALFA. Não sendo definidas as especificações técnicas para realização de levantamentos batimétricos em reservatórios para cálculo de volume.

As especificações para este tipo de levantamento definem a utilização de linhas de sondagem regulares dispostas de modo perpendicular as linhas isobatimétricas da área, ou seja, perpendiculares ao eixo do rio. O espaçamento pode variar de 25m à 4 vezes a profundidade média do trecho, sendo adotado o maior espaçamento.

Um ponto interessante é a utilização de linhas de verificação, estas dispostas perpendiculares as linhas de sondagem regulares. Estas sendo analisadas separadamente do restante do levantamento, só para cunho de verificação de anomalias entre as seções regulares, como por exemplo, erros de calibração do ecobatímetro.

4.4.2. Espaçamento delimitado em função da escala de representação do mapa

Este método originalmente citado por Vanoni (1977) é apresentado na literatura nacional pela primeira vez na obra de Carvalho (1994), sendo retomada nas demais obras do autor, e também é apresentado por Santos *et al* (2001).

É sugerida a utilização de uma linha auxiliar longitudinal ao reservatório, para que a partir dela sejam traçadas no mapa seções transversais distantes 1cm entre si, desta forma o detalhamento do levantamento está relacionado à escala do mapa utilizado para o planejamento, como exemplificado na Tabela 3.

Tabela 3 – Distanciamento das seções transversais (CARVALHO *et al*, 2000).

Escala do mapa	Distância entre seções (m)	Tipo de reservatório	Observações
1 : 2.000	20	Pequeno	Permite o desenho de seções a cada 1,0cm no mapa
1 : 5.000	50	Médio	
1 : 10.000	100	Médio a Grande	
1 : 20.000	200	Grande	
1 : 25.000	250	Grande	

Caso o leito não apresente grandes variações, pode-se adotar espaçamentos no mapa maiores, como de 2,0 ou de 3,0cm entre seções transversais.

4.4.3. Utilização de equações para determinação da distância entre seções

Alguns autores desenvolveram relações empíricas para a determinação do espaçamento entre seções e o número mínimo de transectos a serem realizados.

Santos *et al* (2001) citam pela primeira vez em obras nacionais o trabalho de Morris & Fan (1997). Os autores brasileiros citados fazem a ressalva quanto ao uso do método, que este deve ser utilizado apenas para estimativa preliminar do número de seções e que a equação pode apresentar número insuficiente de seções.

Morris & Fan (1997) apresentam um método baseado em um estudo em 57 reservatórios com áreas entre 30 e 15.000 hectares realizado pelo *Bureau of Reclamation* do *U.S. Department of Interior* em 1982.

É proposta a utilização de seções transversais ao eixo principal igualmente espaçadas, sendo o número de seções apresentado por uma função da área do reservatório (Equação 1).

$$N_{ST_1} = 2,942 * A_1^{0,3652} \quad \text{Eq. 01}$$

Onde:

N_{ST_1} : Número de seções topobatimétricas

A_1 : Área do reservatório [ha]

Outra equação é proposta por RESSAS¹⁰ (2001) *apud* Maia (2006). Este método não é relatado em nenhum livro/manual nacional até o presente momento. De modo análogo ao proposto por Morris & Fan (1997), as seções devem ser transversais ao eixo principal igualmente espaçadas segundo a equação 2:

$$N_{ST_2} = 14,3 * A_2^{0,29} \quad \text{Eq. 02}$$

Onde:

N_{ST_2} : o número de transectos

A_2 : Área do reservatório [km²].

4.4.4. Espaçamento fixo entre seções de levantamento

Segundo Ferrari & Collins (2006), o espaçamento entre linhas deve ser compatível com o nível de detalhamento requerido. É aconselhado uma distância de 90m entre linhas transversais ao eixo principal do reservatório sofrendo ajustes quanto ao detalhamento segundo os dados observados em campo, tal que em regiões que apresentem relevo mais acentuado o espaçamento deve ser reduzido. Para pequenos reservatórios é aconselhado distâncias de 30 à 60m e para reservatórios maiores com relevo de fundo suave pode-se utilizar espaçamento de 150, 180 ou até mesmo 600m.

É aconselhado a utilização de seções paralelas ao eixo do reservatório são utilizadas para confirmar a uniformidade do relevo de fundo e então podem ser utilizado espaçamentos maiores entre as transversais.

---

¹⁰ RESSAS, *Measuring and Predicting Reservoir Volume Changes due to Sedimentation*. Manual de software. Wallinford, 2001.

O *US Army Corps of Engineers* (2004) não sugere um método, mas sim relata como que são realizados a maioria dos levantamentos nos Estados Unidos. Não é observado nenhum tipo de alinhamento das seções ou espaçamento fixo, porém geralmente as linhas batimétricas são perpendiculares ao eixo principal indo de margem a margem geralmente com espaçamento de 60 à 120m, não tendo um espaçamento específico. As distâncias podem ser aumentadas quando se observar uma topografia suave e uniforme, também é relatado o espaçamento maior para grandes reservatórios visando diminuir os custos do levantamento.

4.4.5. Considerando a precisão no cálculo do volume do reservatório

Citado na literatura nacional pela primeira vez por Santos *et al* (2001) , o método de Yuqian (1989), diferentemente dos demais autores citados, não estabelece padronização de espaçamento entre seções de levantamento. Seu método consiste em definir em mapa topográfico anterior ao enchimento do reservatório um número arbitrário de seções igualmente espaçadas. Para estas seções definidas é feito o cálculo do volume do reservatório, sendo este comparado ao modelo de referência. A diferença calculada deve estar dentro de uma tolerância de erro de 5%, em caso do desvio apresentado ser maior deve-se diminuir o espaçamento entre as seções e refazer o processo, em caso de o erro ser muito menor é aconselhado que se o espaçamento entre seções até chegar a um erro de 5% por questões financeiras.

4.4.6. Experiência do Núcleo de Hidrometria – EESC – USP

O Núcleo de Hidrometria foi fundado no ano de 2001 pelo Prof Dr. Frederico Fabio Mauad e encontra-se até hoje sob sua coordenação. É um grupo de pesquisa pertencente ao Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, o qual é vinculado ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Desde sua fundação diversos foram os trabalhos e pesquisas realizados pelo NH, podendo ser destacada a experiência na realização de levantamentos batimétricos, até a presente data os principais reservatórios estudados pelo Núcleo de Hidrometria foram as UHEs da cascata do rio Tietê (Barra Bonita, Bariri, Ibitinga, Promissão, Nova

Avanhandava, Três Irmãos) no estado de São Paulo, UHE Água Vermelha na divisa de São Paulo com Minas Gerais e a UHE Chavantes na divisa de São Paulo com o Paraná, entre outros, totalizando mais de 4000km² de área estudada.

Em seus primeiros estudos batimétricos, realizados no início dos anos 2000, foram utilizados como referência as obras de Carvalho (1994), Carvalho *et al* (2000) e Morris & Fan (1997).

FIPAI (2005) apresenta que foi constatado nestes estudos que a equação de Morris & Fan fornece aproximadamente 40% dos números de transectos que Carvalho propõe utilizando cartas topográficas do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) de escala 1: 50.000 (transectos distantes em 1cm no desenho do mapa, ou seja, 500m entre seções de levantamento).

Mauad F. F. (2009) relata que inicialmente optou-se pelo método mais restritivo, seções espaçadas em 500m. Foram então feitas simulações do cálculo de volumes dos reservatórios já estudados, retirando dados de transectos levantados simulando um espaçamento entre seções maior. Em alguns casos dos levantamentos subsequentes foi utilizado espaçamento entre seções maiores que 500m, chegando em alguns casos à 1000m (informação verbal)¹¹.

Foi também testada pela equipe do Núcleo de Hidrometria a utilização de percurso em ziguezague ao longo do eixo principal do reservatório, como apresentado em FIPAI (2009). Formato este que quanto mais largo o reservatório mais se aproxima do traçado de seções transversais (casos de reservatórios com distância entre margens superior a 5km), e que também otimiza a relação entre o caminho percorrido pelo barco e a quantidade de dados coletados .

---

¹¹ Informação fornecida por Mauad, F. F. (2009) em São Carlos – SP.

5. MATERIAIS

5.1. Estudos de Casos

Reservatórios de grande dimensão são comuns na realidade brasileira, principalmente no estado de São Paulo, e poucos estudos sobre assoreamento se têm sobre eles. A presente pesquisa se baseia em dois estudos de caso, UHE Três Irmãos (SP) e UHE Chavantes (SP)

Em pesquisas anteriores do Núcleo de Hidrometria, foi constatado que dados anteriores ao enchimento dos grandes reservatórios são de difícil localização, no caso do estado de São Paulo, muitas informações se perderam no processo de privatização das usinas da CESP.

Pela data de construção da UHE Três Irmãos (SP), esta usina apresenta dados topográficos da área do reservatório anteriores ao enchimento, levantamento este feito pelo IBGE, deste modo foi escolhida para esta pesquisa de mestrado, além do fato de apresentar suporte de um projeto maior do edital PRO-ENGENHARIAS (Programa de apoio ao Ensino e à Pesquisa Científica e Tecnológica em Engenharias) N°01 / 2007 da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), sob número 1026 / 2008 e intitulado “Estudo do assoreamento do reservatório formado pela barragem da UHE Três Irmãos (SP) e aplicação de equipamentos acústicos para análise hidrométrica, sedimentológica e topobatimétrica de sistemas hídricos superficiais”. Além da presente pesquisa o projeto PRO-ENGENHARIAS conta também com mais uma pesquisa de mestrado e outra de doutorado.

Este reservatório também já foi objeto de estudo de pesquisas anteriores do Núcleo de Hidrometria, que de 2007 à 2009 desenvolveu um projeto do programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL e em parceria com a CESP. Fato este que proporcionou disponibilidade de dados a presente pesquisa.

O levantamento batimétrico é um estudo relativamente custoso, de modo que o reservatório da UHE Chavantes (SP) foi escolhido para este estudo devido à uma parceria estabelecida entre a Duke Energy International, concessionária responsável pela usina e a EESC – USP da Fundação para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial (FIPAI) no início de 2011, para o estabelecimento de um modelo piloto para levantamentos batimétricos para os reservatórios da concessionária,

utilizando como estudo de caso o UHE Chavantes (SP). O qual proporcionou suporte financeiro para o levantamento de dados em campo

5.1.1. UHE Três Irmãos – SP

O reservatório da UHE – Três Irmãos (SP) está localizado na bacia hidrográfica do Baixo Tietê, Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos número 19 (UGRHI – 19), esta faz limite com as UGRHIs Tietê-Batalha – 16, São José dos Dourados – 18 e Aguapeí – 20 como é mostrado da Figura 4. A pouco menos de 30km da desembocadura do rio Tietê no rio Paraná seu barramento encontra – se aproximadamente nas coordenadas 20° 40' S e 51° 18' W.

Ele é o último reservatório do rio Tietê, possuindo a montante 5 grandes UHE's, Barra Bonita, Bariri, Ibitinga, Promissão e Nova Avanhandava, sendo esta última imediatamente à montante. A jusante está o reservatório da UHE de Jupia.

Uma peculiaridade deste reservatório é o Canal Pereira Barreto, com 9.600 m de comprimento, que interliga os reservatórios de Três Irmãos (SP) e de Ilha Solteira na UGRHI São José dos Dourados – 18, propiciando a operação energética integrada dos dois aproveitamentos hidrelétricos, além de permitir a navegação entre os tramos norte e sul da Hidrovia Tietê-Paraná.

Figura 4 – Localização da UGRHI – 19 no estado de São Paulo (<http://www.sigrh.sp.gov.br> Acesso em outubro de 2011).

A Usina Três Irmãos (SP) é a maior usina construída no Rio Tietê e está localizada entre os municípios de Andradina e Pereira Barreto (SP), a 28 km da confluência com o Rio Paraná. Possui cinco unidades geradoras com turbinas Francis e potência instalada de 807,50 MW. A primeira unidade geradora entrou em operação em novembro de 1993 e a quinta, em janeiro de 1999. Sua barragem tem 3.640 m de comprimento e seu reservatório mede 785 km². Possui duas eclusas para navegação (fonte www.cesp.com.br). A Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam maiores detalhes sobre a usina.

Tabela 4 – Características da Barragem da UHE Três Irmãos (SP) (Adaptado de www.cesp.com.br acesso em 2008).

Condições de montante	
Área da bacia hidrográfica	69.900 km ²
Área do espelho d'água (N.A. 328,40 m)	785 km ²
Volume morto	10.000 x 10 ⁶ m ³
Volume útil	3.450 x 10 ⁶ m ³
Volume reservado para cheia de projeto	350 x 10 ⁶ m ³
Barragem de concreto e de terra	
Tipo	gravidade
Comprimento no coroamento	3.640,00 m
Níveis característicos de montante	
N.A. máximo maximorum	328,40 m
N.A. máximo útil	328,00 m
N.A. mínimo útil	323,00 m
Vazão média a longo termo (MLT período 1931 - 1998)	757 m ³ /s
Vazão máxima média diária observada (05/06/83)	6.575 m ³ /s
Condições de jusante	
N.A. máximo maximorum	284,75 m
N.A. máximo	282,40 m
N.A. mínimo	279,00 m
Vazão máxima dos descarregadores (N.A. 328,00 m)	9.500 m ³ /s
Vazão turbinada nominal total (5 máquinas)	2.040 m ³ /s

Tabela 5 – Continuação da Tabela 4. Características da Barragem da UHE Três Irmãos (SP) (Adaptado de www.cesp.com.br acesso em 2008).

Unidades geradoras – turbinas	
Tipo	Francis
Turbinas	5
Potência nominal unitária	165.400 kW
Queda de referência	42,00 m
Engolimento máximo	449 m ³ /s
Vazão turbinada nominal total (5 máquinas)	2.040 m ³ /s
Unidades geradoras – geradores	
Tipo	ABB/Siemens/Alsthom
Potência nominal	161.500 kW
Potência nominal total instalada	807.500 kW
Órgãos de descarga	
Comportas de superfície	4
Dimensões do vão	15,00 x 18,00 m
Cota da soleira	310,50 m
Cota de topo da comporta (parte central)	329,00 m
Cota de topo da comporta (junto aos pilares)	329,50 m
Descarga máxima por vão (N.A. 328,00 m)	2.249 m ³ /s
Descarga máxima por vão (N.A. 328,50 m)	2.375 m ³ /s

Em atividades de campo, observou-se a predominância do cultivo da cana-de-açúcar (Figura 5 e Figura 6) e pastagens as margens do reservatório de Três Irmãos (SP), em sua maioria não apresentando mata ciliar. Aliado a isso, verificou-se presença de processo erosivo, principalmente nas regiões de pasto devido ao pisoteio do gado, também abundante na região (Figura 7).

Figura 5 – Cultivo de cana-de-açúcar até as margens do reservatório.

Figura 6 – Solo exposto devido à época de plantio de cana-de-açúcar: potencial área de ocorrência de erosão laminar.

Figura 7 – Presença de ravina em pastagem.

5.1.2. UHE Chavantes – SP

A Usina Hidrelétrica Chavantes (SP) foi construída no rio Paranapanema na divisa dos estados de São Paulo e Paraná, próxima aos municípios de Chavantes (SP) e Ribeirão Claro (PR), aproximadamente 3 km da foz do rio Itararé, coordenadas aproximadas 23° 07' 44" S e 49° 43' 54" W (Figura 8).

Figura 8 – Localização da UGRHI – 19 no estado de São Paulo (Disponível em <http://www.sigrh.sp.gov.br> Acesso em outubro de 2011).

Destaca-se como a quarta maior usina, em geração da Duke Energy International no rio Paranapanema, com 414 MW de potência instalada. Quanto à área alagada, é a terceira maior, com aproximadamente 400 km².

O início de sua construção aconteceu em 1959, e o primeiro grupo gerador começou as operações em 1970. O porte desta usina impressiona: a barragem, por exemplo, situada a 3 km abaixo da foz do rio Itararé, proporciona o armazenamento de 9,4 bilhões de metros cúbicos de água, o que permite a regularização de grande parte da vazão média do rio, evitando enchentes e assegurando irrigação a toda a região ribeirinha (DUKE ENERGY, 2011a). A Figura 9 apresenta vista de jusante do alto do barramento da UHE Chavantes (SP).

Figura 9 – Vista de jusante do alto do barramento da UHE Chavantes (SP).

As informações gerais desta UHE estão na Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 6 – Informações gerais da UHE Chavantes (SP) (Fonte: DUKE ENERGY, 2011b).

Barragem	
Tipo	Aterro Compactado e enrocamento com núcleo de argila à montante.
Comprimento no coroamento	500,00 m
Cota do coroamento	479,60 m
Altura máxima sobre fundações	92,00 m
Unidades Geradoras: Turbinas	
Tipo	Francis Eixo Vertical
Fabricante	Escher Wyss
Número de unidades	04
Potência nominal unitária	106.000 kW
Potência nominal total	424.000 kW
Engolimento nominal	160 m³/s
Unidades Geradoras: Geradores	
Tipo	Umbrella de Eixo Vertical
Fabricante	Toshiba / GE
Potência nominal	103.500 kW
Potência nominal total instalada	414.000 kW
Comprim. da Casa de Máquinas	115,00 m

Tabela 7 – Continuação da Tabela 6. Informações gerais da UHE Chavantes (SP) (Fonte: DUKE ENERGY, 2011b).

Níveis Característicos	
N.A. Máximo Maximorum	475,50 m
N.A. Máximo Normal	474,00 m
N.A. Mínimo Normal	465,23 m

Suas águas banham os municípios de Barão de Antonina, Bernardino de Campos, Chavantes, Coronel Macedo, Fartura, Ipaussu, Itaporanga, Taguaí, Timburi e Piraju no estado de São Paulo, e os municípios de Carlópolis, Ribeirão Claro, Salto do Itararé, Santana do Itararé e Siqueira Campos no estado do Paraná.

O principal rio que aflui ao reservatório é o rio Paranapanema, que contribui com aproximadamente 50% da vazão. Podemos também destacar o rio Itararé, rio Verde e Ribeirão da Fartura como corpos d'água de significativa importância. Destacando-se o rio Itararé, aparentemente o segundo maior contribuinte em vazão e, possivelmente, o maior contribuinte em descarga sólida.

5.2. Ecobatímetro – BATHY 500 MF (SyQwest. Inc)

O Ecobatímetro é um equipamento que utiliza a Eco Sondagem para a determinação da profundidade da água, medindo o intervalo do tempo requerido para uma onda ultra-sônica viajar, em uma velocidade conhecida, de um ponto conhecido (uma embarcação) até uma superfície refletora (fundo do reservatório) e o seu retorno ao ponto de partida. Conhecendo o tempo entre a transmissão de uma onda de som e a recepção de seu eco, a profundidade pode ser determinada multiplicando a metade deste intervalo de tempo pela velocidade do som na coluna de água. A Figura 10 mostra o equipamento utilizado nas campanhas de campo e um desenho esquemático da realização da varredura.

Figura 10 – Ecobatímetro modelo BATHY-500MF da fabricante *SyQuest, Inc* (Fonte: <http://www.syquestinc.com>) e barco com ecobatímetro realizando varredura

O ecobatímetro utilizado é do modelo BATHY-500MF da fabricante *SyQuest, Inc*, este aparelho pode fornecer dados tanto em papel térmico em gráficos completos de alto contraste como por interface versátil com computadores, cujo formato é selecionável pelo usuário através do teclado no painel frontal. O usuário pode obter a saída de dados digitais da profundidade nos formatos de padrão industrial RS-232/422 ou no formato NMEA-0183, sendo estas aceitas como entrada externa de anotação de vários softwares hidrográficos. Os dados podem também ser acompanhados em tempo real pelo display no painel frontal. Há a possibilidade de utilização de diferentes tipos de transdutores, inclusive para ondas de alta penetração. O transdutor utilizado foi o modelo P01540, suas especificações técnicas se encontram na Figura 11.

Figura 11 – Transdutor da sonda (tradução livre de SYQWEST INCORPORATED, 2006).

Os equipamentos utilizados proporcionam uma precisão das medidas de profundidade da ordem de centímetros para profundidades de até 100m e da ordem de decímetro para profundidades superiores a 100m. O erro associado é de 0,5% da profundidade medida.

Os ajustes e alterações de parâmetros da unidade são realizados através do teclado. Valores de parâmetros importantes são armazenados pela unidade em memória permanente, não sendo perdidos caso a alimentação elétrica seja removida. Um relógio de tempo real fornece impressão da hora e da data no gráfico de registro. Inteiramente portátil, o Bathy-500MF pode ser operado em qualquer embarcação a partir de amplo campo de fontes de alimentação de corrente alternada, AC, ou corrente contínua, CC.

O Bathy-500MF é capaz de trabalhar em várias frequências de operação e com várias intensidades de sinal, sendo estas responsáveis pelo seu funcionamento ótimo nas mais variadas condições de temperatura, salinidade, cor, turbidez e tipo de fundo.

5.3. Sistema GPS com Correções Diferenciais

Os receptores GNSS utilizados para o levantamento de dados em campo para o posicionamento planimétrico (bidimensional) correspondem a receptores GPS (*Global Positioning System*) do modelo GS20, PDM (Professional Data Mapper) e a antena utilizada foi modelo AT 201, ambas da empresa *Leica Geosystems*, as correções diferenciais via satélite (DGPS) foram fornecidas pela OMNISTAR captadas através do receptor DGPS 3000L da empresa Fugro, com a antena AT 51, modelo Mk4 da empresa *RACAL Landstar*. A Figura 12 mostra o GS20 e o receptor 3000L.

Figura 12 – a) Equipamento GPD - GS20 da Leica Geosystems (Fonte: <http://www.leica-geosystems.com>); b) Receptor 3000L da Fugro

A tecnologia de posicionamento por satélites, inicialmente de uso militar e atualmente liberada para uso civil (com restrições), consiste no rastreamento, recebimento e registro de sinais de satélites específicos. Estes sinais são processados em função do tempo de viagem e de informações transmitidas pelas ondas para calcular as coordenadas de um ponto no terreno. Existem pelo menos 24 satélites em operação e em órbita da chamada constelação NAVSTAR-GPS a uma altitude de 21.000 km em seis planos orbitais.

A precisão obtida com receptores GPS é muito variável, pode variar de dezenas de metros a milímetros, dependendo principalmente do método de posicionamento utilizado, das técnicas de correção empregadas e do tipo de equipamento utilizado. das condições da ionosfera e da troposfera, erros das efemérides e erros dos relógios dos satélites.

O GS20 é um receptor GPS de frequência L1, que trabalha pode trabalhar com correção diferencial em tempo real ou pós-processada. Para o estudo foi utilizado correções em tempo real via satélite (sem utilização de base fixa) utilizando o receptor 3000L da Fugro. A empresa fornecedora deste serviço foi a OMNISTAR. As correções utilizadas foram do tipo VBS (Virtual Base Station). Esta configuração de equipamentos fornece uma precisão de posicionamento horizontal em 95% do tempo de uso inferior a 1m e em 99% do tempo próximo à 1m.

Originalmente os dados fornecidos pela correção diferencial do tipo VBS estão no sistema de referência ITRF 2005.

5.4. Pacote HYPACK (Hypack, Inc.)

O HYPACK é uma plataforma comercial desenvolvida para a realização de levantamentos hidrográficos, oferecendo as ferramentas necessárias para a realização de estudos batimétricos. O HYPACK MAX da homônima HYPACK, *Inc.* é um programa constituído por vários módulos, dos quais foram utilizados nas fases de planejamento, navegação, levantamento, tratamento e processamento dos dados recolhidos.

O módulo “Administrador” faz o link com todos os módulos, e é nele que se faz o planejamento das seções a serem levantadas. Este possui interface com ferramentas de geoprocessamento permitindo a importação de dados de outros programas. Nesta fase são carregados os desenhos do contorno do reservatório, tanto em formato raster como vetorial e então é feito o planejamento das seções batimétricas.

O módulo de aquisição de dados é chamado *Survey* (Figura 13), ele também apresenta ferramenta para orientação da navegação. O programa faz a compatibilização dos dados do GPS e do Ecobatímetro, fornecendo dados tridimensionais de posição (latitude, longitude e profundidade). Em sua tela são mostrados os desenhos do planejamento feito e a localização do barco, uma régua de navegação mostra a distância entre o transecto planejado e o barco. O perfil da seção e os dados coletados (latitude e longitude, profundidade e velocidade do barco) também são apresentados, todos em tempo real.

Figura 13 – Tela de navegação do módulo *Survey* do HYPACK MAX.

No módulo *Single Beam Processing* (Figura 14) que se encontram as ferramentas de pós processamento dos dados recolhidos durante o levantamento de campo, com as quais podemos eliminar dados de profundidade anômalos, para correções de velocidade do som. Também possui a capacidade de fazer as correções de cota e de *offset* do transdutor.

Figura 14 – Tela de tratamento dos dados do módulo *Single Beam Processing* do HYPACK MAX.

Ressalta-se apesar do software HYPACK MAX apresentar ferramentas de processamento de dados, modelagem de terrenos e elaboração de mapas, optou-se pela utilização do *software* ArcView 9.3 para tais atividades.

5.5. Software Arcview 9.3

O *software* Arcview 9.3, da líder de mercado no ramo dos programas de geoprocessamento *ESRI*, é um dos mais versáteis programas de Sistema de Informação Geográfica (SIG), possuindo inúmeras potencialidades para tratamento de dados espaciais e análise ambiental, como sobreposição de cartas, operações booleanas, banco de dados georreferenciados, etc., porém para estudos batimétricos poucas de suas potencialidades são utilizadas, exceto as ferramentas de modelagem 3D.

Este programa possui em suas ferramentas 3D as opções de se trabalhar com o *TIN* que é tratamento aconselhado para se modelar relevo mais complexo como é o caso da representação de um fundo de vale ou de reservatório. Vários são os modelos para a geração de um *TIN*, o mais amplamente utilizado é a triangulação de *Delaunay*. Segundo Felgueiras & Goodchild (1995); Kidner *et al* (2000); Tsai, V. J. D.¹² (1993) *apud* Vivoni *et al* (2005), entre outros, a utilização da *Constrained Delaunay*

¹² TSAI, V. J. D. (1993) Delaunay triangulations in TIN creations: na overview and a linear-time algorithm, *International Journal of Geographical Information Systems*, 7, 501 – 524.

Triangulation, oferecida pelo Arcview 9.3, permite uma melhor representação de feições como fundos de vale, drenagens, divisores de água e feições mais agudas, sendo este método utilizado para a melhor representação do relevo do canal do leito do rio submerso no reservatório.

Após a modelação 3D através de *TIN*, o programa oferece interface simples para a comparação entre os MDTs e também o cálculo de volume do reservatório de acordo com a cota, através da integração do volume para um dado valor de cota. Com estes dados pode-se analisar, no caso desta pesquisa, qual a variação do volume calculado por cada método utilizado em comparação com o MDT de referência.

5.6. Demais equipamentos de apoio às atividades de Campo

Para a execução dos trabalhos de campo foram utilizados equipamentos não específicos e comumente conhecidos, não necessitando maiores explicações ou especificações técnicas.

- Barco de alumínio Levefort Squaluss 600
- Motor de popa 25Hp Mercury
- Motor de popa reserva de 15Hp Yamaha
- Caminhonete com engate e carreta para deslocamento do barco
- Gerador Elétrico à Gasolina Honda – EU 10i
- No-break
- Computador adaptado para campo
- EPI's
- EPC's

5.7. Cartas do IBGE

Diferente de outras barragens do próprio rio Tietê e de diversas outras no Brasil, o caso em estudo, possui cartas topográficas da região do reservatório antes do enchimento do mesmo. Estas cartas datam de 1972 e foram geradas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE.

As cartas foram digitalizadas, serviço este realizado pela empresa Atlas Geoprocessamento durante o projeto do programa de pesquisa e desenvolvimento da ANEEL anteriormente citado. Foram feitas a digitalização das isolinhas altimétricas

(curvas de nível) e os pontos cotados, a partir destes foi gerado um *TIN* através do algoritmo de *Delaunay*.

A base cartográfica do IBGE utilizada para o trabalho corresponde à 10 cartas topográficas no sistema de referência Córrego Alegre, escala 1:50.000 com área de cobertura de 15' x 15' cada. Encontravam-se em formato analógico em e em bom estado de conservação. Todas as cartas se encontram na Zona UTM 22S, sendo este o tipo de coordenadas utilizado. Na Tabela 8 estão relacionadas as cartas, com suas respectivas identificações.

Tabela 8 – Cartas topográficas do IBGE utilizadas para digitalização.

Nome	IN
Aracanguá	SF-22-D-III-4
Araçatuba	SF-22-J-II-1
Bacuri	SF-22-D-III-3
Bela Floresta	SF-22-C-IV-1
Buritama	SF-22-J-II-2
Major Prado	SF-22-D-V-3
Pereira Barreto	SF-22-C-IV-2
Ribeiro do Vale	SF-22-J-I-2
Sud Menuci	SF-22-D-III-1
Três Alianças	SF-22-C-IV-4

As cartas são articuladas conforme ilustrado na Figura 15 e cobrem uma área de 7560 m².

Bela Floresta	Pereira Barreto	Sudmenuci			
	Três Alianças	Bacuri	Aracanguá	Major Prado	
			Ribeiro do Vale	Araçatuba	Buritama

Figura 15 – Articulação das cartas topográficas.

A ilustração apresentada na Figura 16 exemplifica o resultado final obtido após a digitalização e georreferenciamento das cartas topográficas do IBGE.

Figura 16 – Digitalização, georreferenciamento e registro das cartas topográficas do IBGE.

Inicialmente no sistema de coordenadas Córrego Alegre, durante a digitalização as cartas foram reprojetadas para SAD 69. Segundo determinação do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), na data de publicação deste trabalho, os sistemas de referência oficiais do Brasil são o SIRGAS 2000 e o SAD 69, sendo que ambos podem ser utilizados até o ano de 2014, quando o SIRGAS 2000 passará a ser o único datum oficial brasileiro, de modo que este foi o sistema adotado.

Como não existem parâmetros de transformação entre SIRGAS2000 e WGS84 porque eles são praticamente iguais, os parâmetros de conversão utilizados foram os de transformação entre WGS84 e SAD 69 fornecidos pelo próprio IBGE:

$$DX = +67,35 \text{ m}$$

$$DY = -3,88 \text{ m}$$

$$DZ = +38,22 \text{ m}$$

6. MÉTODOS

O levantamento batimétrico, mesmo com utilização de tecnologias mais recentes como utilização de equipamentos GNSS em conjunto com sondas acústicas, é um tanto quanto demorado e de elevado custo.

Como forma de ilustrar os esforços de mão de obra e financeiros, estimou-se para o reservatório da UHE Três Irmãos (SP) (aproximadamente 785km²) a realização de um levantamento com seções igualmente espaçadas em 500m, o tempo gasto estimado foi de 50 dias de levantamento de dados em campo e um tempo total entre levantamento, tratamento, processamento e elaboração de mapas de aproximadamente 5 à 6 meses contados a partir do efetivo início das atividades, e um custo na ordem de centenas de milhares de reais. Segundo o Texas Water Development Board – TWDB (2008) o levantamento custaria aproximadamente R\$330.000,00 (método disponível em <http://www.twdb.state.tx.us/assistance/lakesurveys/surveycharges.asp> Acesso em 13/02/2012)

Como o objetivo deste trabalho é confrontar os diferentes métodos apresentados pela literatura, a realização de um levantamento correspondente à cada método se mostra inviável. Para tal seriam necessários anos de pesquisa e uma grande quantidade de recursos financeiros.

Desta forma optou-se pela simulação de dados batimétricos, a qual se mostrou como alternativa viável para alcançar os objetivos deste estudo. A simulação dos dados para a avaliação da precisão do cálculo do volume de cada método é uma adaptação do método proposto por Yuqian (1989) exposto no item 4.4.5.

Os dados coletados em um levantamento batimétrico consistem em uma dispersão de pontos amostrados no relevo de fundo do reservatório em trajetória linear, de forma análoga a simulação destes dados consiste na amostragem em perfis lineares de pontos em um MDT que representa o fundo do reservatório.

Para o primeiro estudo de caso, UHE Três Irmãos (SP), foram utilizadas as cartas topográficas do IBGE (1:50.000) para a elaboração de um MDT do fundo do reservatório, onde então foram realizadas as simulações de diferentes métodos de planejamento de levantamento batimétrico. Os resultados obtidos do cálculo de volume para cada método foram então analisados e pôde-se propor um método padrão.

Para o segundo estudo de caso, UHE Chavantes (SP) (aproximadamente 400km²), foi realizado o levantamento batimétrico do reservatório aplicando os conceitos definidos a partir do primeiro estudo de caso.

Frente ao exposto, optou-se em abordar o primeiro estudo de caso integralmente, abordando neste ponto do texto, não só o método utilizado, mas também os resultados obtidos, discussão e conclusões preliminares e a proposição de um método para realização de levantamentos batimétricos. Só então será exposto o segundo estudo de caso, com a aplicação em um caso real do método proposto que contará com a mesma estrutura textual (método utilizado, resultados obtidos, discussão e conclusões preliminares).

Acredita-se que desta maneira, apesar de fugir a estrutura clássica de trabalhos acadêmicos, a leitura se torne mais clara.

6.1. UHE Três Irmãos (SP) – *Estudo dos métodos presentes na literatura*

Buscando maior fidelidade da representação do terreno foram atribuídas coordenadas tridimensionais a rede hidrográfica digitalizada e, esta, utilizada como linha de quebra para a geração da grade. Para o rio Tietê, foi atribuído a este um perfil longitudinal de um canal trapezoidal de 100m de largura por 10m de profundidade. As dimensões foram baseadas em dados batimétricos de levantamento realizado pelo Núcleo de Hidrometria no ano de 2008.

Das isolinhas altimétricas e da hidrografia das cartas digitalizadas foi então gerado o MDT de referência por modelação tipo TIN (Figura 17).

Baseado no MDT foi então realizado a simulação de dados batimétricos em ambiente SIG. Foram desenhadas linhas representando a trajetória do barco durante a coleta de dados para diferentes espaçamentos segundo alguns dos métodos citados no item 4.4. Para estas linhas foram atribuídas coordenadas tridimensionais amostradas a cada 10m no MDT de referência. A Figura 18 exemplifica o processo.

Figura 17 – MDT de Referência

Figura 18 – Exemplo da simulação de uma seção de levantamento batimétrico.

Foram então simulados ao longo do reservatório os seguintes métodos encontrados na literatura:

- Espaçamento delimitado em função da escala de representação do mapa (escala 1:50.000)
  - 1 cm → 500m (aproximadamente 290 seções)
  - 2 cm → 1000m (aproximadamente 140 seções)
  - 3 cm → 1500m (aproximadamente 80 seções)
- Morris & Fan
  - 180 seções com espaçamento adotado de 750m
- RESSAS
  - 98 seções com espaçamento adotado de 1250m
- Espaçamento fixo entre seções de levantamento
  - 250m (aproximadamente 600 seções)

Valores de espaçamento inferiores a 250m não foram utilizados devido a resolução apresentada pelo MDT. O espaçamento entre seções no caso dos métodos baseados em equações (Morris & Fan e RESSAS) foram aproximados para valores redondos de modo a facilitar sua aplicação.

Estes parâmetros foram então confrontados com o MDT de referência analogamente ao método proposto por Yuqian (1989).

Durante a pesquisa foi observado certa dificuldade em se obter informações conclusivas da análise do reservatório inteiro, foi também observado singularidades nas regiões correspondentes ao antigo leito do rio Tietê e regiões mais estreitas do reservatório.

Em uma primeira análise foi observado que tratar de uma mesma maneira regiões distintas do reservatório, como o compartimento do corpo principal e os compartimentos dos tributários, acarreta em problemas na modelagem do terreno.

A Figura 19 e a Figura 20 mostram as regiões trabalhadas individualmente, proporcionando assim maior clareza na comparação entre o volume calculado para cada método.

Figura 19 - Região analisada separadamente

Figura 20 – Regiões analisadas separadamente

A Figura 21 exemplifica como foi feita a simulação dos dados ao longo de todo o reservatório, bem como dos compartimentos definidos anteriormente. Por uma questão de escala utilizou-se o compartimento denominado Braço 2 para ilustrar o método. Pode-se notar os diferentes espaçamentos utilizados entre seções bem como o produto do MDT gerado pelas mesmas.

Figura 21 – Exemplo do método de simulação de dados batimétricos para o compartimento Braço 2.

6.1.1. Resultados das simulações

Como citado anteriormente, optou-se por se realizar a análise dos métodos em compartimentos distintos, buscando evidenciar as alterações e influências no processo de modelagem devido ao uso de diferentes métodos.

A Tabela 10 mostra o resumo dos resultados, expressando a diferença do volume calculado para cada método e o volume de referência.

Tabela 9 – Diferença entre o volume calculado para cada método e o volume de referência.

	Diferença de Volume do MDT de Referência	Métodos					
		250m	500m	M & F (750m)	1000m	RESSAS (1250m)	1500m
Completo	Absoluta[hm ³]	128,28	457,00	843,63	1284,49	1746,52	2092,56
	Percentual	0,88%	3,14%	5,80%	8,83%	12,01%	14,39%
Principal	Absoluta[hm ³]	25,33	86,84	178,00	331,09	427,00	534,98
	Percentual	0,22%	0,74%	1,52%	2,82%	3,64%	4,56%
Princ. 01	Absoluta[hm ³]	1,51	10,33	18,40	16,56	23,80	42,17
	Percentual	0,14%	0,97%	1,73%	1,55%	2,23%	3,96%
Princ. 02	Absoluta[hm ³]	0,84	1,78	-5,68	20,47	4,98	7,41
	Percentual	0,06%	0,13%	-0,41%	1,49%	0,36%	0,54%
Princ. 03	Absoluta[hm ³]	1,78	5,06	5,05	14,65	20,99	32,75
	Percentual	0,28%	0,80%	0,79%	2,31%	3,30%	5,15%
Princ. 04	Absoluta[hm ³]	1,57	5,25	11,11	15,93	27,88	38,81
	Percentual	1,16%	3,88%	8,21%	11,77%	20,60%	28,68%
Braço 01	Absoluta[hm ³]	1,32	5,29	12,83	17,09	23,60	36,92
	Percentual	1,34%	5,37%	13,02%	17,34%	23,94%	37,46%
Braço 02	Absoluta[hm ³]	1,01	5,50	8,06	16,36	21,42	30,01
	Percentual	1,47%	8,01%	11,74%	23,82%	31,18%	43,69%
Braço 03	Absoluta[hm ³]	0,64	4,23	9,04	9,78	11,00	11,81
	Percentual	3,85%	25,70%	54,88%	59,38%	66,74%	71,67%
Braço 04	Absoluta[hm ³]	0,37	3,73	6,04	7,84	8,35	8,21
	Percentual	3,47%	35,39%	57,27%	74,42%	79,20%	77,94%

6.1.2. Análise preliminar

A técnica de simulação de dados batimétricos apresentada mostra-se eficaz para a realização desta pesquisa, permitindo a realização da comparação entre os diferentes métodos e espaçamentos entre seções propostos na literatura a um baixo custo de execução.

O reservatório da UHE Três Irmãos (SP), como a maioria dos reservatórios brasileiros, é um reservatório dentrítico e, por consequência, heterogêneo. Sendo apresentadas características bem distintas entre o corpo principal e os afluentes do reservatório, os quais devem ser considerados na definição do método a ser utilizado em um levantamento batimétrico.

Comparando os resultados obtidos para o corpo principal do reservatório e os resultados obtidos para o reservatório completo, observam-se diferenças da ordem de três a quatro vezes menores entre o volume calculado para cada método e o volume de referência para o corpo principal. Evidenciando que a somente a análise do reservatório como um todo dificilmente seria conclusiva, reafirmando o porquê da divisão e análise do reservatório em compartimentos.

Pôde-se notar também que o aumento do espaçamento entre seções batimétricas possui menor influência na região do corpo principal do reservatório que na região dos braços.

Foram observadas duas singularidades distintas nos resultados obtidos com MDTs gerados, os problemas de águas profundas e os problemas de águas rasas, indo ao encontro com resultados das pesquisas de Furnans & Austin (2008).

Nas águas profundas existe a dificuldade em se representar o antigo leito do rio este apresentando descontinuidades, principalmente em regiões em que o rio apresenta meandros ou quando o leito se encontra disposto diagonalmente em relação à posição das seções de levantamento, pois os pontos mais profundos de uma seção de levantamento são ligados a pontos mais rasos da outra seção, criando uma descontinuidade da representação do leito do rio no MDT (Figura 22).

Figura 22 – Exemplo do problema apresentado pela modelagem TIN na representação do canal de drenagem para o compartimento Principal 3.

Já nas águas rasas o problema está na interpolação de dados dos limites do reservatório entre si e não com as sondagens, gerando assim região de triângulos planos correspondentes a cota máxima utilizada na modelação (Figura 23).

Figura 23 – Exemplos de regiões que apresentam triângulos planos para o espaçamento entre seções de 1000m no compartimento Braço 1.

Pode-se notar pela análise da Figura 23 que a largura do trecho do reservatório influencia diretamente no processo de definição da grade TIN. Este fato também é apoiado pelos dados do cálculo de volume gerado a partir dos diferentes métodos para regiões do reservatório com larguras distintas, ficando evidenciado que o erro associado a cada método é inversamente proporcional a largura do trecho do reservatório. A Tabela 10 destaca os resultados apresentados na Tabela 9 para o compartimento Principal 1 de largura média de 4500m e o compartimento Principal 2 de largura média de 2000m.

Tabela 10 – Diferença entre o volume produzido pelos diferentes métodos e o volume do MDT de referência para os compartimentos Principal 1 e Principal 4.

Método	Principal 1		Principal 4	
	Dif. [hm³]	Dif. [%]	Dif. [hm³]	Dif. [%]
250 m	1,51	0,14%	1,57	1,16%
500 m	10,33	0,97%	5,25	3,88%
Moris & Fan (750m)	18,40	1,73%	11,11	8,21%
1000 m	16,56	1,55%	15,93	11,77%
RESSAS (1250m)	23,80	2,23%	27,88	20,60%
1500 m	42,17	3,96%	38,81	28,68%

A análise das regiões do corpo principal do reservatório apontam para diferenças de volume inferiores a 1% para o espaçamento de 250 m e 500 m, tanto para o corpo principal inteiro, como para os compartimentos Principal 1, Principal 2 e Principal 3. Já o espaçamento de 750m apresentou esta mesma precisão para os compartimentos Principal 2 e Principal 3. De maneira geral espaçamentos superiores a 750m produziram resultados com diferença de volume superior a 1%.

Analisando a formação das grades TIN nos braços do reservatório, nota-se que a formação de triângulos planos acontece para espaçamento entre seções iguais ou superiores a largura média do trecho em questão, e que quanto maior a diferença entre a largura do trecho e o espaçamento entre seções maior será o número de ligações de dados batimétricos entre si, o que proporciona maior fidelidade do MDT produzido.

Outro ponto a ser destacado na modelação TIN é que para espaçamento entre seções de até metade da largura do trecho possuem aproximadamente 30% de conectividade entre dados batimétricos, estes correspondentes à região central de cada seção, geralmente associadas ao trecho mais profundo da mesma, produzindo dados de volume com relativa boa precisão.

Concluiu-se com esta análise preliminar dos dados que a simples modelação do terreno por meio de *TIN* considerando apenas os dados de batimetria e contorno do reservatório não são capazes de fazer uma boa representação do antigo leito dos rios que compõe o reservatório, sendo subestimado o cálculo do volume.

É também apontado que a largura do trecho do reservatório desempenha papel de grande importância na modelação de terrenos aplicada a batimetria de reservatórios, sendo que esta variável deve ser considerada durante a determinação do espaçamento entre seções de levantamento batimétrico.

Desta forma a presente pesquisa propõe um método para a definição de espaçamento entre seções de levantamento batimétrico visando minimizar os problemas da modelação em águas rasas e trechos estreitos do reservatório e também um tratamento de dados para a modelação do terreno que considere as características dos canais de drenagem que compõe o reservatório

6.1.3. Proposta de método de determinação de espaçamento entre seções

Baseado na análise dos dados volumétricos, nos MDTs originados pelos métodos propostos pela literatura e pela experiência da equipe do Núcleo de Hidrometria buscou-se a definição de um método execução de levantamentos batimétricos que produza dados de volume mais fiéis a realidade sem demandar excessivo trabalho de campo.

Propõe-se que a definição do espaçamento entre seções deva se realizar baseada na largura de trechos específicos do reservatório, baseado em dois critérios:

- Largura superior a 1.000m: espaçamento padrão deve ser de aproximadamente 500m, apenas em poucos casos chegando à 750 m devido à forma do contorno do reservatório. Estes espaçamentos são sugeridos por terem apresentado desvios do cálculo de volume inferior a 1%. O espaçamento de 750m deve ser utilizado com cautela e somente para algumas seções do reservatório, com o único objetivo de diminuir o trabalho de campo.
- Largura inferior a 1.000m: foi definido espaçamento entre as seções correspondente a aproximadamente metade da largura do trecho do reservatório, minimizando a possibilidade de geração de triângulos planos e proporcionando boa conectividade entre os dados da batimetria.

A disposição das seções de levantamento deve ser baseada na divisão do reservatório em compartimentos, estes o mais homogêneos possível. Para cada compartimento deve ser identificado um perfil longitudinal e neste perfil que será medido o espaçamento entre cada seção, estas dispostas transversalmente.

Em trechos de curvas acentuadas no reservatório é aconselhado a definição de um novo compartimento, para trechos pouco sinuosos vale a regra do espaçamento definido no perfil longitudinal, sendo as seções dispostas como um leque.

A fase posterior ao planejamento das seções batimétricas é o levantamento de dados em campo, seguido das correções de dados anômalos, correção da velocidade do som e do nível operacional do dia da coleta de dados. A abordagem sobre estes processos não é o tema central da pesquisa não sendo então tratados a fundo, sendo estes abordados brevemente ao longo do estudo de caso da UHE Chavantes (SP).

6.1.3.1. Resultados e análise

De forma análoga à apresentação dos resultados no item 6.1.1 a Tabela 11 mostra o resumo dos resultados, expressando a diferença do volume calculado para cada método e o volume de referência. Foram elencados os métodos propostos na literatura que apresentaram melhores resultados para a análise do método proposto.

Tabela 11 – Diferença entre o volume calculado e o volume de referência.

	Diferença de Volume do MDT de Referência	Métodos			
		250m	500m	M & F (750m)	Proposta de Espaçamento
Completo	Absoluta[hm ³]	128,28	457,00	843,63	248,30
	Percentual	0,88%	3,14%	5,80%	1,71%
Braço 01	Absoluta[hm ³]	1,32	5,29	12,83	2,24
	Percentual	1,34%	5,37%	13,02%	2,28%
Braço 02	Absoluta[hm ³]	1,01	5,50	8,06	1,32
	Percentual	1,47%	8,01%	11,74%	1,92%
Braço 03	Absoluta[hm ³]	0,64	4,23	9,04	0,50
	Percentual	3,85%	25,70%	54,88%	3,01%
Braço 04	Absoluta[hm ³]	0,37	3,73	6,04	0,53
	Percentual	3,47%	35,39%	57,27%	5,01%

A análise do método proposto foi feita em comparação com os métodos apresentados pela literatura avaliados anteriormente que apresentaram melhores resultados, que foram espaçamentos de 250m, espaçamento de 500m e o método proposto por Moris & Fan (1997) com espaçamento de 750m.

Além da precisão associada ao volume calculado foi também realizada uma estimativa do tempo de execução do levantamento de dados em campo. Proporcionando uma análise da eficiência do método, ou seja, o tempo demandado no trabalho de campo e a precisão obtida.

O espaçamento de 500m apresenta um desvio para o reservatório completo superior a três vezes ao apresentado pelo espaçamento de 250m. Para o método de Moris & Fan este desvio é superior à seis vezes.

O método do espaçamento de 250m apresentou melhores resultados para todos os casos analisados, exceto para o compartimento Braço 03, no qual o método proposto apresentou menor diferença no cálculo do volume. Os piores resultados foram obtidos pelo método de Morris & Fan, o qual, para os compartimentos Braço 03 e Braço 04, apresentou desvio superior a 50%.

Já para o reservatório completo a distancia de 250m entre seções apresentou uma diferença de apenas 0,88%, o método proposto com espaçamento entre seções em função da largura média do trecho do reservatório apresentou uma diferença de 1,71%. O espaçamento de 500m diferença de 3,14% e o espaçamento de 750m apresenta para o mesmo caso 5,80% o que é aproximadamente 6 vezes superior ao melhor método.

A estimativa do tempo gasto no levantamento de dados para cada método é apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 – Estimativa do tempo gasto com levantamento de campo.

Método	Tempo estimado
250 m	120 dias
500 m	60 dias
Moris & Fan (750 m)	40 dias
Método Proposto	72 dias

Confrontando o método proposto com o método de espaçamento de 250m têm-se a redução de 48 dias do trabalho de campo, aproximadamente 40% do tempo. Já em comparação com o método de espaçamento de 500m o método proposto apresenta 12 dias a mais de coleta de dados.

Apesar da pouca diferença do cálculo de volume apresentada pelos espaçamentos de 500m e 750m para o reservatório inteiro (3,14% e 5,80% respectivamente), a análise dos métodos em trechos específicos mostra que ambos apresentam limitações na representação de trechos mais estreitos.

Desta forma avaliou-se positivamente o método, sendo eficiente quanto ao tempo de coleta de dados em campo e proporcionando pequenas diferenças no cálculo do volume, tanto para o reservatório inteiro como para seus braços.

6.1.4. Proposta de rotina para geração de MDT considerando características do talvegue

Esta rotina consiste em identificar as características dos talvegues sob a área alagada e utilizá-los na elaboração do MDT.

O primeiro passo é identificar sua localização. Caso existam dados cartográficos dos rios da região, estes podem ser utilizados como material de apoio. Caso não existam dados cartográficos anteriores ao enchimento do reservatório, deve-se identificar em cada seção de levantamento o ponto mais profundo, o qual corresponderá a localização do talvegue. Determina-se as coordenadas tridimensionais para o ponto, estas fornecidas pelo levantamento batimétrico. A cota nas regiões entre as seções de levantamento deve ser extrapolada por uma correlação linear.

Em rios de grande porte, nos quais é possível a identificação de um canal de drenagem bem definido sugerimos que seja feito não só a amostragem da cota de fundo do canal, mas também das cotas do limite do canal, aproximando para um perfil trapezoidal.

A simples inserção do talvegue na elaboração do MDT interfere na conectividade entre os dados batimétricos, passando estes a se conectarem também aos dados inseridos. Como correspondem a uma cota mais profunda que os dados batimétricos localizados além dos limites do talvegue dos rios, os dados de volume que seriam gerados apresentariam valores superestimados.

Deste modo, visando a preservação dos dados do modelo de terreno, são utilizados dados auxiliares, correspondentes a uma malha regular quadrática de pontos amostrada no MDT inicial nas áreas que não são influenciadas pelo talvegue. A densidade desta malha pode variar de acordo com as dimensões do reservatório e a capacidade de processamento de dados.

A partir dos dados da batimetria, do talvegue criado e dos dados auxiliares utilizados para a preservação da característica do terreno é gerado o MDT final que apresenta a continuidade do talvegue dos rios é gerado

6.1.4.1. Resultados e análise

As técnicas de processamento propostas foram aplicadas para os métodos encontrados na literatura, bem como para o método de determinação de espaçamento entre seções proposto por esta pesquisa no item 6.1.3. Foi utilizada a distância de 100m entre os pontos da malha auxiliar, densidades de pontos superiores a estas ocasionavam lentidão no processamento dos dados e mau funcionamento do programa e do computador.

A Tabela 13 e a Figura 24 apresentam os resultados como diferença percentual do cálculo do volume para cada método em relação ao volume do MDT de referência.

Tabela 13 – Diferença percentual do cálculo de volume sem utilizar e utilizando a rotina de geração de MDT considerando o Talvegue.

		Completo	Braço 01	Braço 02	Braço 03	Braço 04	Média	Melhora $1 - \left(\frac{\text{MédiaTrat.}}{\text{MédiaBruta}} \right)$
250.00	Bruto	0.88%	1.34%	1.47%	3.85%	3.47%	2.20%	22.97%
	Trat.	0.44%	0.78%	0.75%	1.27%	2.29%	1.11%	
500.00	Bruto	3.14%	5.37%	8.01%	25.70%	35.39%	15.52%	31.05%
	Trat.	1.77%	3.63%	4.67%	11.05%	20.43%	8.31%	
MF	Bruto	5.80%	13.02%	11.74%	54.88%	57.27%	28.54%	28.62%
	Trat.	3.61%	8.89%	5.19%	28.15%	32.51%	15.67%	
1000.00	Bruto	8.83%	17.34%	23.82%	59.38%	74.42%	36.76%	28.46%
	Trat.	5.90%	11.90%	16.12%	31.43%	45.01%	22.07%	
RESSAS	Bruto	12.01%	23.94%	31.18%	66.74%	79.20%	42.62%	25.34%
	Trat.	8.39%	17.49%	21.79%	36.53%	47.59%	26.36%	
1500.00	Bruto	14.39%	37.46%	43.69%	71.67%	77.94%	49.03%	20.44%
	Trat.	10.30%	28.39%	31.54%	40.27%	46.87%	31.47%	
Metade Largura	Bruto	1.71%	2.28%	1.92%	3.01%	5.01%	2.78%	8.94%
	Trat.	0.98%	1.91%	1.11%	1.82%	2.65%	1.69%	

Figura 24 – Melhoria na precisão do cálculo do volume utilizando o método de Geração de MDT considerando características do talvegue. Os dados correspondem à diferença percentual em relação ao volume do MDT de referência

O espaçamento de 500m foi o que apresentou em média os melhores resultados, já para o reservatório completo foi o método de 250m, onde a diferença percentual caiu pela metade.

Nota-se que para o reservatório como um todo, o método proposto proporciona uma melhora de aproximadamente um terço para todos os espaçamentos utilizados. A definição de distância entre seções proposta e o espaçamento de 250m são os únicos métodos a apresentarem diferença inferior a um ponto percentual em relação volume do MDT de referência.

Em todos os casos analisados (reservatório inteiro, Braço 1, Braço 2, Braço 3 e Braço 4) foi observada, em maior ou menor grau, melhora na qualidade dos dados de volume calculados. Acredita-se que a utilização deste método em outros reservatórios também proporcionará melhores resultados.

6.2. UHE Chavantes (SP) – Aplicação do método proposto

6.2.1. Planejamento das seções de levantamento

Como apontado pelo primeiro estudo de caso, a determinação de espaçamento fixo entre seções não atende da melhor maneira a modelação do terreno que será realizada no processamento dos dados. Pode-se também inferir que quanto mais heterogêneo for o reservatório menor a precisão alcançada com a utilização de espaçamentos fixos.

O método utilizado resultou em um total aproximado de 1720 seções de levantamento planejadas (Figura 25).

Figura 25 – Seções de levantamento de dados executadas no reservatório de Chavantes (SP).

Por experiências adquiridas, não se realizou o planejamento em trechos com larguras inferiores a 100 m, com isso o planejamento do percurso do barco foi feito no local. Isto se deve a estes trechos estarem geralmente associados às regiões com presença de árvores submersas e de bancos de macrófitas. Neste caso o levantamento de dados fica associado à possibilidade de navegação nestes trechos.

Uma dificuldade encontrada durante a execução das atividades foi a inconsistência da base cartográfica disponibilizada, sendo feita pelo próprio executor dos serviços cartográficos ressalvas e observações quanto à dificuldade da obtenção de dados confiáveis, afirmando que não havia sido possível a determinação com exatidão do sistema de referência das cartas topográficas utilizadas como base do serviço, sendo estas trabalhadas então em conjunto com cartas topográficas do IBGE e adotado o sistema das mesmas, Córrego Alegre, para posterior transformação em SAD 69. Faz ainda a ressalva para a presença de pequenas distorções no produto da digitalização das cartas e reafirma nas suas considerações finais o problema encontrado da inexistência de informações cartográficas do material utilizado.

A Figura 26 mostra o posicionamento do barco durante a coleta de dados de uma das seções de levantamento. Segundo esta imagem baseada no contorno fornecido, a embarcação estaria navegando “em terra firme”. A Figura 27 mostra a diferença entre o contorno fornecido e as imagens SPOT, após esta ser georreferenciada e passar pelas devidas transformações de sistema de referência.

Figura 26 – Tela do programa Survey do pacote HYPACK que mostra o posicionamento da embarcação em tempo real. Destaque para a embarcação em cinza navegando em região que segundo os dados fornecidos seria terra firme.

Figura 27 – Diferença entre o contorno fornecido e as imagens SPOT após as devidas transformações de sistema de referência

A determinação do contorno foi realizada através de imagens de satélite SPOT, com resolução de 2,5m. Seu sistema de referência é o SAD 69 com coordenadas UTM correspondentes ao fuso 22 S, meridiano central -51° e fator de escala 0,9996. A Figura 28 mostra o mosaico de imagens utilizado.

Figura 28 – Imagens SPOT utilizadas, destaque em vermelho para a localização do reservatório da UHE Chavantes (SP).

O primeiro cuidado tomado foi na padronização de um único sistema de referência para todos os dados utilizados. Como já exposto anteriormente, por se tratar do datum oficial que será único a partir de 2014, foi adotado o referencial SIRGAS 2000 para este trabalho. Os parâmetros de transformação entre SAD 69 e SIRGAS 2000 utilizados foram os mesmos já citados.

Segundo o site do SIRGAS (<http://www.sirgas.org/index.php?id=15> Acesso em 03/10/ 2011), o ITRF 2005 o qual opera as correções diferenciais do GPS é idêntico ao SIRGAS 2000, não sendo necessárias as aplicações de parâmetros do conversão.

A Figura 29 mostra para a diferença na localização de coordenadas planas quando utilizados sistemas de referência distintos sem a utilização de parâmetros de correção.

Figura 29 – Destaque para a diferença na localização de coordenadas planas quando utilizados sistemas de referência distintos sem a utilização de parâmetros de correção. Imagens SPOT coordenadas aproximadas 7449000N e 630500E, UTM 22S, SIRGAS 2000.

Feições como processos erosivos, construções, limites das culturas, etc. foram utilizados para a delimitação do contorno. O apoio do registro fotográfico, bem como os dados de posicionamento adquiridos no levantamento de campo mostraram-se de grande valia para sanar eventuais dúvidas sobre a localização dos limites do reservatório.

A Figura 30, Figura 31 e Figura 32 mostram alguns exemplos ao longo do reservatório com a delimitação do contorno.

Figura 30 – Detalhe do contorno baseado em processo erosivo.

Figura 31 – Detalhe do contorno baseado em obras.

Figura 32 – Detalhe do contorno baseado nos limites da cultura.

6.2.2. Levantamento de dados em Campo

No levantamento de dados foram utilizados os equipamentos anteriormente citados: receptor GPS modelo GS 20 da Leica Geosystems recebendo correções diferenciais via satélite disponibilizados pela OMNISTAR através do receptor 3000L da Fugro, associados ao ecobatímetro BATHY 500MF da SyQuest Inc. através do software HYPACK MAX. (Figura 15).

O posicionamento horizontal é fornecido pelo receptor GPS em formato de latitude e longitude, já o posicionamento vertical é obtido pelo ecobatímetro na forma de profundidade, sendo esta profundidade associada a um referencial altimétrico, sendo então transformada em cota.

Durante praticamente todo o levantamento foram observadas condições de PDOP favoráveis, inferiores a 2,0. Essa condição só não foi observada em algumas regiões como trechos do Rio Paranapanema, do Rio Itararé e regiões próximas à barragem. Estas regiões apresentam relevo bem acentuado, com elevadas encostas junto às margens do reservatório, o que atuou como um obstáculo para a observação de sinal GPS.

O referencial altimétrico adotado foi baseado no nível de montante do reservatório medido pelo posto de monitoramento linimétrico junto a barragem. A lâmina d'água em grandes reservatórios não é constante e igual a medida no barramento, de forma que esta deve ser corrigida.

Desta forma foram utilizados marcos topográficos existentes como apoio. Mediu-se o nível do espelho d'água no início e fim de cada campanha, o qual foi relacionado ao nível observado junto a barragem e feita uma extrapolação para os dias intermediários.

A calibração da velocidade do som utilizada pelo ecobatímetro foi feita diariamente através da técnica do “*bar-check*”, que consiste em colocar um anteparo a uma profundidade conhecida e então alterar a velocidade do som utilizada no aparelho até que esteja calibrada.

Nota-se que a partir de 6m de profundidade a velocidade do som tende a ser constante, provavelmente pelo fato de esta não ser tão suscetível a variações climáticas, como variação de temperatura da água de superfície e sua mistura causada pela turbulência gerada pelo vento. Sendo então realizado o “*bar-check*” até a profundidade de 10m.

Ao todo foram realizadas 3 campanhas de levantamento de dados em campo totalizando 37 dias de coleta de dados.

6.2.3. Tratamento dos Dados

Após o trabalho de campo, foi realizado o processamento das informações coletadas, com o objetivo de se analisar os dados obtidos e filtrar as informações necessárias à elaboração dos mapas com curvas de nível e à geração da CAV.

Os dados brutos das coordenadas geográficas e das profundidades adquiridos pelo GPS e ecobatímetro, respectivamente, são coletados pelo software HYPACK.

Existem modelos prontos de correção de dados de batimetria, mas que o próprio fabricante da HYPACK alerta no manual do usuário que este deve ser utilizado com muita cautela. A Figura 33 mostra uma seção com dados anômalos, após tratamento com o filtro automático e após tratamento manual.

Figura 33 – Exemplo de uma seção de seção com dados anômalos, após tratamento automático e manual.

A identificação das anomalias é feita a partir da análise do comportamento de dados imediatamente anteriores e posteriores. Nos filtros automáticos são adotados padrões fixos, como por exemplo um limite de desvio em relação a média dos valores de dados anteriores e posteriores ou então o valor da inclinação de uma reta determinada entre duas sondagens.

Geralmente em reservatórios cujo rio que o forma originalmente possui leito rochoso apresentam variações acentuadas em seu perfil, como grandes afloramentos rochosos, taludes com alta declividade e antigas cachoeiras submersas. Estas feições em filtros automáticos são interpretadas como anomalias e assumidas como erros, ao aplicar-se o filtro estas são “corrigidas”.

A origem de dados discrepantes está relacionada a diversos fatores, como o balanço do barco, perda de sinal GNSS, presença de vegetação de fundo, erro na paridade de dados entre ecobatímetro e GNSS, etc.

Por não existirem dados confiáveis anteriores ao levantamento, foram feitas análises individuais para cada seção, sendo o comportamento destas comparado a das seções de levantamento próximas, de forma a verificar a existência ou não de um padrão de comportamento da anomalia encontrada. Observações realizadas em campo sobre a coleta de dados também foram consideradas no momento da identificação de possíveis erros.

A Figura 34 mostra um exemplo de seção de levantamento, antes e após passar pelo tratamento dos dados.

Figura 34 - Exemplo de uma seção de levantamento apresentando. a) medidas discrepantes antes do tratamento; b) após o tratamento.

Ainda no HYPACK foi feita a correção da velocidade do som utilizando ferramenta específica do programa, *Sounding Adjustment*.

É comum, devido a alta taxa de aquisição de dados pelo ecobatímetro, a existência de dados redundantes. Desta forma, visando diminuir a quantidade de dados e conseqüentemente o esforço computacional de modelação associado, foi feito um processo para redução do número de sondagens.

Esse processo consiste na análise da proximidade entre as sondagens. Foi utilizado filtro de 1m de raio, passando de 1.869.659 pontos originalmente coletados para 893.649 pontos a serem processados.

Esses dados foram então exportados para arquivos de texto para que possam ser trabalhados no software Microsoft Excel e posteriormente no ArcView 9.3

No Microsoft Excel a profundidade foi transformada em cota altimétrica através do nível do reservatório fornecido pela contratante devidamente corrigido, como anteriormente explicado, e também a correção do *offset* do transdutor do ecobatímetro, que foi posicionado a 0,40m de profundidade da lâmina d'água.

6.2.4. Processamento dos Dados

Os dados previamente tratados foram transferidos para ambiente SIG no programa ArcView 9.3. e para a aplicação de técnicas de modelagem tridimensional de terrenos para a elaboração do modelo batimétrico do reservatório e elaboração de suas curvas CAV.

Como já abordado anteriormente, foi observado o problema da modelação de águas profundas, com dificuldade em se representar o talvegue. A Figura 35 apresenta duas áreas do reservatório de Chavantes onde a rotina de geração do MDT foi bem pronunciada.

Figura 35 – Exemplo rotina de geração do MDT considerando o talvegue. *a)* e *b)* Encontro do Rio Itararé com o Rio Paranapanema, grade TIN e MDT sem o emprego da rotina; *c)* e *d)* Encontro do Rio Itararé com o Rio Paranapanema, grade TIN e MDT após o emprego da rotina; *e)* e *f)* Trecho sinuoso no rio Itararé, grade TIN e MDT sem o emprego da rotina; *g)* e *h)* Trecho sinuoso no rio Itararé, grade TIN e MDT após o emprego da rotina.

Ao longo de todo o reservatório foram encontradas situações como estas, apontadas na Figura 35 anteriormente, não corrigir estas discontinuidades significaria criar um MDT que subestima os valores de volume calculados.

As regiões de águas rasas são notadamente de difícil navegação, devido à presença de macrófitas, objetos submersos (rochas e árvores), nível operacional do reservatório no dia do levantamento do dado e calado da embarcação. Desta forma que estas regiões efetivamente não possuem dados batimétricos coletados, sendo estes modelados a partir dos dados do contorno do reservatório e dos dados batimétricos em cotas inferiores.

Porém é comum a existência de regiões em que os dados coletados encontram-se demasiadamente afastados do contorno, passando este a ser o único dado utilizado para a interpolação nestas regiões, gerando assim regiões planas no relevo do reservatório.

Estas regiões foram identificadas e nelas foram criados dados auxiliares à criação do MDT, analogamente a criação do talvegue dos rios na correção de águas profundas, utilizando as sondagens mais próximas do triângulo plano.

O volume encontrado sem a utilização das correções é de $8.318,05 \text{ hm}^3$, já utilizando das correções o volume do reservatório encontrado é de $8.451,543 \text{ hm}^3$. A não utilização das correções subestima o volume do reservatório em $133,49 \text{ hm}^3$, isto representa 1,61% do volume total do reservatório, ou seja, sem o uso das técnicas de correção o assoreamento calculado seria superestimado. Em se tratando da área, as técnicas empregadas são um pouco menos significativas que para o cálculo de volume. Sem o emprego das técnicas a área encontrada é subestimada em 1,17%.

6.2.5. Criação das tabelas CAV

A partir do MDT gerado e corrigido através das técnicas descritas, foi elaborada a tabela que relaciona cota à área e a cota ao volume correspondente. Foram observadas profundidades que se estendem da cota 380,39m até a cota 474,00m.

Para a elaboração dos polinômios CAV foi feita uma redução dos dados, sendo utilizados dados de cota espaçados em 0,50m. Foi utilizado o programa MATLAB R2010a 7.10.0 para a cálculo da regressão polinomial.

A apresentação da CAV é feita através de uma tabela a qual utiliza dados extraídos diretamente do MDT produzido e também através das equações, estas geradas

por regressões matemáticas e que proporcionam dados aproximados dos reais observados.

Faz-se a ressalva que a representação da CAV através de uma equação remete as técnicas antigas aplicadas na elaboração de mapas topográficos/batimétricos. Na época da concepção deste conceito ainda não se encontravam disponíveis e de fácil acesso ferramentas matemáticas e computacionais capazes de realizar grandes processamentos, produzindo-se mapas com isolinhas altimétricas com intervalos entre cota na ordem do metro. Nessas condições a utilização de uma interpolação por equações matemáticas se fazia necessária para obtenção de dados da ordem de centímetros.

Porém, com a atual disponibilidade de softwares e modelos computacionais pode-se trabalhar com maior precisão sem demandar tamanho esforço como antigamente, de forma que é possível gerar dados de volume e área correspondentes em intervalos de cota na ordem do centímetro.

Baseado no exposto, acredita-se que a utilização de uma aproximação matemática frente a atual tecnologia e possibilidade de gerar tabelas CAV de intervalos de cota na ordem do centímetro não mais se justifica e em breve deverá cair em desuso, passando as tabelas CAV serem utilizadas.

Para este estudo de caso foi realizada a elaboração da curva CAV para apontar os desvios nos dados apresentados por esta técnica.

6.2.6. Resultados

A

Tabela 14 apresenta o resumo dos dados da curva CAV relacionando o volume referente a cada cota ao volume total apresentado pela cota 474,00m, cota máxima operacional do reservatório.

Tabela 14 – Resumo dos dados da curva CAV apresentados em relação ao volume máximo normal de operação.

Cota	Área [km²]	Área [%]	Volume [hm³]	Volume [%]
474,00	386,58	100,00%	8451,54	100,00%
470,00	339,54	87,83%	7019,71	83,06%
465,00	290,71	75,20%	5445,52	64,43%
460,00	244,17	63,16%	4108,39	48,61%
455,00	198,86	51,44%	3001,57	35,52%
450,00	158,13	40,90%	2110,68	24,97%
445,00	119,81	30,99%	1417,07	16,77%
440,00	83,23	21,53%	912,19	10,79%
435,00	53,14	13,75%	574,20	6,79%
430,00	33,25	8,60%	362,99	4,29%
425,00	21,63	5,60%	228,47	2,70%
420,00	14,88	3,85%	138,34	1,64%
415,00	10,16	2,63%	76,50	0,91%
410,00	6,16	1,59%	35,98	0,43%
405,00	3,22	0,83%	12,70	0,15%
400,00	1,01	0,26%	2,83	0,03%
395,00	0,12	0,03%	0,24	0,00%
390,00	0,01	0,00%	0,04	0,00%
385,00	0,00	0,00%	0,00	0,00%

A Tabela 15 apresenta os parâmetros da equação polinomial de 4 grau que relaciona cota x área (equação 03). A Tabela 16 mostra a comparação entre as áreas observadas e calculadas através da regressão matemática.

$$\text{Área} = a1.x^4 + a2.x^3 + a3.x^2 + a4.x + a5 \quad \text{Eq. 03}$$

Onde:

Área: Área [km²]

x: cota [m]

a_i : valores da tabela 10

Tabela 15 – Parâmetros da equação polinomial de quarto grau que relaciona cota X área.

a1	-0,0000164255528731821
a2	0,0284944815930273
a3	-18,4262071479528
a4	5268,20243169071
a5	-562237,272366801

Tabela 16 – Comparação entre as áreas observadas e as áreas obtidas pela regressão matemática.

Cota	Área Tabela [km ²]	Área Equação [km ²]	Diferença [km ²]	Diferença [%]
474,00	386,58	374,06	12,52	3,24%
470,00	339,54	336,69	2,85	0,84%
465,00	290,71	289,19	1,51	0,52%
460,00	244,17	242,37	1,80	0,74%
455,00	198,86	197,64	1,21	0,61%
450,00	158,13	156,18	1,95	1,23%

A Tabela 17 apresenta os parâmetros da equação polinomial de 4 grau que relaciona cota x volume (equação 04). A Tabela 18 mostra a comparação entre os volumes observados e calculadas através da regressão matemática.

$$Vol = v1.x^4 + v2.x^3 + v3.x^2 + v4.x + v5$$

Eq. 04

Onde:

Vol: Volume [hm³]

X: cota [m]

v_i : valores da tabela 6

Tabela 17 – Parâmetros da equação polinomial de quarto grau que relaciona cota X volume.

v1	0,000127396390870126
v2	-0,190651746064081
v3	106,375830565793
v4	-26202,7551065967
v5	2401364,74305165

Tabela 18 – Comparação entre os volumes observados e os volumes obtidos pela regressão matemática.

Cota	Volume Tabela [hm³]	Volume Equação [hm³]	Diferença [hm³]	Diferença [%]
474,00	8451,54	8507,01	-55,47	-0,66%
470,00	7019,71	6992,06	27,64	0,39%
465,00	5445,52	5384,66	60,86	1,12%
460,00	4108,39	4062,13	46,26	1,13%
455,00	3001,57	2990,71	10,86	0,36%
450,00	2110,68	2138,53	-27,84	-1,32%

6.2.7. Cálculo do Assoreamento

O cálculo do assoreamento foi baseado na comparação entre a tabela CAV atualmente utilizada e a gerada pelo levantamento batimétrico de 2011 (Tabela 19).

Tabela 19 – Cálculo do assoreamento baseado na comparação entre as CAV.

Cota	Volume [hm³]			
	CAV Utilizada	Batimetria 2011	Volume Assoreado [hm³]	Volume Assoreado [%]
474,00	8795,12	8451,54	343,58	3,91%
473,50	8596,61	8262,88	333,73	3,88%
473,00	8401,22	8078,10	323,12	3,85%
472,50	8208,94	7896,00	312,94	3,81%
472,00	8019,75	7716,32	303,43	3,78%
471,50	7833,63	7538,91	294,72	3,76%
471,00	7650,56	7363,67	286,89	3,75%
470,50	7470,54	7190,59	279,95	3,75%
470,00	7293,55	7019,71	273,84	3,75%
469,50	7119,56	6851,09	268,47	3,77%
469,00	6948,57	6684,94	263,63	3,79%
468,50	6780,55	6521,35	259,20	3,82%
468,00	6615,50	6360,32	255,18	3,86%
467,50	6453,39	6201,82	251,57	3,90%
467,00	6294,20	6045,76	248,44	3,95%
466,50	6137,93	5892,14	245,79	4,00%
466,00	5984,56	5740,91	243,65	4,07%
465,50	5834,07	5592,04	242,03	4,15%
465,00	5686,00	5445,52	240,48	4,23%

Realizando uma análise mais detalhada quanto a disposição do assoreamento podemos identificar que a maior parte do assoreamento se localiza no volume morto, correspondendo a 240,89 hm³, seguido do volume útil com 102,683 hm³

Se tratando de valores percentuais o compartimento mais comprometido também é o volume morto com 4,19% do seu volume assoreado, o volume útil possui

3,37% de seu volume assoreado a Tabela 20, a Tabela 21 e a Tabela 22 mostram resumidamente a situação do assoreamento para cada compartimento do reservatório e para o reservatório como um todo.

Tabela 20 – Resumo da situação do assoreamento do reservatório.

Volume Total do Reservatório segundo a CAV	
Utilizada	8795,118 hm ³
Volume Total do Reservatório segundo a Batimetria de 2011	
	8451,543 hm ³
Cálculo do assoreamento total do Reservatório	343,575 hm³
Volume do assoreamento [%]	3,91%

Tabela 21 – Resumo da situação do assoreamento compreendido no volume útil.

Volume de Assoreamento no Volume Útil segundo a CAV	
Utilizada	3044,522 hm ³
Volume de Assoreamento no Volume Útil segundo a Batimetria de 2011	
	2941,839 hm ³
Cálculo do assoreamento no Volume Útil do Reservatório	102,683 hm³
Volume do assoreamento [%]	3,37%

Tabela 22 – Resumo da situação do assoreamento compreendido no volume morto.

Volume de Assoreamento no Volume Morto segundo a CAV	
Utilizada	5750,596 hm ³
Volume de Assoreamento no Volume Morto segundo a Batimetria de 2011	
	5509,704 hm ³
Cálculo do assoreamento no Volume Morto do Reservatório	240,893 hm³
Volume do assoreamento [%]	4,19%

6.2.8. Estimativa de Vida Útil do Reservatório

A estimativa de vida útil do reservatório é baseada na taxa média anual de assoreamento que este recebe. Esta taxa pode ser obtida através de monitoramento hidrossedimentológico ou então através da relação entre o volume total assoreado e o tempo de operação do empreendimento.

Para a UHE Chavantes (SP) foi adotado como ano de referência 1970.

A taxa média anual de assoreamento corresponde à $8,380\text{hm}^3/\text{ano}$ correspondente a 0,095% do volume total do reservatório.

A vida útil do reservatório é estimada em 1050 anos.

Esta estimativa considera que as condições da bacia hidrográfica, bem como do entorno do reservatório sejam mantidas através dos anos. Esta estimativa deve ser atualizada a cada levantamento batimétrico realizado, bem como se basear também nos dados do monitoramento hidrossedimentométrico a ser implementado no reservatório.

6.2.9. Discussão do estudo de caso

Como mostrado nos itens 6.1.2 e 6.2.4 deste trabalho, a geração de MDTs sem nenhuma técnica de correção pode gerar dados não condizentes com a realidade, de modo que o emprego das técnicas de correção se faz necessário. Os resultados obtidos para a UHE Chavantes (SP) mostram que sem a utilização das rotina de geração de MDT considerando talvegue o cálculo do volume do reservatório seria subestimado em 1,61%, superestimando o cálculo do assoreamento.

É defendida a utilização de tabelas que relacionem Cota x Área x Volume no lugar de regressões matemáticas. As regressões por representarem o comportamento dos dados observados apresentam pequenos desvios. De modo que se a produção de uma tabela com intervalos de cota na ordem do centímetro for possível, esta deve ser utilizada no lugar da regressão matemática.

O volume e a área de superfície atual do reservatório foram determinados através de ferramentas de SIG, e estes foram comparados aos dados da tabela CAV existentes para a determinação do volume assoreado.

O maior volume de assoreamento absoluto encontrado está no volume morto seguido pelo volume útil.

O assoreamento total calculado corresponde à 343,575 hm³, em valores percentuais corresponde a 3,91% do volume fornecido pela tabela CAV atualmente utilizada. Considerando como data de referência o ano de 1970, temos a taxa média de assoreamento de 8,380 hm³/ano, ou 0,095% de perda de volume a cada ano.

Esta taxa encontra-se abaixo das médias mundial e brasileira, 1% e 0,5% (MAHMOOD, 1987 ¹³*apud* CARVALHO, 2000; Eletrobrás, 1992¹⁴ *apud* CARVALHO, 2000) ao ano respectivamente. Isto é justificado pelas condições da bacia hidrográfica e do contorno do reservatório.

A UHE Chavantes (SP) se localiza em uma região de baixa densidade demográfica, apresentando grande parte de seu entorno preservado.

Mais da metade das águas que afluem o reservatório são do rio Paranapanema, o qual possui barramentos a montante do reservatório, estes que servem como filtros para o sedimento carregado pelo rio. Durante as atividades de campo foram observadas águas muito límpidas neste rio, sendo facilmente visualizados objetos submersos a 5m de profundidade, caracterizando, portanto, baixo carregamento de sedimentos.

De acordo com as observações durante a coleta de dados os rios Verde e Capivara também apresentam águas límpidas. Já o ribeirão da Fartura aparentemente contribui com cargas de nutrientes ao reservatório, sendo identificado enorme banco de macrófitas e odor em suas águas.

O corpo d'água que aparentemente mais contribui para o assoreamento é o Itararé. Suas águas, de cor turva, apresentam nitidamente material em suspensão, e ao adentrar no reservatório alguns quilômetros as águas passam a ser límpidas, caracterizando assim uma região de depósito de sedimentos.

O reservatório da UHE encontra-se com pequena taxa de assoreamento, provavelmente devido as condições do uso e ocupação de sua bacia hidrográfica que é bem preservada, bem como a presença de barramentos a montante em seu principal contribuinte.

---

13 MAUMOOD, K. (1987), Reservoir sedimentation – impact, extend and mitigation. World Bank Tech. Paper N° 71. Washington, DC.

14 Eletrobrás – Centrais Elétricas Brasileiras (1992), Diagnóstico das condições sedimentológicas dos principais rios brasileiros. Relatório do IPH/UFRGS. Rio de Janeiro RJ.

7. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES GERAIS

Foram elencados por esta obra quatro classes de métodos de determinação de espaçamento entre seções batimétricos, sendo elas: definido em função da escala de representação do mapa; utilização de equações; espaçamento fixo; e em função da precisão no cálculo do volume.

Os métodos passíveis de aplicação foram então estudados utilizando para tal a simulação de dados batimétricos, a qual consiste numa adaptação do método proposto por Yuqian (1989). Esta simulação foi feita pela amostragem de dados de cota em um MDT de referência de perfis análogos ao percurso de um barco durante a coleta de dados batimétricos. Para tal, foi utilizado o estudo de caso do reservatório da UHE Três Irmãos (SP).

Os métodos analisados pela simulação correspondem a seções dispostas transversalmente ao reservatório igualmente espaçadas em 250m, 500m, 750m (Morris & Fan), 1000m, 1250m (RESSAS) e 1500m. Para cada método foram gerados novos MDTs utilizando modelagem TIN, calculados o volume correspondente e estes comparados ao MDT de referência, sendo analisados baseados na diferença do volume calculado.

Como esperado, quanto maior o espaçamento entre seções maior foi o erro associado ao cálculo do volume. Para espaçamento de 250m foi observado um desvio de 0,88% e para espaçamentos de 1500m o desvio observado foi de 14,39%.

Em análise preliminar, notou-se que a grade TIN gerada apresentava comportamentos distintos quando comparadas as regiões dos braços e do corpo principal. Foi então isolado o corpo central do reservatório e este analisado separadamente, gerando dados sem a interferência dos braços do reservatório.

A comparação entre os resultados obtidos para o corpo principal do reservatório e os resultados obtidos para o reservatório completo, apontam diferenças da ordem de três a quatro vezes menores entre o volume calculado para cada método e o volume de referência para o corpo principal, evidenciando o comportamento diferenciado em compartimentos distintos do reservatório.

Foram definidos compartimentos de estudo, quatro ao longo do corpo principal e quatro em braços do reservatório. Para cada compartimento definido foram

simulados os métodos expostos no início deste item. Esta abordagem permitiu um melhor entendimento dos processos envolvidos na modelação TIN que influenciam na precisão do MDT gerado, sendo esta fundamental na obtenção de dados conclusivos.

Duas singularidades distintas puderam ser notadas durante a elaboração do TIN, a representação dos talvegues do reservatório e a geração de triângulos planos nas regiões próximas as margens.

O processo de elaboração de um TIN pode ser definido de maneira simplificada como a interpolação linear entre os dados de maior proximidade formando superfícies triangulares. Em locais onde o canal de drenagem apresenta meandros ou se encontre disposto de maneira diagonal as seções batimétricas, os dados mais profundos de uma seção são interpolados com regiões mais rasas da outra seção, produzindo descontinuidades na representação do canal dos rios.

O outro problema encontrado refere-se às regiões mais rasas e estreitas do reservatório, como citado no parágrafo anterior, a elaboração do TIN em regiões com ausência de dados dispostos de maneira adequada proporciona a interpolação do contorno do reservatório entre si, gerando superfícies planas de cota correspondente a cota limite utilizada na modelação.

Ambos os problemas abordados, são traduzidos em dados de volume do reservatório subestimados. Em aplicações reais isto implica na superestimação do cálculo do assoreamento, podendo contribuir negativamente para imagem das concessionárias de energia ou mesmo embasar a decisão de investimentos em nova infra-estrutura do setor de energia erroneamente.

Baseados no estudo de caso e na experiência do Núcleo de Hidrometria da EESC - USP foi proposto um método de definição de espaçamento entre seções e uma rotina de tratamento dos dados durante a geração do MDT que fosse capaz de considerar e representar o talvegue do reservatório.

Na análise do corpo principal do reservatório observou-se um desvio no volume calculado inferior a 1% para os espaçamentos de 250m e 500m, 0,22% e 0,74% respectivamente. Para os compartimentos Principal 2 e Principal 3 o espaçamento de 750m (Morris & Fan) também apresentou desvios da mesma ordem, -0,41% e 0,79%. Estes foram os métodos escolhidos para ser realizada a análise dos métodos propostos por esta pesquisa.

O método de definição de espaçamento proposto é baseado em dois critérios tomando como base a largura do reservatório. Para regiões de largura superior à 1.000m o espaçamento proposto é de aproximadamente 500m, apenas em poucos casos chegando à 750 m objetivando diminuir o trabalho de campo e conseqüentemente os custos associados.

Para trechos de largura inferior a 1.000m foi definido espaçamento entre as seções correspondente a aproximadamente metade da largura do trecho do reservatório, minimizando a geração de triângulos planos e proporcionando boa conectividade entre os dados da batimetria.

O método que apresentou os melhores resultados para o reservatório inteiro foi o espaçamento de 250m, já o método proposto apresentou aproximadamente o dobro diferença, para o espaçamento de 500m mais do que o triplo e para o espaçamento de 750m superior a seis vezes o resultado do melhor método. Ressalta-se que em todos os métodos o desvio do volume calculado foi baixo, 5,80% para o maior espaçamento utilizado.

Em contrapartida aos bons resultados obtidos para o reservatório inteiro, ao analisar os braços separadamente o espaçamento de 750m produziu diferença superior a 50% do volume para dois dos compartimentos Braço 03 e Braço 04. Para os mesmos casos o espaçamento de 500m apresentou resultados com diferenças de aproximadamente 25% e 35%, respectivamente, evidenciando a dificuldade destes métodos em representar o relevo das regiões dos braços.

Foi também utilizado para avaliar os métodos o tempo de execução da coleta de dados em campo. Confrontando o método proposto com o método de espaçamento de 250m têm-se a redução de 48 dias do trabalho de campo, aproximadamente 40% do tempo. Já em comparação com o método de espaçamento de 500m o método proposto apresenta 12 dias a mais de coleta de dados.

Desta forma avaliou-se positivamente o método, sendo eficiente quanto ao tempo de coleta de dados em campo, proporcionando pequenas diferenças no cálculo do volume e sendo capaz de representar com boa fidelidade o relevo dos braços do reservatório.

Foi proposta uma rotina de tratamento dos dados durante a geração do MDT capaz de considerar e representar o talvegue do reservatório. Esta rotina foi aplicada

para os métodos encontrados na literatura, bem como para o método de determinação de espaçamento entre seções proposto.

Para todos os casos analisados foi observada melhora na qualidade dos dados de volume calculados. Para o reservatório inteiro a diferença mais significativa correspondeu ao espaçamento de 250m, onde a diferença percentual caiu pela metade, pôde-se notar também que o método proposto proporcionou em média uma melhora de aproximadamente um terço para os demais espaçamentos utilizados. Acredita-se que a utilização desta rotina na geração de MDT em outros reservatórios também proporcionará melhora nos resultados.

Destaca-se assim que tanto o método de determinação de espaçamento entre seções, como a rotina para geração de MDT considerando características do talvegue proposta nesta pesquisa, apresentaram para o estudo de caso da UHE Três Irmãos (SP) significativa melhora na produção dos dados de volume em menor tempo que os métodos tradicionalmente propostos.

Pelos bons resultados obtidos pelas simulações e por acreditar-se que estes métodos podem ser aplicáveis em outros reservatórios e apresentar bons resultados, estes foram aplicados em um levantamento batimétrico real, correspondente ao segundo estudo de caso desta pesquisa, o reservatório da UHE Chavantes (SP).

A idéia inicial era utilizar-se da simulação dos dados batimétricos para avaliar qual seria a precisão do levantamento a ser realizado, mas não foram encontrados dados do reservatório anteriores ao seu enchimento. Porém, acredita-se que a precisão do levantamento realizado seja da mesma ordem da apresentada no estudo de caso da UHE Três Irmãos (SP).

De maneira geral a aplicação dos métodos foi avaliada como positiva. Poucas regiões do reservatório apresentaram triângulos planos, e ao considerar a drenagem na geração do MDT temos o volume calculado inferior ao volume sem considerar a drenagem, apontando que a não utilização desta técnica subestimaria em 1,61% o volume do reservatório, superestimando o cálculo do assoreamento.

Aponta-se que a representação dos dados CAV por equações matemáticas apresentam desvios dos dados obtidos diretamente do MDT gerado. Esta forma de representação era justificada pela não disponibilidade no passado de técnicas e capacidade de processamento de dados de modelos tridimensionais de terrenos. Hoje, com a atual tecnologia é possível a geração de dados de volume em intervalos de cota

da ordem do centímetro. De modo que se a produção de uma tabela com intervalos de cota na ordem do centímetro for possível, esta deve ser utilizada no lugar da regressão matemática.

O assoreamento total calculado corresponde à 343,575 hm³, em valores percentuais corresponde a 3,91%. A taxa média de assoreamento encontrada é de 8,380 hm³/ano, em valores percentuais isto representa 0,095% de perda de volume do reservatório a cada ano, valores estes abaixo das médias mundial e brasileira.

Ante ao anteriormente exposto destaca-se que os objetivos específicos do trabalho foram alcançados. Sendo destacado papel da simulação de dados batimétricos adaptada do método de Yuqian (1989) como importante ferramenta na análise e estudos dos métodos propostos na literatura, os quais foram a base para a elaboração do método de determinação de espaçamento entre seções proposto e da rotina para geração de MDT considerando características do talvegue.

Acredita-se que esta pesquisa possa vir a contribuir significativamente para os estudos realizados pelas concessionárias de energia e pelos órgãos competentes na definição de um método padrão para levantamentos batimétricos. Não somente pelo método de determinação de espaçamento de seções ou do tratamento dos dados aqui propostos, mas sim pela técnica utilizada para ser feita a avaliação dos métodos.

Acredita-se também que os métodos aqui propostos podem ser aplicados em outros reservatórios, apresentando precisão do cálculo de volume da mesma ordem da alcançada no estudo de caso. Porém é sugerido que seja utilizada a técnica de simulação de dados batimétricos aqui apresentada sempre que possível para a determinação do planejamento e espaçamento entre seções de levantamento de dados e determinação da precisão do levantamento que será realizado.

Ao longo da revisão de literatura foram abordados os temas apresentados como objetivos secundários, sendo feita uma análise de obras da literatura nacional, desenvolvido um quadro histórico da criação e estruturação dos órgãos nacionais competentes ao tema de hidrossedimentologia (ANA, ANEEL e CPRM), da legislação pertinente ao tema de monitoramento hidrossedimentológico, bem como uma breve análise da legislação vigente.

8. RECOMENDAÇÕES

O tema de assoreamento de reservatórios de hidrelétricas tomou grande importância no cenário nacional nos últimos anos. Concessionárias de energia, bem como os órgãos competentes, têm trabalhado na elaboração de um método padrão para a realização de levantamentos batimétricos, de modo que o momento atual é propício para a realização de estudos no tema.

Como principal recomendação para trabalhos futuros é sugerida a replicação das técnicas de simulação de dados batimétricos para a análise de consistência dos métodos encontrados na literatura e dos métodos propostos para outros estudos de caso. Proporcionando assim uma gama de informações que possam embasar um estudo de consistência dos métodos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA (2009), *Manual de Estudos de Disponibilidade Hídrica para Aproveitamentos Hidrelétricos*. Manual do Usuário. 43p.
- ANEEL (2011a), *Banco de Informação de Geração*, Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp> Acessado em 06/05/2011.
- ANEEL (2011b), *Banco de Informação de Geração*, Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=5&fase=3> Acessado em 06/11/2011.
- ANEEL (2011c), *A ANEEL: Memória*, Disponível em <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=8&idPerfil=3> Acessado em 08/05/2011.
- ANEEL, Resolução 396: Estabelece as condições para implantação, manutenção e operação de estações fluviométricas e pluviométricas associadas a empreendimentos hidrelétricos. Brasília, 4 de Dezembro de 1998.
- BRANCO, S.M.; ROCHA, A. A., *Poluição, Proteção e Usos Múltiplos de Represas*, Editora Edgard Blucher/CETESB, São Paulo, 1977.
- BRASIL Decreto-Lei nº 689: Extingue o Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica, do Ministério das Minas e Energia, e dá outras providências. Brasília, 18 de Julho de 1969.
- BRASIL, Decreto – Lei 1.285: Cria o Conselho Nacional de Águas e Energia, define suas atribuições e dá outras providências. Rio de Janeiro, 18 de Maio de 1939.
- BRASIL, Decreto 2.335: Constitui a Agência Nacional de Energia Elétrica -ANEEL, autarquia sob regime especial, aprova sua Estrutura Regimental e o Quadro Demonstrativo dos Cargos em Comissão e Funções de Confiança e dá outras providências. Brasília, 6 de Outubro de 1997.
- BRASIL, Decreto 24.643: Decreta o Código de Águas. Rio de Janeiro, 10 de Julho de 1934.

BRASIL, Decreto 3.867: Regulamenta a Lei no 9.991, de 24 de julho 2000, que dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, 16 de Julho de 2001.

BRASIL, Decreto 91.145, Cria o Ministério do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente, dispõe sobre sua estrutura, transferindo-lhe os órgãos que menciona, e dá outras providências. Brasília, 15 de Março de 1985.

BRASIL, Decreto nº 63.951: Aprova a estrutura básica, do Ministério das Minas e Energia. Brasília, DF, 31 de Dezembro de 1968.

BRASIL, Decreto-Lei 764: *Autoriza a constituição da sociedade por ações Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - C.P.R.M. dá outras providências. Brasília, 15 de Agosto de 1969.*

BRASIL, Lei ° 9.984 : Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Brasília, DF, 17 de Julho de 2000.

BRASIL, Lei 10.295: Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Brasília, 17 de Outubro de 2001.

BRASIL, Lei 10.438: Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nº 9.648, de 27 de maio de 1998, nº 3.890-A, de 25 de abril de 1961, nº 5.655, de 20 de maio de 1971, nº 5.899, de 5 de julho de 1973, nº 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. Brasília, 26 de Abril de 2002.

BRASIL, Lei 3.890-A: Autoriza a União a constituir a empresa Centrais Elétricas Brasileiras S. A. - ELETROBRÁS, e dá outras providências. Brasília, DF, 25 de Abril de 1961.

BRASIL, Lei 4.904: Dispõe sobre a organização do Ministério das Minas e Energia, e dá outras providências. Brasília, DF, 20 de Dezembro de 1965.

BRASIL, Lei 6.938: Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, 31 de Agosto de 1981.

BRASIL, Lei 7.735: Dispõe sobre a extinção de órgão e de entidade autárquica, cria o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis e dá outras providências. Brasília, 22 de Fevereiro de 1989.

BRASIL, Lei 7.990: *Institui, para os Estados, Distrito Federal e Municípios, compensação financeira pelo resultado da exploração de petróleo ou gás natural, de recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica, de recursos minerais em seus respectivos territórios, plataformas continental, mar territorial ou zona econômica exclusiva, e dá outras providências. Brasília, 28 de Dezembro de 1989.*

BRASIL, Lei 8.987: Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências.. Brasília, 13 de Fevereiro de 1995.

BRASIL, Lei 9.427: Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. Brasília, 26 de Dezembro de 1996.

BRASIL, Lei 9.433: 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. Brasília, 8 de Janeiro de 1997.

BRASIL, Lei 9.984: Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Brasília, 17 de Julho de 2000.

- BRASIL, Lei 9.991: Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, 24 de Julho de 2000.
- BRASIL, Lei nº 3.782: Cria os Ministérios da Indústria e do Comércio e das Minas e Energia, e dá outras providências. Brasília, DF, 22 de Julho de 1960.
- BRASIL, Lei nº 8.490: Dispõe sobre a organização da Presidência da República e dos Ministérios e dá outras providências. Brasília, 19 de Novembro de 1992.
- BRASIL, *Lei nº 8.970: Transforma a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) em empresa pública e dá outras providências.* Brasília, 28 de Dezembro de 1994.
- BRASIL, Portaria nº 234: Aprova o regimento interno do Departamento de Águas e Energia Elétrica. Brasília, 17 de fevereiro de 1977.
- CABRAL, J. B. P. Estudo do processo de assoreamento em reservatórios. Caminhos de Geografia, 6. (14)62-69. Fev. 2005.
- CACHAPUZ, P. B. B. (1990), Debates parlamentares sobre energia elétrica na Primeira República: o processo legislativo. Rio de Janeiro: Memória da Eletricidade.
- CARVALHO, N. O. (1999), *Reservoir Sedimentation Effects on Hydropower Generation – A Case Study*, 28th IAHR Biennial Congress Proceedings, Graz, Austria.
- CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. (2000 a), *Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios*. Brasília: ANEEL. 140p.
- CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. (2000 b), *Guia de Práticas Sedimentométricas*, Brasília: ANEEL, 154p.
- CARVALHO, N. O. (1994), *Hidrossedimentologia Prática*. CPRM, ELETROBRÁS. Rio de Janeiro, RJ.

- CARVALHO, N. O. (2008), *Hidrossedimentologia Prática*, 2ª Edição, Rio de Janeiro-RJ, Editora Interciência.
- CARVALHO, N. O. (2000), *Reservoir Sedimentation Effects on Hydropower Generation – A Case Study*, 28th IAHR Biennial Congress Proceedings, Graz, Austria.
- CEMIG – Companhia de Eletricidade de Minas Gerais S.A. (1965), *Manual de Hidrometria-Sedimentometria*, Belo Horizonte, MG.
- COIADO, E.M. (2001) “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, p. 395-426.
- COLE, J.J., PRAIRIE, Y.T., CARACO, N.F. *et al* (2007), Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget. *Ecosystems* 10(1):172-185.
- CORRÊA FILHO, C. R. R.; ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F.; SIMIONATO, J. L. A.; MANGILE, F. (2005), “*Levantamento Batimétrico de um Grande Reservatório formado por barragem utilizando a sonda Acoustic Doppler Profiler*” – ADP, XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- CPRM, Serviço Geológico do Brasil: Apresentação, 2008a. Disponível em http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?UserActiveTemplate=cprm_layout&sid=59 Acessado em 13/05/2011.
- CPRM, Serviço Geológico do Brasil: Recursos Hídricos – Recursos Hídricos Superficiais, 2008b. Disponível em http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?UserActiveTemplate=cprm_layout&sid=34 Acessado em 13/05/2011.
- DEAN, W.E. & GORHAN, E (1998), Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands. *Geology* 26(6): 535-538.

- DELELLO, D. (2008), *Composição e distribuição (espacial e temporal) de macrófitas aquáticas no Reservatório do Lobo (Broa), Itirapina/Brotas, SP.*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- DUKE ENERGY (2011a), Usinas: Chavantes, Disponível em http://www.duke-energy.com.br/usinas/uhe_chavantes.asp acessado em 05/09/2011.
- DUKE ENERGY (2011b), Usina Chavantes (CHV): Informações Gerais do Aproveitamento, Disponível em http://www.duke-energy.com.br/usinas/informacoestecnicas/pop_chavantes.asp acessado em 05/09/2011.
- EMMERICH, W. & MARCONDES, M.A.P. (1975), *Algumas Características do Manejo de Bacias Hidrográficas*. São Paulo. (Boletim técnico IF).
- ESTIGONI, M. V.; KUWAJIMA, J. I.; MIRANDA, R. B.; MAUA, F. F. (2011), *Análise técnica da legislação e normas sobre estuários hidrossedimentométricos em empreendimentos hidrelétricos*, XIV World Water Congress, Porto de Galinhas, PE.
- ESTIGONI, M. V.; MATOS, A. J. S.; KUWAJIMA, J. I.; MAUA, F. F. (2010b), *Métodos de Levantamentos Batimétricos em Reservatórios segundo a Literatura Nacional*, IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Brasília, DF, Brasil.
- ESTIGONI, M. V.; MATOS, A. J. S.; MAUA, F. F. (2010a), *Caparison Between two Bathymetric Survey methods to estimate sediment acumulation in the lobo Reservoir*, Brisbane, QLD, Australia, Australi's National Water Conference and Exhibition – Ozwater'10.
- ESTIGONI, M. V.; MATOS, A. J.; PIOLTINE, V.; ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F. (2009), *Comparação de Diferentes Batimetrias do Reservatório da Usina Hidroelétrica do Lobo*, XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande, MS.
- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, *Review of World Water Resources by Country*, Rome Italy, 2003.

- FELGUEIRAS, C. A. & GOODCHILD, M. F. (1995), *An Incremental Constrained Delaunay Triangulation*, Technical Report 95-2, National Center for Geographic Information and Analysis, Califórnia, EUA.
- FERRARI, R.; COLLINS, K. (2006), *Reservoir Survey and Data Analysis*, In *Erosion and Sedimentation Manual*, U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver – Colorado, USA.
- FIPAI – Fundação para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial (2005), *Previsão do assoreamento de reservatório formados por barragens. Estudo dos 10 (dez) reservatórios da AES Tietê: Barra Bonita, Bariri, Ibitinga, Promissão, Nova Avanhandava, Água Vermelha, Caconde, Euclides da Cunha, Limoeiro e Mogi-Guaçu*. Relatório técnico. São Carlos, SP.
- FIPAI – Fundação para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial (2009), *Estudo do Assoreamento do reservatório formado pela barragem da UHE Três Irmãos*. Relatório técnico. São Carlos, SP.
- FURNANS, J. & AUSTIN, B. (2008), Hydrographic survey methods for determining reservoir volume, *Environmental Modelling & Software*, vol 23, pag. 139 – 146.
- GARCEZ, L. N. (1967), *Hidrologia*, São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda..
- GAVIÃO, A. B.; REIA, A. C.; SILVA, B. J. (2003), O uso compartilhado da águas – a necessidade de integração operacional, *BAHIA ANÁLISE & DADOS*, Vol 13, N° Especial, p 403 – 409.
- GUIMARÃES, L. J. R. (2008), Levantamento das áreas potenciais ao assoreamento da Barragem Piraquara I. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Paraná – Setor de Ciências da Terra. Curitiba.
- ICOLD – International Commission on Large Dams Bulletin 67 (1989) – Sedimentation control of reservoirs / Maîtrise de l’alluvionnement des.
- JAKUBAUSKAS & de NOYELLES, *Methods for Assessment of Sedimentation in Reservoirs*, palestra apresentada na University of Kansas, Lawrence, 2007.

- KIDNER, D. B. *et al* (2000), Multiscale Terrain and Topographic Modelling with the Implicit TIN, *Transactions in GIS*.
- LIMA, G.; BOLDRIN, R. S.; CASTRO, M. A. S. ; SOUZA, M. P. ; MAUAD, F. F. (2005), *Critérios técnicos para outorga de direito de uso de recursos hídricos*. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa. Anais do Simpósio da ABRH. João Pessoa : ABRH. v. 1.
- LIMA, J. E. F. W.; SANTOS, P. M. C.; CARVALHO, N. O.; SILVA, E. M. (2003), *Fluxo De Sedimentos Em Suspensão Na Bacia Araguaia-Tocantins*, XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba – PR.
- MACHADO, C. J. S. *et al* (2004), “*Gestão de Águas Doces*”, Rio de Janeiro: Interciência.
- MAIA, A.G. (2006) “As conseqüências do assoreamento na operação de reservatórios formados por barragens” 273 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, EESC – USP, São Carlos, SP.
- MAIA, A. G. & VILLELA, S. M. (2009), Análise do assoreamento do reservatório de Promissão através do modelo RESSASS, *Ambiência* (UNICENTRO), v. 5, p. 247 – 262.
- Marinha do Brasil, *NORMAM 25* (2011) – *Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos*, Brasil.
- MATOS, A. J. S.; ESTIGONI, M. V.; MAUAD, F. F. (2011), *Variação de volume calculado em grandes reservatórios utilizando diferentes metodologias de levantamentos Batimétricos*, XIV World Water Congress, Porto de Galinhas, PE.
- MAUAD, F. F.; CAMARGO, A. A. B.; ARANTES, D. M.; ESTIGONI, M. V.; KUWAJIMA, J. I., ANTONIO FILHO, W. (2011), *Modelo Piloto para Levantamentos Batimétricos em Reservatórios: UHE Chavantes*, Fundação para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento industrial – FIPAI. Relatório Técnico. São Carlos – SP.

- MIRANDA, R. B. (2011), *A influência do assoreamento na geração de energia hidrelétrica: estudo de caso na usina hidrelétrica de Três Irmãos – SP*, Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, EESC – USP, São Carlos, SP.
- MIRANDA, R. B.; MAUA, F. F.; MATOS, A. J. S.; ALBERTIN, L. L. (2009), *A Relevância dos Estudos Sedimentológicos e da Aplicação de Modelos de Rede de Fluxo na Geração de Energia Hidrelétrica*, IX SEREA - Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua. Valencia (España), 24-27.
- MORRIS & FAN (1997), *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use*. Editora McGraw-Hill, New York.
- PAIVA, J. B. D. & PAIVA, E. M. C. D. (2003), *Hidrologia Aplicada a Pequenas Bacias Hidrográficas*, Porto Alegre: ABRH.
- PINTO, N. L. S. *et al* (1976), *Hidrologia Básica*, São Paulo: Editora Blücher.
- Plano Estadual de Recursos Hídricos – Estado de São Paulo 2004/2007*: São Paulo: Consórcio JMR-ENGEORPS, 2004
- PREFEITO, L. F. B.; CORREA FILHO, C. R. R.; ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F. (2005), *Os Desafios do Setor Elétrico Brasileiro*, XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa – PB.
- RESSAS (2001), *Measuring and Predicting Reservoir Volume Changes due to Sedimentation*. Manual de software. Wallinford.
- RIBEIRO, J. C., SALOMÃO, F. X. T. (2001), *A Morfopedologia aplicada ao Diagnóstico e Prevenção dos processos Erosivos Lineares da bacia hidrográfica do Alto rio da Casca*, VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia – GO.
- RIGHETTO, A. M. (1998), *Hidrologia e Recursos Hídricos*, São Carlos: EESC – USP.
- SANTOS, *et al* (2001), *Hidrometria Aplicada*, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, PR.

- SERIGNOLLI, P. P. G., Histórico da legislação hídrica no Brasil, Blog do escritório Serignolli Advogados Associados disponível em: <http://serignolli.wordpress.com/2009/10/30/historico-da-legislacao-hidrica-no-brasil/> Acesso 23/05/2011.
- SIGRH (2000) – *Relatório de Situação dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo*, 06/2000 – Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br> Consultado em 09/2007
- SIMONS, D.B. & SENTURK, F. (1992), *Sediment transport technology: Water and sediment dynamics*, Water Resources Publications, 897p., Denver, Colorado.
- STERNBERG, R. (2006), *Damming the River: a changing perspective on altering nature*, Journal of Renewable & Sustainable Energy Reviews, V 10, Issue 3.
- SWIERZOWSKI & GODLEWSKA (2001), *Effects of Hydropower Plant Activities on Fish Population, Abundance and Distribution*, Archives of Polish Fisheries, Vol. 9, Fasc. 2.
- SYQWEST INCORPORATED (2006), *BATHY-500MF Survey Echo Sounder Manual*.
- TWDB – Texas Water Development Board (2008), *Standard Charges for Volumetric Surveys*, Disponível em <http://www.twdb.state.tx.us/assistance/lakesurveys/surveycharges.asp> Acesso em 13/02/2012
- TRANVIK, L.J., DOWNING, J.A., COTNER, J.B. *et al* (2009), Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*. 54(6), part2: 2298-2314.
- TUCCI, C. E. M. (2001), *Hidrologia – Ciência e Aplicação*, 2ª Edição, UFGRS: ABRH.
- U.S. Army Corps of Engineers (2004), *Engineering and Design. Hydrographic Surveying*, Washington, DC.
- VANONI V. A. (1977), *Sedimentation Engineering*. ASCE, American Society of Civil Engineers. New York, NY, USA.

VILLELA, S. M. & MATTOS, A. (1975), *Hidrologia Aplicada*, São Paulo, McGraw-Hill do Brasil.

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

YUQIAN, L. (1989), *Manual on operational methods for the measurement of sediment transport*. Geneva: WMO.

<http://www.cesp.com.br> Acesso em 5/4/2008.

<http://www.duke-energy.com.br> Acesso 03/06/2011

<http://www.eln.gov.br> Acesso 03/06/2011

<http://www.esri.com> Acesso em 15/8/2009.

<http://www.furnas.com.br> Acesso 03/06/2011

<http://www.hypack.com> Acesso em 8/7/2009.

<http://www.ilec.or.jp/database/sam/dsam01.html> Acesso em 4/6/2009.

<http://www.itaipu.gov.br> Acesso 03/06/2011

<http://www.leica-geosystems.com> Acesso em 10/7/2009.

<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/levantamentoshidrograficos/levanta.html> Acesso em 13/07/2011

<http://www.sigrh.sp.gpv.br> Acesso em outubro de 2011

<http://www.sirgas.org/index.php?id=15> Acesso em 03/10/ 2011.

<http://www.syqwestinc.com> Acesso em 10/7/2009.