



ANTONIO HENRIQUE SOARES DUTRA GOMES PEREIRA

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE DADOS DE
CAMPO NA MODELAGEM NUMÉRICA
HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL: ESTUDO DE CASO
NA AHE DE BARRA BONITA-SP.**

**Campinas - SP
2015**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO.

ANTONIO HENRIQUE SOARES DUTRA GOMES PEREIRA

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE DADOS DE
CAMPO NA MODELAGEM NUMÉRICA
HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL: ESTUDO DE CASO
NA AHE DE BARRA BONITA-SP.**

Orientador: Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO ANTONIO HENRIQUE SOARES DUTRA GOMES PEREIRA E ORIENTADO PELO PROF. DR. TIAGO ZENKER GIRELI.

ASSINATURA DO ORIENTADOR(A)

Campinas - SP
2015

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

P414a Pereira, Antonio Henrique Soares Dutra Gomes, 1985-
Avaliação da aplicabilidade de dados de campo na modelagem numérica
hidrodinâmica bidimensional : estudo de caso na AHE de Barra Bonita-SP. /
Antonio Henrique Soares Dutra Gomes Pereira. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Tiago Zenker Gireli.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Hidrodinâmica. 2. Transporte de sedimentos. 3. Reservatórios - Barra Bonita
(SP). 4. Modelos numéricos. I. Gireli, Tiago Zenker, 1980-. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.
III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Evaluation of the applicability of field data in two-dimensional hydrodynamic modeling : case study of the reservoir of the dam in Barra Bonita-SP.

Palavras-chave em inglês:

Hydrodynamic

Sediment transport

Reservoirs - Barra Bonita (SP)

Numerical models

Área de concentração: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Tiago Zenker Gireli [Orientador]

Alberto Luiz Francato

Frederico Fábio Mauad

Data de defesa: 04-02-2015

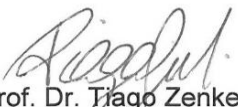
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

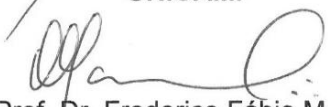
**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE DADOS DE
CAMPO NA MODELAGEM NUMÉRICA HIDRODINÂMICA
BIDIMENSIONAL: ESTUDO DE CASO NA AHE DE BARRA
BONITA-SP.**

Antonio Henrique Soares Dutra Gomes Pereira

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:


Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli
Presidente e Orientador/UNICAMP


Prof. Dr. Alberto Luiz Francato
UNICAMP


Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad
USP

Campinas, 04 de Fevereiro de 2015.

RESUMO

Os cursos fluviais são regidos por diversos fenômenos físicos que interagem influenciando as características hidromorfodinâmicas do escoamento. O transporte de sedimentos é um destes fenômenos e interfere no equilíbrio dinâmico de um rio, isto é, numa situação estável do curso d'água, material sólido é carregado e depositado sem que sejam percebidas alterações significativas nas formas fluviais. Este equilíbrio pode ser alterado por vários motivos, sendo frequente ocorrer após a construção de barramentos transversais ao curso d'água que tenham por finalidade acumular água para múltiplos usos. Um dos principais impactos associados a estas obras de infraestrutura é a diminuição drástica da capacidade de transporte do escoamento a montante e da vazão sólida a jusante. Tal processo se encontra em evolução no reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Barra Bonita localizada no rio Tietê, no estado de São Paulo, sobretudo no trecho de remanso. O objetivo desta pesquisa é verificar a aplicabilidade dos dados de campo na modelagem hidrodinâmica do reservatório da UHE de Barra Bonita-SP. Avalia-se a qualidade das informações para o processo de modelagem numérica por meio de simulações computacionais e comparações entre levantamentos de campo. Desenvolveu-se o estudo utilizando dados de batimetria e hidrológicos, ferramenta computacional específica para modelagem da hidráulica de escoamentos livres e levantamentos topográficos expeditos. Verificou-se a necessidade de executar levantamentos de dados de campo que tenham por objetivo gerar bases de dados para aplicação em modelagem hidrossedimentológica, isto é, é necessário que a coleta de dados seja feita com maior rigor e maior nível de detalhamento visando utilizá-los tanto para fins de navegação e monitoramento e operação de aproveitamentos hidrelétricos, quanto para fins de modelagem. Como resultados são apresentados e discutidos os problemas associados à modelagem numérica hidrodinâmica de reservatórios e propostos os requisitos necessários (desejáveis e mínimos) na aquisição de informações de campos para geração de base de dados com finalidade de modelagem numérica.

Palavras-chave: Hidrodinâmica. Transporte de sedimentos. Reservatórios – Barra Bonita (SP). Modelos numéricos.

ABSTRACT

Different physical phenomena interact influencing the hydrodynamic flows characteristics; rivers are governed by them. The sediment transport, one of these phenomena, directly interferes within the dynamic balance of a river, that is, in a stable situation, solid material is carried and deposited without substantial changes in river morphology. Many reasons could modify dynamic balance; it is usual to occur after the construction of multiple uses dams. One of the main impacts associated with these infrastructure projects is the drastic decrease in the amount of flow transport capacity ustream and solid flow downstream. This process is evolving in the reservoir of the Hydroelectric Power Plant (HPP) of Barra Bonita, in Tietê river, in the state of São Paulo, especially in the backwater stretch This research aims to verify the applicability of field data in the hydrodynamic modeling of the Barra Bonita-SP reservoir, assessing the quality of information through numerical simulations and comparisons between field surveys. The study was conducted using real data of bathymetry and hydrology, as well as specific software for flows with free surfaces. It is necessary to gather field data aiming to generate databases for use in hydrodynamic and sediment transport modeling. That is, data collection accuracy is needed, as well as greater detailing. As a result are presented problems associated to the hydrodynamic modeling of reservoirs and are proposed the required requisites (desirable and minimum) for the field data acquisition.

Keywords: River morphodynamic. Sediment transport. Reservoirs – Barra Bonita (SP). Numerical models.

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
2.	Objetivos	5
3.	Revisão Bibliográfica	6
3.1.	Morfodinâmica Fluvial	6
3.1.1.	Morfologia Fluvial	6
3.1.2.	Transporte de Sedimentos	12
3.2.	Barragens e Reservatórios	16
3.2.1.	Assoreamentos em reservatórios de barragens	18
3.3.	Modelagem Numérica	20
3.3.1.	Aspectos gerais	20
3.3.2.	Modelo MIKE 21	22
3.3.2.1.	Visão Geral	22
3.3.2.2.	Modelo Hidrodinâmico	23
3.3.2.2.1.	Equações de conservação	23
3.3.2.2.2.	Integração do tempo	25
3.3.2.2.3.	Tensão de resistência do leito	26
4.	Metodologia	27
4.1.	Aquisição dos dados	27
4.1.1.	Dados batimétricos	27
4.1.1.1.	Tratamento dos dados dos levantamentos batimétricos	29
4.1.2.	Determinação da linha de terra	31
4.1.3.	Dados hidrológicos	31
4.1.3.1.	Vazões incrementais	32
4.1.4.	Dados Sedimentológicos	33
4.1.4.1.	Amostras do material do leito	33
5.	Estudo de Caso – Barragem de Barra Bonita-SP	34
5.1.	Caracterização do local de estudo	34
5.2.	Desenvolvimento do modelo bidimensional	36
5.2.1.	Dados batimétricos	37
5.2.1.1.	Levantamentos Núcleo de Hidrometria – EESC/USP	37
5.2.1.2.	Levantamentos do DH	38
5.2.1.3.	Tratamento dos dados dos levantamentos batimétricos	40
5.2.2.	Determinação da linha de terra	43
5.2.3.	Dados hidrológicos	43
5.2.3.1.	Estações fluviométricas	43
5.2.3.1.1.	Vazões incrementais – estimativa por área de contribuição	45
5.2.4.	Dados sedimentológicos	46
5.2.4.1.	Amostras do material do leito	46
5.3.	Simulações-teste: modelo hidrodinâmica	48
5.4.	Comparação entre dados de batimetria e levantamentos expeditos	48
6.	Resultados e Discussões	50

7.	Conclusões	65
	RECOMENDAÇÕES	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

Dedicatória

Dedico este trabalho às pessoas que, sob a inexplicável vigência do devir, sempre protagonizaram significantes momentos de aprendizado, carinho e incansável apoio em meu caminho.

*“Torna-te quem tu és.”
(F. Nietzsche)*

Agradecimentos

Agradeço

Ao meu orientador Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli pela oportunidade, por todo suporte e colaboração que possibilitaram a elaboração deste trabalho;

Aos meus pais, Paulo e Therezinha, pelo incansável incentivo e valiosos conselhos ao longo de toda a vida; agora não foi diferente, muito obrigado!;

Ao meu irmão, João Pedro, por todas as ideias e todas as discussões que foram importantes, sempre, para ampliar nossos pontos de vista;

À minha namorada, Aline, pelo apoio e interesse, por toda ajuda e, principalmente, por fomentar em mim sempre o espírito inquieto de que um pesquisador necessita;

Ao Departamento Hidroviário do Estado de São Paulo e à empresa AES Tietê por fornecerem os dados que possibilitaram o desenvolvimento do trabalho;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro que viabilizou total dedicação à elaboração do trabalho;

Ao Instituto de Hidráulica Dinamarquês (DHI), que forneceu a licença do software MIKE21 ao longo do desenvolvimento da tese, ferramenta sem a qual seria inviável a execução deste trabalho.

1. Introdução

Os cursos d'água naturais são formados, inicialmente, pelas águas superficiais escoadas pelas pequenas e íngremes drenagens ao longo da bacia hidrográfica, transportando um volume cada vez maior, até que atinjam um afloramento do lençol freático na parte mais baixa de um vale e forme-se definitivamente o rio. Os cursos fluviais são regidos por diversos fenômenos físicos conhecidos analiticamente de maneira ainda pouco profunda. O transporte de sedimentos é um deles, pois é uma variável independente que atua no equilíbrio dinâmico de um rio, isto é, numa situação estável do curso d'água, material sólido é carregado e depositado sem que sejam percebidas alterações significativas na morfologia fluvial para um certo período de tempo. Este equilíbrio pode ser alterado por vários motivos, ocorrendo, frequentemente, após a construção de barragens com reservatórios. Um dos principais impactos observados é a diminuição drástica da vazão sólida escoada pelo rio, devido à perda de capacidade de transporte sólido do escoamento. Tal processo se encontra em estágio avançado no reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Barra Bonita, localizada no rio Tietê. Este, em conjunto com o rio Paraná, compõem a hidrovía Tietê-Paraná, que integra os 13 mil quilômetros da malha hidroviária brasileira aproveitados economicamente (BRASIL, 2009).

Apesar da grande quantidade de vias potencialmente navegáveis no Brasil, seja para transporte de cargas ou de passageiros, observa-se a defasagem na utilização do modal hidroviário (17%) se comparado ao transporte ferroviário (25%) e hidroviário (58%) (BRASIL, 2012). Neste sentido, prevê-se uma equiparação na participação dos modais, visando uma maior eficiência logística e a diminuição dos custos com transporte no país.

Atualmente, a rede flúvio-lacustre brasileira apresenta cerca de 63 mil quilômetros de vias potencialmente aproveitáveis, sendo dividida em 9 bacias hidrográficas, com aproximadamente 44 mil quilômetros de rios, dos quais 29 mil são naturalmente navegáveis (BRASIL, 2009). Dentre as hidrovias instaladas e operantes, com 2400 quilômetros de extensão, a hidrovía Tietê-Paraná, possui 800 km de trecho navegável em operação no rio Tietê e 1600 km no rio Paraná. Influencia, diretamente, uma região de cerca de 76 milhões de hectares quadrados, a qual responde por 50% do PIB

Nacional, segundo o Balanço Anual dos Transportes/2008 do Estado de São Paulo. Atualmente a hidrovía opera com comboios formados por 4 barcas e com calado de até 3 metros, possibilitando o carregamento de até 6.000 t, contra as 2400 t originalmente projetadas – um acréscimo de 150% na carga embarcada e de 20% no calado original (SOBENA HIDROVIÁRIO, 2011).

Com o intuito de incrementar o volume de cargas e passageiros transportados, alguns gargalos vêm sendo eliminados. Dentre as obras, constam: ampliações de vãos de pontes, readequações de canais, dragagens entre outros. Muitas das melhorias fazem parte do Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT) e integram o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC).

Segundo SAMPER (2011), dentre as melhorias previstas no PAC 2, nota-se a adequação do Canal de Anhembi, localizado no reservatório da UHE de Barra Bonita. Neste canal, local do presente estudo de caso, pretende-se fazer uma dragagem para desassoreamento do canal de navegação no trecho, do quilômetro 74 ao 89. O processo de deposição de sedimentos no reservatório apresenta dois agravantes claros. O primeiro é o fato de ser o reservatório de grande porte mais a montante na cascata da hidrovía e, portanto, retém praticamente a totalidade dos sedimentos que vêm do alto curso dos rios Tietê e Piracicaba. Já o segundo, refere-se ao uso intensivo do solo às margens dos rios Tietê e Piracicaba, onde em muitos trechos devido à falta de mata ciliar há maior carregamento de sedimentos para dentro da calha do rio, o qual sem capacidade para mobilizar o volume de sólidos, acaba por assorear.

Diversos autores se propuseram a estudar o comportamento do processo sedimentar em lagos de reservatórios, entretanto, em função da grande quantidade de fatores intervenientes nesse processo, não foi possível até então chegar a uma lei geral que reja o comportamento deste ambiente, sendo comum o desenvolvimento de estudos específicos para cada reservatório. Geralmente envolvem a análise em gabinete do histórico de dados coletados no protótipo e o desenvolvimento de modelos físicos e numéricos para auxiliar na compreensão dos processos e possibilitar a previsão da evolução do processo sedimentar, e também a eficiência esperada de intervenções estruturais ou não estruturais no reservatório (FRANCATO et al., 2012).

Tais informações possibilitam que se note a grande importância da Hidrovia Tietê-Paraná no transporte de cargas das regiões adjacentes, bem como a necessidade de se garantir uma infraestrutura que propicie um incremento no volume transportado pelo modal e, conseqüentemente, sua contribuição para a balança comercial brasileira, assim como buscar reduzir as perdas na geração devido à diminuição do volume útil do reservatório. Há ainda mais um possível agravante, que tornaria a obra prevista para este local mais difícil e onerosa: os sedimentos transportados podem apresentar certo grau de contaminação por materiais carcinogênicos e metais pesados que são trazidos do alto curso do rio Tietê. Tal possibilidade remonta à necessidade de se garantir segurança e eficiência na dragagem, transporte e destinação do material sólido retirado do leito, de modo a evitar maiores impactos ambientais.

A questão da avaliação do assoreamento nesta região assim como os possíveis impactos à navegação e à geração de energia devem ser objeto de estudo minucioso, de forma a propor soluções e procedimentos com embasamento técnico que assegure bons resultados às intervenções. No sentido de auxiliar a compreensão dos fenômenos envolvidos, entram em cena os modelos físicos e numéricos, que permitem além de reproduzir os cenários já conhecidos através dos dados de campo, propor e prever cenários futuros a médio e longo prazos. Com o avanço dos computadores e o aumento da capacidade de processamento de dados, os modelos numéricos vem ganhando espaço nos estudos ligados aos ambientes aquáticos devido à maior praticidade e velocidade dos estudos e ao menor custo de construção e operação/manutenção se comparados aos modelos físicos.

Apresentam-se, portanto, como eficazes ferramentas para reprodução do comportamento hidromorfodinâmico de ambientes aquáticos, e vêm sendo largamente utilizados nos estudos que buscam reproduzir e prever o comportamento hidráulico nas regiões de interesse. Estes programas solucionam numericamente, em pontos discretos, os equacionamentos que descrevem os fenômenos hidráulicos, contínuos no espaço e tempo. Pode-se citar alguns exemplos de modelos numéricos largamente utilizados, como: HEC-RAS, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE, 2014) para escoamentos unidimensionais permanentes ou não-permanentes; MIKE do Instituto Dinamarquês de Hidráulica (DHI), com versões em uma, duas e três

dimensões, abrangendo simulações hidrodinâmicas, sedimentológicas, de dispersão de poluentes entre outros cenários (DHI, 2012a); SOBEK da Delft Hydraulics (DELFT, 2014), com versões em uma, duas e três dimensões, para aplicações em rios, centros urbanos e localidades rurais, com simulações hidrodinâmicas, de transporte de sedimentos, de planícies de inundação e outras. Muitos outros programas existem e estão disponíveis para modelagem de destes ambientes, com diferentes aplicabilidades e especificidades, apresentando resultados confiáveis na reprodução dos fenômenos envolvidos assim como na previsão de mudanças ao longo do tempo. Assim, considerando-se a possibilidade de se reproduzir e avaliar mais minuciosa e criteriosamente o assoreamento que vem ocorrendo no trecho de remanso localizado no reservatório formado pelo barramento construído em Barra Bonita-SP, MOREIRA (2012), utilizando o programa HEC-RAS, modelou unidimensionalmente o reservatório, reproduzindo satisfatoriamente a tendência deposicional verificada no protótipo. Entretanto, devido a limitações do modelo, não foi possível reproduzir adequadamente a distribuição espacial do material sedimentado. A fim de verificar a aplicabilidade dos mesmo dados para a modelagem do reservatório, em duas dimensões, buscou-se utilizar a base de dados como entrada do modelo. A modelagem hidrodinâmica tem por finalidade reproduzir os fenômenos hidráulicos observados no local e, posteriormente, embasar modelagens de transporte de sedimentos. Verificou-se a necessidade de executar levantamentos de dados de campo que tenham por objetivo gerar bases de dados para aplicação em modelagem hidrossedimentológica, isto é, é necessário que a coleta de dados seja feita com maior rigor e maior nível de detalhamento.

2. Objetivos

O objetivo desta pesquisa é verificar a aplicabilidade dos dados de campo disponíveis na modelagem hidrodinâmica do reservatório da AHE de Barra Bonita, avaliando a qualidade das informações por meio de simulações numéricas e comparações entre levantamentos de campo. Visa-se propor, assim, os requisitos mínimos e desejáveis para coleta de dados de campo que tenham por finalidade a modelagem.

3. Revisão bibliográfica

3.1. Morfodinâmica Fluvial

3.1.1. Morfologia Fluvial

A Morfologia Fluvial estuda a formação, evolução e estabilização de cursos d'água naturais. A forma de rios aluvionares, segundo HICKIN (2009c), aqueles com seus leitos compostos por sedimentos com características similares aos que transportam ao longo de seu curso, é definida pela combinação de várias formações geomorfológicas, desde pequenas ondulações à grandes bancos e meandros. De maneira geral, a morfologia fluvial estuda os cursos d'água e os sistemas afetados pelo escoamento e, as mudanças impostas à topobatimetria local, formam as chamadas paisagens fluviais (GARDE, 2006).

A evolução da geomorfologia dos cursos d'água aluvionares está relacionada com o balanço entre as erosões e as deposições em diferentes volumes de controle e períodos (WRIGHT e CROSATO, 2011). As formas do leito, por exemplo, ressaltam PRENT e HICKIN (2001), exercem influência e controle sobre a hidráulica e a morfologia fluvial.

Pela definição aceita, segundo HICKIN (2009d), denomina-se forma de um canal o que se refere às dimensões e forma em uma certa seção transversal do curso d'água; forma em planta de um canal o que se refere ao seu desenvolvimento observado sob uma vista aérea; por fim a morfologia de um canal se refere à uma visão tridimensional das dimensões e formas e suas variações ao longo de todo o curso d'água.

Buscando compreender as características morfológicas, a classificação sistemática dos cursos d'água, ressaltam ALFREDINI (2009), apresenta-se como ferramenta útil nos estudos de engenharia hidráulica, possibilitando, sugere GARDE (2006), generalizações para grupos de rios com características similares.

As formas de rios aluvionares em planta são importantes para a engenharia hidráulica, assim como para estudos de geomorfologia e sedimentologia. Na engenharia, nota-se a necessidade de se conhecer também as variações espaciais e temporais da morfologia fluvial para definir a localização de pontes, barragens e outras obras. LANE

(1957) afirma que as formas em planta de um curso d'água são função da declividade e da vazão de calha plena.

Os corpos d'água podem ser do tipo retilíneo, raro acontecer em cursos d'água naturais, pois, mesmo que as margens apresentem aspecto retilíneo o talvegue serpenteia pelo canal; meandrados, facilmente observáveis em planta devido às curvas sequenciais, apresentam tendência erosiva nas margens côncavas das curvas e no talvegue e, deposicional, nas margens convexas e seções de inflexão – rios em equilíbrio dinâmico, em geral, encontram-se nessa situação – e, instáveis, caracterizados por grandes declividades, seções largas e rasas, apresentando múltiplos talvegues com seções distintas, são capazes de carrear grande quantidade de sedimentos (LEOPOLD e WOLMAN (1957); LANE (1957); GARDE (2006); ALFREDINI (2009); HICKIN (2009c)). ROSGEN (1994) ressalta a classificação feita por SCHUMM (1963), que, descrevendo e interpretando as características dos corpos d'água, estabelece uma relação entre as formas assumidas por estes como sendo parcialmente baseadas na estabilidade do canal, se está erodindo, assoreando ou estável, e o tipo de transporte de sedimentos, se transporte de fundo, em suspensão ou bifásico. ALFREDINI (2009) acrescenta que SCHUMM (1971) verificou também a influência da granulometria no material transportado na resposta fluvial, isto é, como se comportava o curso d'água sob diferentes situações de descargas sólidas.

As bacias hidrográficas podem ser subdivididas morfologicamente (Figura 3.1), caracterizando os cursos d'água de outra forma, de acordo com seus estágios evolutivos e separando-os em em três regiões com características distintas.

A região mais a montante, isto é, a alta bacia ou curso superior, é o trecho com maior declividade e velocidades mais altas, sendo capaz de transportar sedimentos bem graduados, considerado também como rio jovem. A tendência nesta região é de erosão, caminhando para a redução das declividades até o nível de base de jusante.

A média bacia ou curso médio, é o trecho onde o rio tende ao equilíbrio, com moderada sinuosidade e, declividades e velocidades menores. Há intenso transporte de sedimentos.

A baixa bacia ou curso inferior, caracterizado por declividades e velocidades baixas, leito aluvionar e baixa capacidade de erosão. A tendência nesta região é de sedimentação, recebendo grande contribuição de material sólido dos trechos a montante (ALFREDINI, 2009).

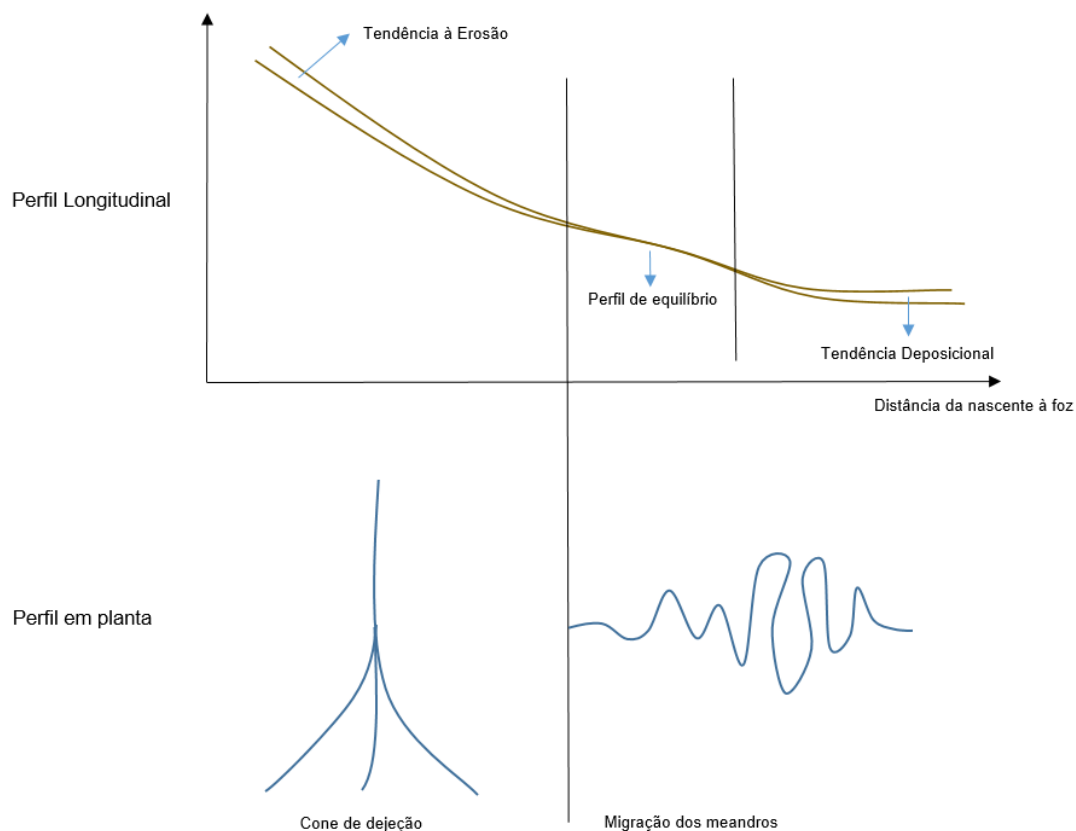


FIGURA 3.1 – Representação do processo hidrossedimentológico em uma bacia hidrográfica.

Fonte: Adaptado de ALFREDINI (2009).

A completa interação entre os diferentes trechos de um mesmo rio, assim como sua evolução ao longo do espaço-tempo, nos remetem às condições de equilíbrio necessárias para que um curso d'água se estabeleça sobre a superfície terrestre.

O conceito de equilíbrio dinâmico de um rio é essencial nos estudos de morfologia. O balanço entre erosão e deposição durante um período estabelecido, de forma a produzir alterações não-mensuráveis em suas características, é considerado como

equilíbrio dinâmico. A continuidade dos cursos d'água é parte longitudinalmente conectada ao meio ambiente, sendo os processos observados a jusante estreitamente ligados aos processos que ocorrem a montante (WDFW, 2009). O conceito de continuidade, ressalta ROSGEN (1994), está ligado também à capacidade dos rios de se adaptarem continuamente às alterações ocorridas nas variáveis que regem sua geomorfologia. Entretanto, estas mudanças não correm instantaneamente.

Existem duas linhas clássicas de teorias acerca da morfologia fluvial, ambas com a finalidade de verificar a estabilidade dos rios. São elas: a teoria do regime, que associa as mudanças nas características morfológicas dos cursos d'água às variações das vazões líquidas e sólidas e, as que ligam a forma do cursos d'água em planta com o desenvolvimento altimétrico observado através das seções transversais e longitudinais, sem expressar claramente correlações com as vazões sólidas e líquidas, com o transporte de sedimentos ou com o tipo de material que compõe o leito (ALDREDINI, 2009).

A Teoria do Regime, segundo SHUYOU e KNIGHT (2002), HICKIN (2009c) e ALFREDINI (2009), correlaciona características dos curso d'água com suas vazões sólidas e líquidas, com o transporte de sedimentos e com o tipo de material do leito. A partir de estudos desenvolvidos inicialmente para determinar relações empíricas entre alguns parâmetros geométricos e hidrossedimentológicos, concluiu-se, posteriormente, que estes variam com a vazão líquida, como expressões exponenciais, denominando-se, assim, Geometria Hidráulica. Os estudos iniciais nesse sentido, ressaltam ALFREDINI (2009), SHUYOU (2002), KOLBERG e HOWARD (1995), GARDE (2006) e SINGH (2003), foram feitos por LEOPOLD e MADDOCK (1953). Estes frisaram que, apesar da aplicação desta teoria se restringir à situações limitadas, estas serviram de base para a fundamentação do modelo da geometria hidráulica para canais livres naturais com vazões e formas variáveis.

Estudos visando avaliar a influência dos sedimentos na geometria do canal e o comportamento dos cursos d'água após sofrerem interferências de qualquer fonte, podem ser considerados como problemas que visam determinar a resposta fluvial num determinado período. Busca-se prever, com isto, alterações na geometria do canal devido

às variações nas vazões líquidas e sólidas. Mudanças na cota de fundo de rios aluvionares estão diretamente ligadas a estas variações, sendo uma resposta à diminuição ou aumento no aporte de sedimentos no leito e parte normal dos ajustes hidráulicos decorrentes das mudanças nas vazões e carga de sedimentos (PAIGE E HICKIN, 2000). Métodos para descrever cursos d'água estáveis foram desenvolvidos utilizando-se a Teoria do Regime, tanto a empírica quanto a analítica. A primeira baseou-se, principalmente, em dados de campo, encontrando relações apropriadas entre eles. A segunda aplica dois tipos de equacionamentos, os de transporte de sedimentos e os de tensão de atrito, relacionados pelo conceito de equilíbrio dinâmico (SHUYOU e KNIGHT, 2002). Todavia, as alterações nas características fluviais como altura da lamina d'água, vazão, declividade, largura da superfícies livre dificultam ainda mais a determinação dos conceitos envolvidos na descrição do fenômeno (ELOUBAIDY et al., 1999)

Algumas normas gerais foram estabelecidas após inúmeros estudos acerca da resposta fluvial, a saber (ALFREDINI, 2009; LANE, 1957; SCHUMM, 1971 apud BENN e ERSKINE, 1994):

- h (profundidade média) é diretamente proporcional à Q (vazão líquida);
- B (largura da superfície livre) é diretamente proporcional à Q e Q_s (vazão sólida);
- i (declividade média) é inversamente proporcional à Q e diretamente proporcional à Q_s ;
- P (sinuosidade) é diretamente proporcional à declividade do vale e inversamente proporcional à Q_s .

Nestas análises são consideradas as vazões formativas dos rios, com tempo de retorno de 2 anos, tomando-se, portanto, valores médios e não medições instantâneas. O intuito destas análises é avaliar o comportamento de um curso d'água após alterações nas características originais do escoamento.

Uma análise qualitativa clássica das transformações no perfil longitudinal, devido à alterações no escoamento, é o caso da construção de barragens, pois estas afetam diretamente o transporte de sedimentos. Grandes barragens induzem a degradação do leito a jusante do barramento, devido à redução no aporte sólido natural do curso d'água LANE (1934 apud BENN e ERSKINE, 1994). Neste caso, com a redução quase que total da carga de sedimentos jusante e pequena variação na vazão líquida, a tendência será de erosão do leito, visando a diminuição da declividade até que se atinja o equilíbrio novamente. Os depósitos sedimentares, relacionados à diminuição das velocidades no lago do reservatório, evoluem para montante, atingindo grandes distâncias. Estes acúmulos de material sólido aumentam os níveis d'água nas cheias e chegam a modificar os níveis de base dos tributários.

A evolução dos cursos d'água, isto é, a modelação do leito ao longo do tempo, segue três princípios fundamentais, como ressalta ALFREDINI (2009):

- princípio da saturação, que determina uma capacidade máxima de transporte de sedimentos para uma dada vazão, numa dada seção, para certo tipo de material;
- princípio da declividade, que correlaciona a turbidez com a tendência à erosão ou sedimentação, variando para períodos úmidos e secos;
- princípio da seleção, que determina que a deposição se inicia com os materiais mais grosseiros, enquanto que a erosão se inicia com os materiais mais finos.

Como é possível notar, a morfologia fluvial está intimamente ligada ao transporte de sedimentos que ocorre ao longo do curso d'água, fator este apresentado mais detalhadamente a seguir.

3.1.2. Transporte de sedimentos

O equilíbrio dinâmico, nos cursos d'água formados por material aluvionar, se dá a partir da interação entre a tensão de atrito imposta pelo escoamento, que solicita as partículas sólidas que compõem o leito e as margens, e a resistência oferecida por estas.

A ação antrópica, em geral, acelera os processos de erosão e assoreamento dos cursos d'água, sendo de extrema importância a avaliação destes impactos durante a concepção de obras de engenharia.

Situações encontradas em estudos relacionados às obras de engenharia estão diretamente ligados à mecânica dos escoamentos em leito móvel, sendo necessário solucionar um conjunto de equações que descrevem esse processo. Dentre elas estão as equações de conservação para a fase líquida e sólida, as equações relacionadas à dinâmica da fase líquida e as que descrevem o transporte sólido. Devido à complexidade deste fenômeno, as soluções analíticas das equações que envolvem a dinâmica do escoamento bifásico e o transporte de sedimentos (arraste, suspensão e carga de lavagem) são difíceis. Em geral, a determinação do transporte sólido é feita utilizando-se equacionamentos empíricos, apesar das tentativas de diversos autores em propor formulações com aplicabilidade universal. A mecânica dos escoamentos bifásicos envolve os equacionamentos que determinam a resistência do material, a estabilidade dos leitos e margens e a capacidade de transporte associada ao escoamento (RAMOS, 2008).

Para escoamentos em leito móvel, sabe-se que o material do fundo se move à medida que o escoamento ganha energia e capacidade de carreamento, ambos diretamente ligados à velocidade do fluxo. Esta, é responsável por aumentar a tensão tangencial imposta pelas partículas de água às partículas sólidas. Denomina-se vazão sólida a quantidade de sedimento transportada por unidade de tempo, a qual cresce conforme aumenta a energia do escoamento. As maiores dificuldades encontradas na representação analítica deste fenômeno estão associadas à interação entre as fases líquida e sólida, às alterações nas seções transversais e declividades, além das alterações provocadas pela ação humana. Sabe-se que o transporte sólido sofre

influência de agentes ativos – condicionantes hidráulicas, meteorológicas e ação antrópica, e de agentes passivos – sedimentológicas, geomorfológicas (ALFREDINI, 2009).

Muito processos influenciam os processo de erosão e deposição no rios aluvionares, em geral relacionados às propriedades dos fluidos e às propriedades dos sedimentos em grupos e das partículas individualmente. Estas, apresentam características relevantes como suas dimensões, velocidade de queda, peso específico e forma. Em grupo, os sedimentos apresentam características relevantes como a distribuição granulométrica, a porosidade, o peso específico aparente e o ângulo de repouso (ZHOU, 2001; RAMOS, 2008; MOREIRA, 2012).

Em leito móvel, devido à direta relação entre a geometria do canal e o estágio em que se encontra o escoamento, grandes problemas associam-se às conformações de fundo conhecidas por rugosidade de forma. Estas, por sua vez, oferecem resistência ao escoamento da fase líquida. Além disto, as alterações na mecânica do escoamento bifásico devido às alterações na concentração dos sedimentos em suspensão, também aumentam a dificuldade em descrever analiticamente o transporte de sedimentos. Conceitos contemporâneos da mecânica dos fluidos permitem dividir a tensão de atrito total de um escoamento, em determinada profundidade, em duas parcelas, sendo elas: a tensão de atrito devido à viscosidade molecular e, a tensão de atrito aparente ocasionada por flutuações turbulentas.

O início do movimento das partículas se inicia quando as tensões de atrito do escoamento superam as tensões de resistência dos sedimentos, estas ligadas à dimensão e composição granulométrica. Como há uma grande variabilidade de materiais e composições na natureza, os equacionamentos que buscam determinar o limiar entre repouso e movimento tendem a ter caráter empírico, como, por exemplo, o critério de Shields (RAMOS, 2008; ALFREDINI, 2009).

O transporte de sedimentos costuma ser dividido em três tipos: arraste de fundo, saltitação e em suspensão. A divisão é feita de acordo com o estágio do escoamento, associando-se, diretamente, a relação entre a tensão imposta pelo escoamento líquido e

a resistência oferecida pelos sedimentos. Sendo assim, quando a resistência é maior que a solicitação, não há movimento de sólidos e vice-versa. Para valores de tensão de atrito intermediários, há transporte por arrastamento ou saltitação, sendo que, acima de um valor crítico, assume-se que o transporte total é dado por uma soma entre o transporte por arrastamento e o transporte em suspensão. Os valores críticos para tensão de atrito variam de acordo com o tipo de material que forma o leito, com a declividade do canal e com a geometria da seção transversal.

As principais formulações desenvolvidas para o transporte sólido podem ser divididas para transporte de fundo, em suspensão e total, a saber:

- Transporte de fundo: caracterizado por movimentos descontínuos, relativamente rápidos, separados por períodos de repouso. Em geral, por se tratar de um fenômeno complexo, a interação entre o transporte de sedimentos e as alterações na fase líquida e a mudança na resistência ao escoamento proporcionada pela alteração das rugosidades de forma, tornam complicada a tarefa de desenvolver formulações teóricas e analíticas sobre a mecânica do escoamento bifásico. Por este motivo, ressalta RAMOS (2008), grande parte dos equacionamentos são de natureza empírica, sendo que o mais aceito e conhecido é o de Meyer-Pettersen e Müller (1948) e, o mais antigo, o de Du Boys (1879). Outros autores como Gilbert, Nakayama, Scholitsch, Chang e Chyn também desenvolveram equacionamentos empíricos. Algumas formulações são baseadas em análise dimensional, como a fórmula de Shields (1936), o método de Rottner (1959) e o de Garde e Albertson (1961). Métodos semiteóricos são como os de Einstein (1942 a 1950) e Kalinske (1947).
- Transporte em suspensão: ocorre nos estágios mais avançados do escoamento líquido, em que as flutuações turbulentas produzem esforços ascensionais superiores aos pesos das partículas. Em geral, a concentração média decresce quanto maior a distância da partícula ao leito, devido à força gravitacional atuando sobre os grãos. Einstein também propõe um equacionamento para contabilização do transporte sólido em suspensão (RAMOS, 2008);

- Transporte Total: alguns métodos buscam calcular o transporte sólido de forma total, isto é, o transporte do material que compõe o leito, sem distinguir suspensão e arrastamento de fundo, excluindo-se apenas a carga de lavagem.

Para os métodos macroscópicos, RAMOS (2008) frisa que, qualquer uma das modalidades de transporte está diretamente relacionada à tração do escoamento sobre o leito, não havendo necessidade de distingui-las. Em geral, os equacionamentos são baseados em análise dimensional, intuição ou empirismo. Os métodos mais conhecidos são os de Laursen (1958), Bishop et al. (1965), Engelund e Hansen (1967), Ackers e White (1973) e Garde e Raju (1981).

Para os métodos microscópicos, ressalta RAMOS (2008), é feita a distinção em transporte de fundo e suspensão, pois consideram que os mecanismos envolvidos nas duas modalidades são distintos, acarretando em equacionamentos diferentes para cada modalidade. Como exemplos temos os métodos de Einstein (1950), Colby et al. (1955) e Toffaleti (1969).

É possível, portanto, compreender a dificuldade em se prever a evolução fluvial de maneira analítica, isoladamente, o que se comprova pelo fato de os equacionamentos muitas vezes apresentarem resultados muito discrepantes para os mesmos dados de entrada. Isso se dá devido à parcela de empirismo contida nos estudos desenvolvidos, que em geral utilizam geometrias, declividades, granulometrias e vazões diferentes como fonte de dados para o desenvolvimento das formulações. Desta forma, cada uma destas tem sua faixa de validade, isto é, para os parâmetros analisados pelo autor há uma faixa estabelecida de valores utilizados no estudo para as variáveis envolvidas. A análise das faixas de validade é tarefa primordial na escolha do equacionamento utilizado no estudo de um caso, de forma que este apresente resultados mais próximos dos encontrados em campo ou extraídos de modelos, reproduzindo, portanto, mais corretamente as características hidráulicas observadas no protótipo.

3.2. Barragens e Reservatórios

As barragens são estruturas dispostas transversalmente aos cursos d'água de uma bacia hidrográfica, cujas funções principais são a criação de um reservatório para regularização de vazões naturais e, conseqüentemente, a melhoria na utilização de recursos hídricos superficiais e a elevação do nível d'água.

As atividades humanas sempre demandaram uma grande quantidade de água, o que exigiu a utilização de barragens e reservatórios para sua acumulação, possibilitando, assim, o desenvolvimento dos grandes centros urbanos. A demanda crescente por água, principalmente para abastecimento e irrigação, contribuiu para o desenvolvimento e construção de grandes barragens e reservatórios.

Os registros históricos dos primeiros reservatórios construídos pela ação do homem, localizados ao norte do rio Jordão, são evidentes desde 3000 AC. A barragem de SaaD el Kafara, situada ao sul da cidade do Cairo no Egito, figura entre as mais antigas já construídas, tendo seus resquícios arqueológicos sobrevivido até os dias de hoje. Feita em enrocamento e alvenaria de pedras, tinha como principal finalidade o abastecimento humano e estima-se ser de 2600 AC. Sua ruptura se deu por galgamento ainda no período de construção (SCHNITTER, 1994).

Atualmente, os reservatórios e barragens, além de apresentarem fundamental importância no desenvolvimento das atividades humanas, são utilizados não apenas para o abastecimento, mas também para múltiplas finalidades como navegação, geração de energia, abastecimento, controle de cheias entre outros.

Em 1900, estimava-se haver cerca de 430 barragens de grande porte ao redor do mundo, com altura superior à quinze metros ou vazão acima dos 2000 metros cúbicos por segundo. Meio século mais tarde, observa-se um aumento de mais de dez vezes neste número, saltando para cerca de 5300 grandes barragens. Em 1986, este número saltou para 39000 (ICOLD, 1988). Nos dias atuais estima-se haver aproximadamente 45000 grandes barramentos ao redor do mundo (MOREIRA, 2012).

Sabe-se que a construção de grandes barramentos afeta diretamente o equilíbrio dinâmico do curso d'água, alterando características do escoamento e, consequentemente acarretando em modificações na hidrodinâmica e no transporte de sedimentos outrora vigente. A partir destas constatações é comum dividir o reservatório em três regiões, com características hidrodinâmicas diferentes, conforme apresentado na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Caracterização longitudinal de grandes reservatórios – divisão em trechos.

Fonte: Adaptado de UNEP (2000).

Com o represamento da água e o aumento do nível, cria-se um lago onde as velocidades são praticamente nulas e, aliado à isto, há a inundação de áreas no entorno, aumentando as seções hidráulicas. O que acontece em seguida é a perda de capacidade de carreamento de sedimentos por parte do escoamento, iniciando um processo de sedimentação a montante do barramento e, a jusante, devido à diminuição do aporte de material sólido inicia-se um processo de erosão que consome o leito e as margens. O processo de assoreamento de reservatórios é conhecido e comum, como ressalta BRASIL (2000), entretanto, o estudo analítico do problema não é ainda definido matematicamente de forma satisfatória. Portanto, é sempre necessário que sejam confrontados os resultados dos cálculos com dados de campo. No Brasil existem muitos reservatórios assoreados, total ou parcialmente, sendo visível apenas a menor parte do depósito. Por falta de levantamentos sistemáticos e divulgação dos dados, os reservatórios brasileiros são uma incógnita (BRASIL, 2000).

É apresentado a seguir as principais características observadas nos estudos de assoreamento em reservatórios.

3.2.1. Assoreamento em reservatórios de barragens

Já é esperado que um reservatório venha a sofrer um assoreamento indesejável, sendo que os pequenos lagos estão sujeitos a um assoreamento rápido, o que pode acontecer até mesmo numa única enchente (CARVALHO, GUILHON e TRINDADE, 2000) e os grandes reservatórios tem um tempo de vida útil maior. No Brasil, alguns reservatórios como o de Itaipu, Sobradinho e Tucuruí apresentam um tempo de assoreamento total avaliado em mais de mil anos. No entanto, em tempo muito menor, 20 a 30 anos, os depósitos na região do remanso, na área do delta, já poderão prejudicar atividades como a navegação. Além disso, depósitos de material fino nas margens facilitam a criação de condições favoráveis ao crescimento de plantas macrófitas que podem prejudicar a geração de energia quando alcançam a barragem e são sugadas para dentro dos condutos.

O curso d'água tende a perder capacidade de transporte ao adentrar o reservatório, devido ao aumento das seções transversais e diminuição das velocidades das correntes, proporcionando condições para sedimentação. O processo de deposição do material sólido acontece de forma seletiva, isto é, os mais grosseiros se depositam mais rapidamente, enquanto que os mais finos adentram o reservatório. Com o aumento do assoreamento, o volume útil do reservatório diminui, o remanso passa a influenciar os trechos a montante, as velocidades aumentam e mais sedimentos são carregados para jusante. O depósito de montante é denominado por depósito de remanso, ligado ao fenômeno hidráulico, podendo retroceder com o aumento no acúmulo de material na região. Os depósitos que se formam dentro do reservatório são conhecidos como delta, depósito de margem e depósito de leito (BRASIL, 2000). A Figura 3.3 apresenta um esquema com a localização dos depósitos.

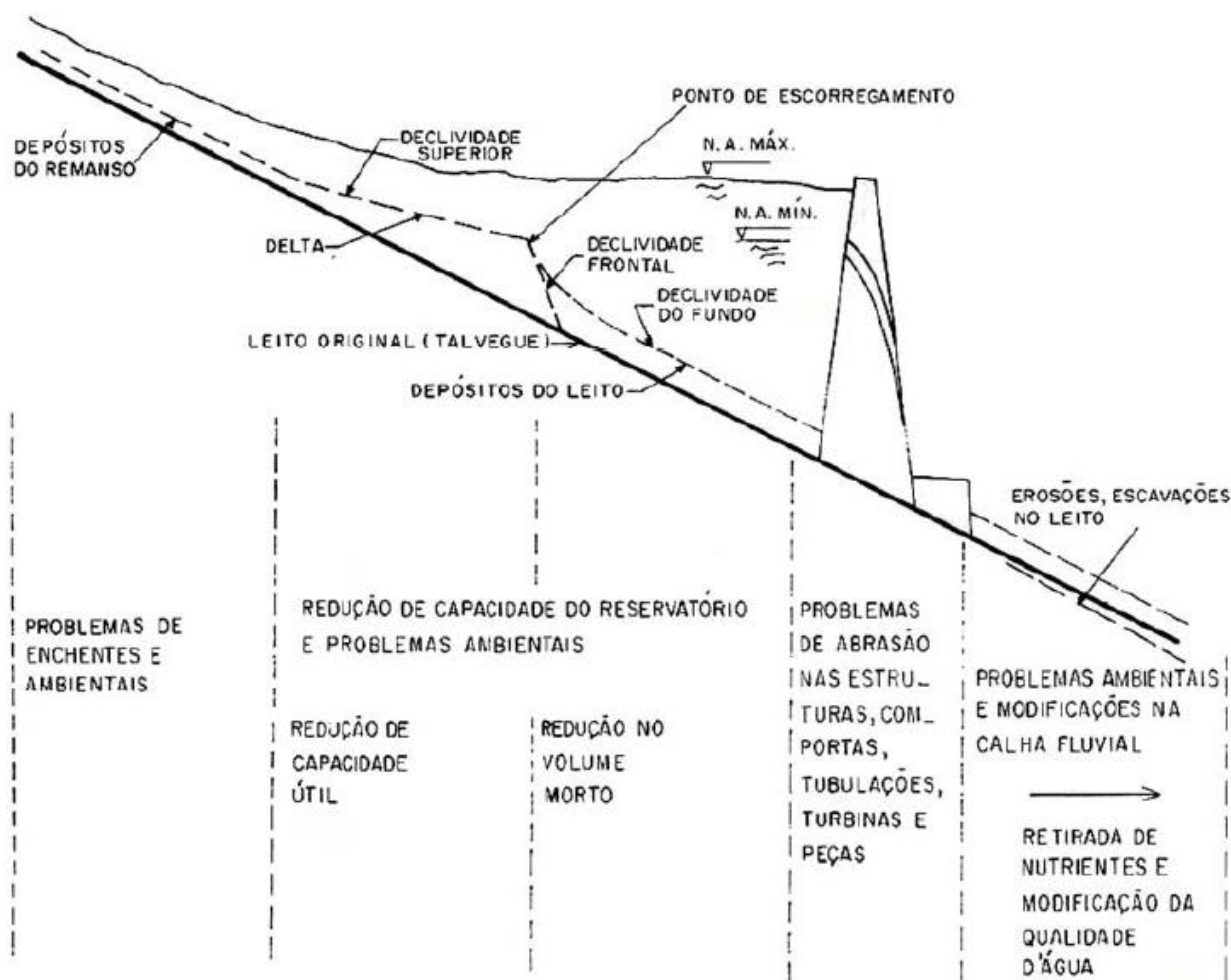


Figura 3.3 – Esquema dos principais processos envolvidos no aporte de sedimentos em um reservatório.

Fonte: CARVALHO (1994 apud BRASIL, 2000).

Os casos de assoreamento vêm crescendo com o aumento da erosão nas bacias hidrográficas. Torna-se, então, sempre prudente, efetuar o estudo da dinâmica sedimentar em obras com formação de reservatório. As avaliações feitas na fase de planejamento devem ser verificadas durante a operação, realizando-se um monitoramento sedimentométrico sistemático ao longo da vida útil do empreendimento (BRASIL, 2000).

Há uma distribuição de sedimentos nos reservatórios cuja forma é influenciada pela operação e também pela ocorrência de grandes enchentes, que carregam grandes

volumes de material sólido. Quando a vida útil do aproveitamento é afetada pelos depósitos, são necessárias mudanças na operação do reservatório ou a adoção de medidas que solucionem o problema (ICOLD, 1989).

Os principais métodos para mitigar o problema do assoreamento em reservatórios se baseiam na remoção mecânica do material, no controle do aporte de sedimentos e no controle dos processos de deposição. O principal motivo para se controlar o problema do assoreamento está ligado à preservação da capacidade de reservação, entretanto, impactos a jusante e a montante também tem relevância (SLOFF, 1997).

Uma valiosa ferramenta na execução de estudos em reservatórios, com a intenção de avaliar seu comportamento e controlar seu assoreamento é a modelagem numérica. Esta, consiste em reproduzir os fenômenos hidráulicos observados no protótipo por meio da solução de equacionamentos específicos, utilizando recursos computacionais. Apresenta-se uma visão geral destes modelos e suas aplicabilidades na engenharia hidráulica.

3.3. Modelagem Numérica

3.3.1. Aspectos gerais

O objetivo deste capítulo é apresentar um breve histórico da evolução dos estudos hidro-morfodinâmicos até a aplicação dos modelos numéricos. Estes, utilizam ferramentas computacionais para reproduzir os fenômenos físicos observados nos ambientes aquáticos.

O estudo dos escoamentos em condutos livres está estritamente ligado ao estudo da fluidodinâmica e, a aplicação desta teoria aos canais com superfícies livre, denomina-se hidrodinâmica. A demora na evolução das soluções analíticas para problemas que envolvem cursos d'água e a hidrodinâmica associada à eles, revelam a dificuldade em se compreender completamente os fenômenos envolvidos, acarretando em formulações muito influenciadas pelo empirismo. WRIGHT e CROSATO (2011) frisam

que as relações entre a profundidade, a vazão e a geometria da seção transversal não podem ser expressadas em simples equacionamentos, como ocorre em condutos de seção fixa.

As primeiras abordagens para os problemas de hidráulica, baseadas na matemática e na física, foram feitas por Leonardo da Vinci (1452-1519). Nos séculos seguintes, Isaac Newton (1642-1727) discutiu a mecânica dos fluidos, desenvolvendo o conceito de viscosidade. No século XVIII, a matemática que fundamentava a fluidodinâmica evoluiu consideravelmente com Daniel Bernoulli (1700-72), Jen le Rond d'Alembert (1717-83) e Leonard Euler (1707-83). Claude-Louis Navier em 1822 e George Stokes em 1845 desenvolveram, independentemente, os equacionamentos que tratavam da tensão de atrito viscosa. Ludwig Prandtl (1875-1953) desenvolveu importantes conceitos quando se trata de escoamentos em canais, pois demonstrou que os efeitos das tensões viscosas ocorrem apenas numa pequena região próxima ao fundo, na chamada sub-camada limite laminar. Nikuradse usou estes conceitos para estudar o efeito da rugosidade em tubos, o qual foi posteriormente estendido para os estudos em canais (WRIGHT e CROSATO, 2011).

Os problemas que tratam da hidrodinâmica e do transporte de sedimentos envolvem, primeiramente, a determinação das escalas de espaço e de tempo em que se deseja desenvolver os estudos. Independentemente das escalas escolhidas, os princípios fundamentais utilizados em fluidodinâmica são: a conservação de massa, a conservação da quantidade de movimento e a conservação da energia. Estes, segundo WRIGHT e CROSATO (2011), podem ser simplificados dependendo da escala considerada, dos dados disponíveis e do nível de detalhamento requerido para as análises. Entretanto, os princípios não podem ser violados.

O movimento de partículas num meio continuamente deformável é representado por equações que descrevem matematicamente a conservação de certa grandeza, seja massa, quantidade de movimento ou energia. Estas, denominam-se equações de conservação ou equações de transporte.

A modelagem numérica, ressaltam FERZIGER e PERIC (1997), utiliza-se dos modelos matemáticos desenvolvidos para a fluidodinâmica, aplicando métodos

numéricos na resolução de equações diferenciais e integro-diferenciais para valores iniciais e de contorno. Conforme apresenta WROBEL et al. (1989), os modelos numéricos apresentam como ideia central o processo de discretização, que transforma o problema físico, contínuo, com indefinidas variáveis, em um problema discreto, com um número finito de incógnitas e que pode ser solucionado com o auxílio de computadores. A discretização, segundo FERZIGER e PERIC (1997), é uma aproximação feita por um sistema de equações algébricas aplicadas em pontos discretos no espaço e no tempo. BRAGA et al. (1998) se estende e considera os modelos de simulação como um conjunto de expressões matemáticas, estruturadas em sequência lógica, que descrevem a operação do sistema no espaço e no tempo, a fim de representá-lo o mais detalhadamente possível e torná-lo apto a fornecer informações que permitam avaliar o comportamento do sistema real. Os métodos mais comuns utilizados na engenharia, para discretização são: elementos finitos, diferenças finitas e volumes finitos. Nos dois métodos a região de interesse é reproduzida através de pontos ou nós, diferenciando-se no tipo de relação para a obtenção nos valores nodais.

A modelagem numérica apresenta vantagens quando comparada à modelagem física, pois apresenta um custo muito mais baixo e não necessita de espaço físico para sua construção. Estas vantagens se traduzem em agilidade nas simulações, assim como evitam gastos com a construção e manutenção do modelo. Contudo, quando se trata de fenômenos hidráulicos, ainda não se garante que todos os fenômenos sejam plenamente reproduzidos numericamente, sendo muito útil e eficaz a utilização dos dois tipos de modelagem em conjunto.

3.3.2. Modelo MIKE 21

3.3.2.1. Visão geral

O software MIKE 21 foi desenvolvido para aplicações em ambientes aquáticos, baseando-se na utilização de malhas flexíveis e regulares. O sistema soluciona numericamente as equações para fluidos incompressíveis de Navier-Stokes, integrando-se os números de Reynolds e a profundidade, levando em consideração as premissas de Boussinesq e da distribuição hidrostática da pressão. Em seu escopo, o modelo é

composto pelas equações da continuidade, de quantidade de movimento, de temperatura, salinidade e densidade, utilizando na solução das condições de contorno um esquema de fechamento turbulento. No domínio horizontal podem ser utilizadas coordenadas tanto Cartesianas quanto esféricas (DHI, 2012a).

A discretização espacial das equações primitivas é feita utilizando um método de volumes finitos centrado nas células, isto é, o ponto em que são feitos os cálculos se localiza no centro de cada célula que compõe a malha. O domínio espacial é discretizado subdividindo-se o contínuo em elementos ou células não sobrepostas. No modelo em duas dimensões os elementos podem ser triângulos ou quadriláteros (DHI, 2012a).

3.3.2.2. Modelo hidrodinâmico

3.3.2.2.1. Equações de Conservação

O sistema de equações utilizado pelo software MIKE 21, apresentado no manual do DHI (2012a), para modelar matematicamente o comportamento de escoamentos em águas rasas, é resolvido em cada nó da malha triangular que discretiza a região de interesse. Integrando-se verticalmente as equações de quantidade de movimento e da continuidade, as equações em coordenadas cartesianas são da forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad [1]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \\ \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad [2]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \\ \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad [3]$$

Sendo t o tempo; x e y as coordenadas cartesianas; η a elevação da superfície da água; d o nível médio da água; $h = \eta + d$ a profundidade total; u e v as componentes da velocidade nas direções x e y ; $f = 2\Omega \sin\phi$ o parâmetro de Coriolis (Ω é a velocidade angular e ϕ é a latitude geográfica); g a aceleração da gravidade; ρ a massa específica

da água; S_{ij} os tensores das tensões relacionadas às ondas de gravidade); T_{ij} as tensões laterais; p_a a pressão atmosférica; ρ_0 a massa específica da água de referência; S a magnitude da vazão devido a fontes pontuais; u_s e v_s são as velocidades com que a água é descarregada no ambiente aquático.

A barra sobre as incógnitas indica que este é um valor integrado na profundidade, sendo $\bar{u}$ e $\bar{v}$, velocidades médias integradas na vertical definidas por:

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, \quad h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad [4]$$

As tensões laterais T_{ij} incluem tensões viscosas, tensões de turbulência e advecção diferencial. Estas são estimadas utilizando uma viscosidade turbulenta baseada nos gradientes de velocidades integradas, como pode ser visto:

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \quad T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), \quad T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \quad [5]$$

Sendo A a viscosidade turbulenta horizontal.

A equação para águas rasas na forma integral é dada por:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot F(U) = S(U) \quad [6]$$

Sendo U o vetor das variáveis que se conservam, F o vetor de fluxo da função e S o vetor dos termos fonte.

As equações de transporte, que na hidrodinâmica tratam da conservação de massa, da quantidade de movimento, são utilizadas para modelagem envolvendo salinidade e temperatura, nos modelos de turbulência e nos modelos genéricos de transporte. Todos estes utilizam as equações de conservação ou de transporte, que são dadas pela equação [6], em que:

$$U = h\bar{C}$$

$$F^I = [h\bar{u}\bar{C}, h\bar{v}\bar{C}] \quad [7]$$

$$F^V = [hD_h \frac{\partial \bar{C}}{\partial x}, hD_h \frac{\partial \bar{C}}{\partial y}]$$

$$S = -hk_p\bar{C} + hC_sS$$

$\bar{C}$ é o valor escalar da incógnita que foi integrada na vertical.

3.3.2.2.2. Integração do tempo

O tempo nas simulações em duas dimensões pode ser integrado de duas maneiras, tanto para as equações de águas rasas quanto para as de transporte: um método de ordem inferior e outro de ordem superior. Considerando a forma genérica das equações:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = G(U) \quad [8]$$

O método de ordem inferior é um método de Euler de primeira ordem explícita, da forma:

$$U_{n+1} = U_n + \Delta t G(U_n) \quad [9]$$

Sendo Δt o intervalo do passo de tempo. O método de ordem superior utiliza um método de Runge Kutta de segunda ordem, da forma:

$$U_{n+\frac{1}{2}} = U_n + \frac{1}{2} \Delta t G(U_n) \quad [10]$$

$$U_{n+1} = U_n + \Delta t G(U_{n+\frac{1}{2}}) \quad [11]$$

Nas fronteiras fechadas, como as linhas de terra, os fluxos normais são forçados à zero para todas as variáveis. As condições para fronteiras abertas podem ser especificadas, para as equações hidrodinâmicas, como vazões, elevações da linha d'água. Para as equações de transporte valores específicos ou gradientes podem ser inseridos.

Para as fronteiras móveis, a aproximação é baseada nos trabalhos de ZHAO (1994) e SLEIGH et al. (1998). Quando as profundidades são pequenas, o problema é reformulado e, apenas quando estas são ínfimas, os elementos/células são removidos

dos cálculos. A reformulação é feita forçando os fluxos de momento à zero e considerando apenas os fluxos de massa.

3.3.2.2.3. Tensão de resistência do leito

As tensões de resistência, $\vec{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ são determinadas por uma lei quadrática de atrito, do tipo:

$$\frac{\vec{\tau}_b}{\rho_0} = c_f \vec{u}_b |\vec{u}_b| \quad [12]$$

Sendo c_f o coeficiente de arrasto e $\vec{u}_b$ a velocidade do escoamento acima do fundo do canal. A velocidade de atrito associada à tensão de resistência do leito é dada por:

$$U_{\tau b} = \sqrt{c_f |\vec{u}_b|^2} \quad [13]$$

Para cálculos em duas dimensões $\vec{u}_b$ é a velocidade integrada na profundidade e o coeficiente de arrasto pode ser determinado a partir do coeficiente de resistência ou coeficiente de rugosidade Chezy, C , ou a partir do coeficiente n de Manning:

$$c_f = \frac{g}{C^2} \quad [14]$$

$$c_f = \frac{g}{(Mh^{1/6})^2} \quad [15]$$

4. Metodologia

4.1. Aquisição de dados

4.1.1. Dados batimétricos

A modelagem de ambientes aquáticos requer, como ponto de partida, informações do relevo submerso, além de dados topográficos que também podem ser utilizados na complementação das informações sobre a região.

Os dados de batimetria podem ser obtidos de duas formas:

- a partir de dados compilados de levantamentos batimétricos executados na região de interesse, feitos com a utilização de equipamentos específicos (ecobatímetros, ADP, ADCP, *laser*) que fazem a varredura relevo submerso, gerando pontos, espaçados de maneira conveniente, com coordenadas conhecidas;

- a partir de cartas topográficas e cartas náuticas da região, já digitalizadas, a partir de dados de campo. Após tratamento em ambiente GIS, estes últimos são transformados em pontos com informações de altitude e coordenadas conhecidas. Constituem uma base que não é extraída diretamente dos dados brutos dos levantamentos; os pontos obtidos a partir das cartas são gerados seguindo discretização pré-definida de acordo com a quantidade e qualidade de informação que se deseje.

Os dados de batimetria utilizados na modelagem devem ser o mais confiáveis possíveis, representando de fato as características da região, pois embasarão todo o desenvolvimento do modelo hidrodinâmico. Este, por sua vez, servirá de base para o modelo de transporte de sedimentos. Sendo assim, dada a importância destas informações, sugere-se que os dados obtidos devem ser de fontes confiáveis, se possível oficiais. De preferência, estas informações devem alimentar bases de dados abrangentes e de disponibilidade pública.

Em muitas ocasiões depara-se com a escassez de dados de batimetria, com pouca abrangência em termos de área levantada e volume de informação coletada e processada, tornando-se necessário utilizar dados de levantamentos executados

independentemente, em períodos e regiões diferentes. Nestes casos, o procedimento adotado consiste em compor um mosaico que contenha os dados das diversas regiões estudadas, sem sobrepor dados de fontes diferentes numa mesma região. Deve-se buscar cobrir todas as áreas possíveis onde hajam levantamentos, dando preferência àqueles com maior densidade de pontos e que tenham sido executados em datas mais próximas aos períodos utilizados como referência durante as simulações. Desta forma, ao final, obter-se-á uma composição com a maior abrangência possível, sem redundância de dados, que possibilita a modelação de uma área maior de maneira mais confiável. A Figura 4.1 apresenta um exemplo deste tipo de composição, executado por MOREIRA (2012).

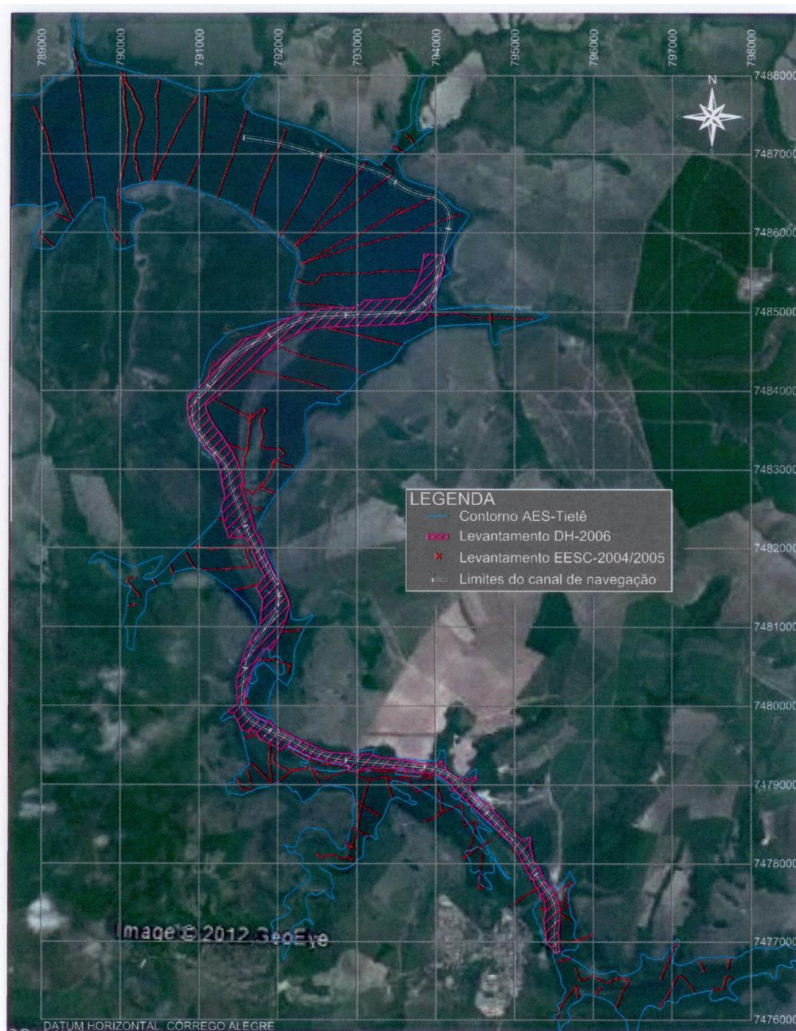


Figura 4.1 – Composição de mosaico com levantamentos de campo de fontes distintas.

Fonte: MOREIRA (2012).

Procura-se, desta maneira, evitar ao máximo os erros nas gerações das superfícies digitais para cálculo de volumes de material sólido entre os períodos simulados, assim como deformações nas conformações do leito ao longo do trecho reproduzido no modelo.

4.1.1.1. Tratamento dos dados dos levantamentos batimétricos

Inicialmente, é necessário que os dados levantados sejam transformados para um sistema de referências único, evitando desta forma distorções e desvios no posicionamento planimétrico dos pontos coletados em campo. Para tal deve ser escolhido um *datum* horizontal, definindo-se o elipsóide que melhor se ajuste à região a ser mapeada.

Para as informações sobre a posição vertical do relevo submerso, o ideal é que suas altitudes sejam medidas em relação ao nível médio do mar, isto é, deve-se obter as altitudes ortométricas dos pontos de batimetria. Este procedimento garante que sejam respeitadas as feições batimétricas da região, ou seja, as características geomorfológicas que influenciam a hidrodinâmica de um curso d'água podem ser reproduzidas, no modelo, de maneira fiel ao protótipo.

Trecho de remanso

Levantamentos de campo expeditos

É proposto, no presente trabalho, um procedimento para análise, tratamento e posterior aplicação dos dados batimétricos provenientes de levantamentos com equipamentos específicos, especialmente em reservatórios formados por barragens. Este, consiste em verificar *in situ* o posicionamento de pontos estrategicamente escolhidos a partir de levantamentos existentes e, na sequência, compará-los de forma a verificar a consistência das diferentes fontes, reproduzindo com maior fidelidade a batimetria local. Em outras palavras, busca-se definir quais regiões abrangidas pelos levantamentos estão localizadas dentro do remanso.

Os levantamentos executados de maneira tradicional, apresentam, para cada ponto, suas localizações geográficas, em coordenadas, e a profundidade do ponto em relação à superfície da água. Este procedimento resulta em uma perda de precisão no posicionamento vertical dos pontos, pois desconsidera as diferenças de cotas relacionadas à influência do remanso, podendo acarretar no abatimento ou elevação da batimetria, dependendo de como se comportam os níveis d'água, no barramento e no local do levantamento, no dia da execução. A alteração das feições batimétricas, mais evidente quanto mais distante do barramento, se dá pois os pontos coletados nas seções de interesse são relacionados a um nível d'água medido em uma régua localizada junto ao barramento. Este dado, portanto, não leva em consideração a curva formada pela acomodação da água na transição entre o trecho fluvial e o reservatório, a montante do barramento. Os pontos que se encontram neste trecho, portanto, estarão posicionados em cotas diferentes de suas reais cotas (Figura 4.2).

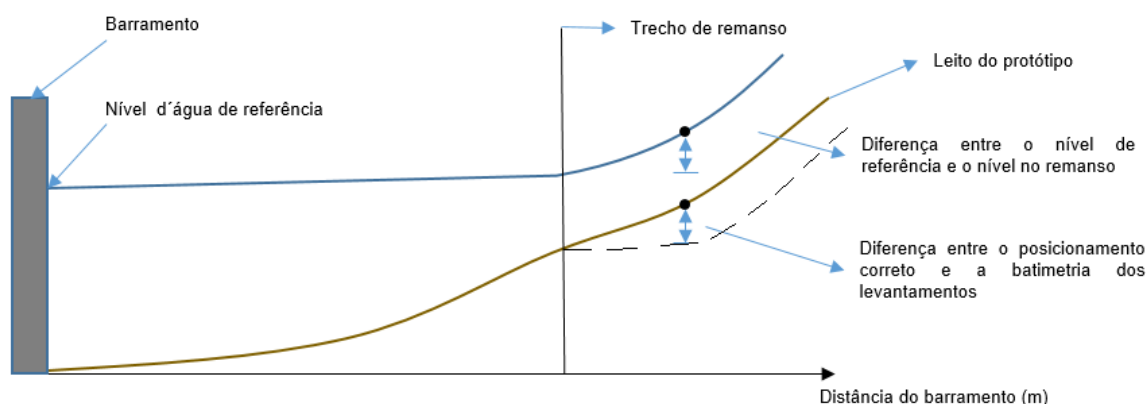


Figura 4.2 – Diferença no posicionamento de pontos batimétricos dentro do trecho de remanso devido ao nível de referência único no barramento.

Fonte: Autor.

O método para se corrigir essa deformação, de forma a garantir mais confiabilidade à modelagem, consiste em comparar o posicionamento de pontos oriundos de levantamentos prévios com pontos coletados em levantamentos de campo expeditos. Para tal, é necessário utilizar equipamentos de posicionamento global que façam a

correção diferencial dos pontos (DGPS – Differential Global Positioning System), e de equipamentos de topografia (estação total, nível óptico) para alocar os pontos. Possibilita-se, assim, a obtenção da altitude ortométrica do dado ponto para posterior correção em ambiente de planilha. Define-se, para uma dada situação, o início da curva de remanso e, conseqüentemente, a região a montante em que os pontos devem ser reposicionados.

As condições ideais para que sejam feitas as medições dos pontos escolhidos ocorrem em épocas de estiagem, com um menor volume de água acumulado no reservatório e níveis d'água mais baixos. Desta forma, pontos obtidos com os levantamentos batimétricos, submersos à época das campanhas, estarão emersos, possibilitando a verificação de suas cotas a partir de um levantamento topográfico, mais preciso.

4.1.2. Determinação da Linha de Terra

A linha de terra ou linha de contorno de um reservatório é aquela que representa o limite entre a região molhada e a região seca, de forma que a elevação da superfície da água, ao longo de todo o entorno, não a ultrapasse para situações normais.

Desta forma, na determinação da linha de contorno são úteis as imagens de satélites, cartas topográficas da região após o enchimento do reservatório, levantamentos feitos através de aerofotogrametria, contornos desenvolvidos em outros trabalhos, ajuste da linha com auxílio dos dados de batimetria ou então a combinação destes. Estas fontes, quando utilizadas em conjunto, devem ser transformadas para um mesmo *datum* horizontal da mesma forma que os levantamentos batimétricos, para o correto posicionamento planimétrico dos pontos que formam a linha de terra.

4.1.3. Dados hidrológicos

Os dados hidrológicos podem ser obtidos de várias maneiras, havendo uma enorme gama de equipamentos, programas computacionais e metodologias para aplicação na coleta. Em geral, cursos d'água explorados e que sofreram intervenções antrópicas, são dotados de estações que coletam dados de vazão, velocidades, níveis

d'água, amostras de sedimentos entre outros parâmetros. Com isso, visa-se estabelecer uma base de dados (série histórica) que forneça informações sobre as variações dos fenômenos hidráulicos devido às modificações provocadas pelo homem. Estes dados servem de base, por exemplo, para auxiliar a gestão da geração de energia de uma usina hidrelétrica ou, então, definir regras para a operação de hidrovias. Diversos estudos são feitos em regiões de interesse se utilizando dos dados hidrológicos devido à vasta aplicação destas informações em problemas de hidráulica fluvial, hidrologia, transporte de sedimentos entre outras áreas que lidam com recursos hídricos.

Recomenda-se que estes dados sejam coletados e compilados seguindo normas rigorosas, por equipes especializadas, para garantir confiabilidade ao modelo hidrodinâmico e de transporte de sedimentos. Em geral, as séries históricas contêm informações apresentadas para cada período de tempo preestabelecido, definidos de acordo com a discretização que se pretende utilizar.

4.1.3.1. Vazões incrementais

As vazões incrementais são aquelas drenadas pelas sub-bacias, nos trechos localizados entre os postos que efetuam as medições e as seções de entrada do modelo. A estimativa destes valores, caso a seção inicial do modelo hidrodinâmico não coincida com a seção de medições fluviométricas, é feita com maior rigor através de uma modelagem hidrológica da região, por meio de um modelo que reproduza os regimes de precipitação e evaporação, as contribuições advindas dos escoamentos superficiais durante as chuvas e os volumes que infiltram no solo. Este é um processo longo e minucioso (requer vasta gama de informações e programas específicos) que pode, entretanto, ser contornado em determinadas situações, adotando-se certas premissas. Na impossibilidade de se desenvolver um modelo hidrológico, pode ser adotado um método para determinação das vazões escoadas superficialmente, conforme descrito a seguir.

A determinação das vazões incrementais drenadas pelos trechos das sub-bacias localizados entre os postos fluviométricos (onde há dados) e as seções de entrada do modelo numérico, pode ser feita de maneira satisfatória por correlação entre área e

vazão. Esta consideração pode ser feita quando os regimes hidrológicos das sub-bacias são similares e a mesma tendência de variação nas vazões afluentes, para os diferentes postos fluviométricos localizados na bacia, são observadas nas séries históricas.

Considera-se que as áreas das sub-bacias que tem como exutório as seções onde se localizam os postos de medição drenaram as vazões obtidas nas séries históricas. Sendo assim, os trechos adicionais, localizados entre estes postos e as primeiras seções do modelo, são responsáveis por drenar um volume de água que é proporcional à sua área, isto é, cada trecho compreende uma certa porcentagem da área total, que é correlacionada diretamente com os dados de vazões.

As áreas podem ser determinadas com o auxílio de programas específicos, definindo-se os divisores de águas dos trechos adicionais, e calculando suas respectivas áreas de contribuição. Determina-se assim as contribuições percentuais nas áreas totais das sub-bacias de cada tributário e as vazões incrementais associadas.

4.1.4. Dados sedimentológicos

4.1.4.1. Amostras do material do leito

A amostragem de material do leito é feita com o intuito de se definir as frações de cada tipo de sedimento contido em suas camadas, viabilizando a separação em diâmetros característicos. Estas amostras, após serem testadas e analisadas em laboratório, determinam a curva granulométrica do material sólido de fundo e margem, dados estes utilizados durante a modelagem de transporte de sedimentos. Cada programa trabalha com diferentes equacionamentos para o cálculo da capacidade de transporte de sedimentos, sendo necessário verificar os diâmetros utilizados nos cálculos. Alguns modelos se utilizam de diâmetros característicos definidos empiricamente, outros definem camadas ativas e intermediárias, requerendo atenção na escolha dos dados de entrada da modelagem. Estes dados fornecem informações sobre a rugosidade do leito e das margens que influencia a hidrodinâmica de um escoamento.

5. Estudo de Caso – Usina Hidrelétrica de Barra Bonita-SP

5.1. Caracterização do local de estudo

A Usina Hidrelétrica de Barra Bonita situa-se no rio Tietê (Figura 5.1), na sub-bacia do Médio Tietê Inferior. Pertence à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê – Sorocaba (UGRHI 10), conforme definido pelo Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo – SigRH. O afluente à direita da confluência é o rio Piracicaba, pertencente à bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. A Companhia de Tecnologia em Saneamento Ambiental classifica o reservatório como eutrofizado. A barragem de Barra Bonita é a primeira de grande porte da cascata do rio Tietê. Esta gera, se somados todos os aproveitamentos instalados na hidrovia Tietê-Paraná, em torno de 22,6 GW de potência. A região abrangida pela hidrovia responde por cerca de 50% do PIB brasileiro (MOREIRA, 2012).

A escolha deste reservatório se deve à sua localização e, consequentemente, à sua importância tanto econômica quanto logística. Por cruzar o estado de São Paulo, apresenta grande potencial para transporte de cargas e passageiros na região com maior concentração de capital do país. Além disso, estão previstos investimentos que demandarão obras para aprofundamento do canal de navegação de Anhembi e redução de gargalos como, por exemplo, as pontes, com vãos estreitos (SAMPER, 2011). Há ainda o interesse em estender a hidrovia Tietê-Paraná até a cidade de Salto-SP (a montante), o que requer não só o aumento do calado na região do Canal de Anhembi-SP como a manutenção deste em médio e longo prazos.

Além do interesse tanto público quanto privado de se investir na hidrovia, há ainda como fator importante na escolha da região, a disponibilidade de dados de campo que, se analisados de forma minuciosa, permitem avaliar a atual situação do reservatório e prever cenários futuros.

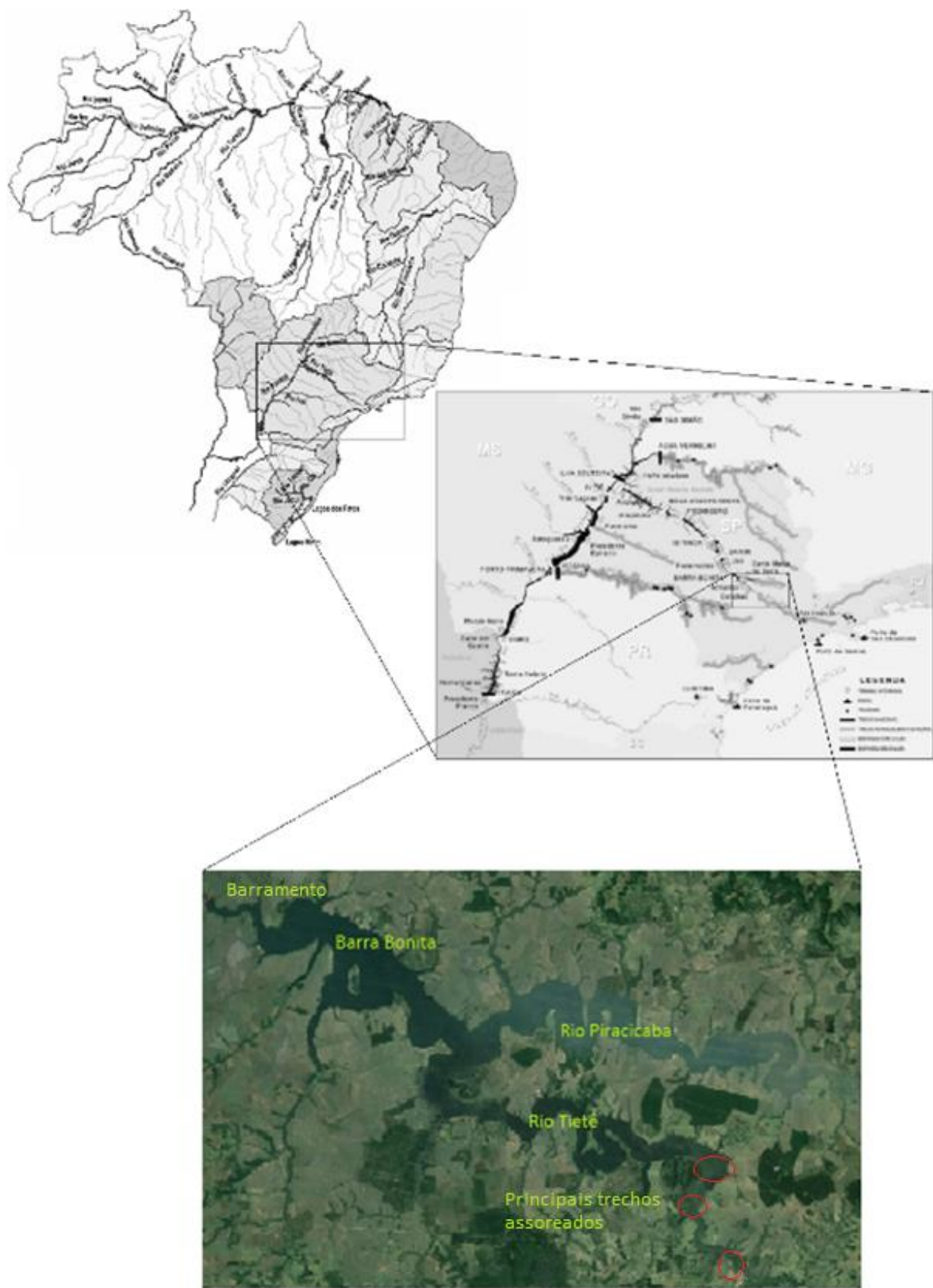


Figura 5.1 – Localização do reservatório do AHE de Barra Bonita-SP.

Fonte: Autor.

5.2. Desenvolvimento do modelo bidimensional

O processo de modelagem numérica hidrodinâmica bidimensional do reservatório da UHE de Barra Bonita utilizou dados de levantamentos batimétricos, dados de vazões e níveis d'água. A Figura 5.2 apresenta o fluxograma com as etapas que envolvem o desenvolvimento do modelo.

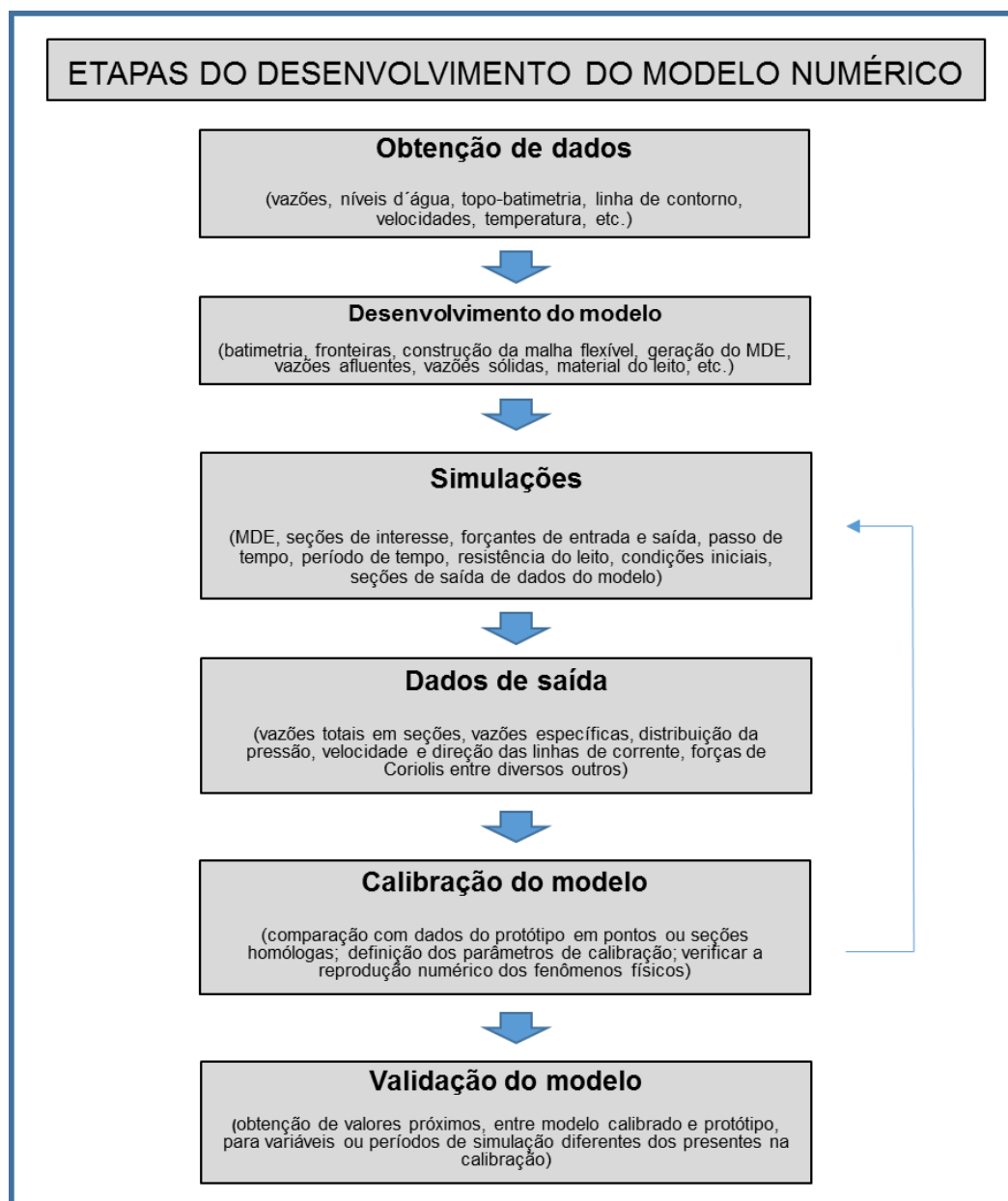


Figura 5.2 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento do modelo numérico.
Fonte: Autor.

A seguir são apresentadas as fontes e a abrangência dos dados utilizados na geração da base para as simulações.

5.2.1. Dados batimétricos

Os dados de batimetria utilizados na modelagem do reservatório do AHE de Barra Bonita foram obtidos a partir de levantamentos distintos: um realizado pelo Núcleo de Hidrometria da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – EESC/USP no ano de 2004; e outros executados pelo Departamento Hidroviário do Estado de São Paulo – DH, nos anos de 2006, 2007, 2010 e 2011. Cada levantamento tem suas peculiaridades, as quais, são apresentadas adiante.

5.2.1.1. Levantamentos Núcleo de Hidrometria – EESC/USP

Os levantamentos realizados pelo Núcleo de Hidrometria da Escola de Engenharia de São Carlos/USP foram realizados no ano de 2004, nos meses de abril, maio, junho e julho, com a finalidade de avaliar a influência do assoreamento no trecho de remanso do reservatório de Barra Bonita/SP e suas implicações no aproveitamento hidrelétrico (AHE). Os dados são parte integrante de um convênio firmado entre a EESC/USP e a empresa AES Tietê para o levantamento batimétrico do reservatório de Barra Bonita-SP. Determinou, desta forma, o volume do reservatório, a curva cota-área-volume e definiu as seções para controle da evolução do assoreamento.

Na delimitação da seções para execução dos levantamentos batimétricos ao longo do reservatório foram utilizadas cartas topográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, na escala 1:50.000. A projeção adotada para a base cartográfica é UTM, o elipsoide SAD69, com *datum* horizontal em Chuá. Parte do reservatório se encontra no meridiano central -51°.

A metodologia utilizada para a determinação do número de seções foi proposta por MORRIS & FAN (1997) e correlaciona, empiricamente, a área do reservatório, em hectares, com o número de seções transversais. Para a área do reservatório de Barra Bonita, por essa metodologia, seriam necessárias 129 seções. Entretanto, como o estudo buscava atualizar as curvas Cota x Área e Cota x Volume, e também determinar o volume

mais precisamente, foram levantados 640 transectos com espaçamento médio de 500 metros. A Figura 5.3 apresenta os transectos levantados ao longo do reservatório.

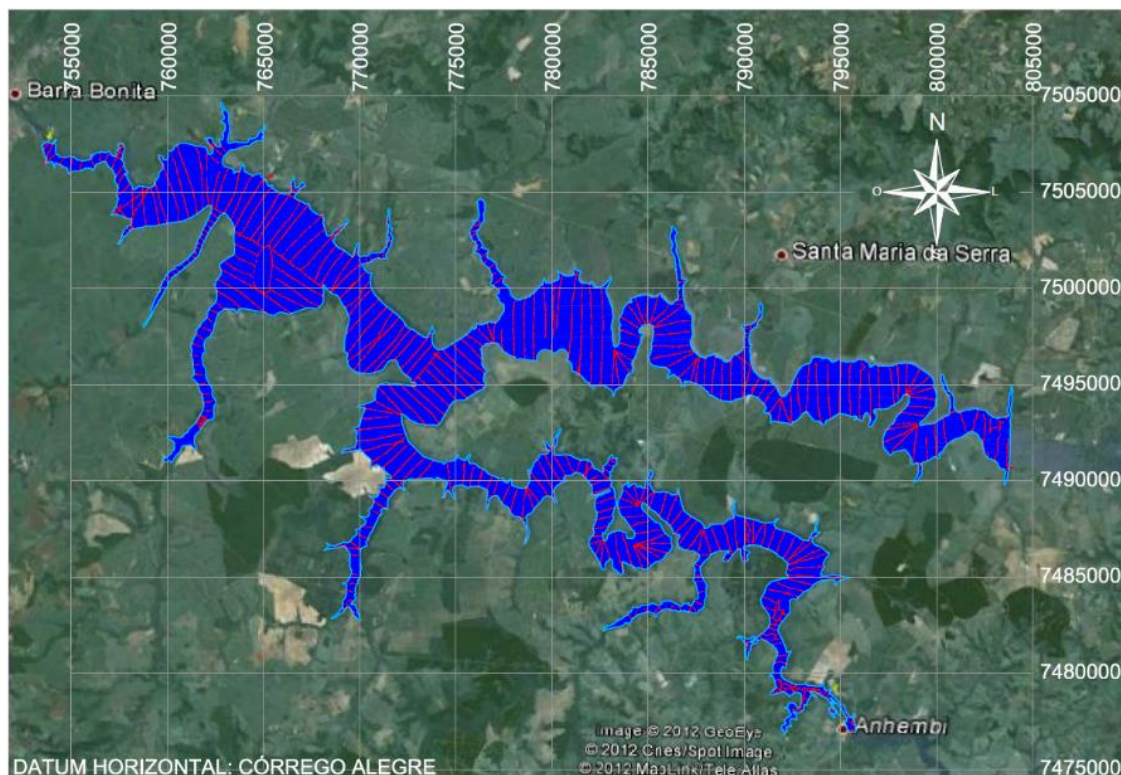


FIGURA 5.3 – Posicionamento dos transectos levantados pelo Núcleo de Hidrometria da EESC/USP.

Fonte: MOREIRA (2012).

5.2.1.2. Levantamentos do DH

Os levantamentos batimétricos executados pelo Departamento Hidroviário (DH) abrangeram apenas o trecho mais crítico à navegação, isto é, apenas a região do canal balizado (talvegue principal), utilizado como via de movimentação autorizada pela Marinha do Brasil. Este, se encontra no trecho de remanso no rio Tietê, a montante da confluência com o rio Piracicaba, entre os quilômetros 72 e 89 da hidrovia Tietê-Paraná. Os anos dos levantamentos e as respectivas escalas são apresentadas na Tabela 5.1. Não existem dados referentes aos anos de 2008 e 2009.

A Figura 5.4 apresenta a abrangência dos levantamentos referentes aos anos de 2006, 2007, 2010 e 2011. Os levantamentos foram sobrepostos de modo a formar um mosaico, conforme indica a legenda.

Tabela 5.1 – Levantamentos executados pelo Departamento Hidroviário.

Ano do Levantamento	Resolução Espacial		Período	Datum Horizontal
	Transversal	Longitudinal		
2006	5 m	15 m	03/07/2006	Córrego Alegre
2006	10 m	30 m	27/09/2006 - 03/10/2006	Córrego Alegre
2007	5 m	30 m	03/09/2007 - 23/11/2007	Córrego Alegre
2007	10 m	30 m	21/11/2007 - 23/11/2007	Córrego Alegre
2010	10m	15 m	26/01/2010 - 28/04/2010	Córrego Alegre
2010	50 m	15 m	16/08/2010 - 18/08/2010	Córrego Alegre
2010	10 m	15 m	16/08/2010 - 24/08/2010	Córrego Alegre
2010	10 m	15 m	21/09/2010 - 28/10/2010	Córrego Alegre
2010	10 m	15 m	01/12/2010 - 10/12/2010	Córrego Alegre
2010	20 m	-	23/02/2010 - 23/03/2010	Córrego Alegre
2011	10 m	15 m	15/08/2011 - 31/08/2011	Córrego Alegre

Fonte: Departamento Hidroviário do Estado de São Paulo (2011).

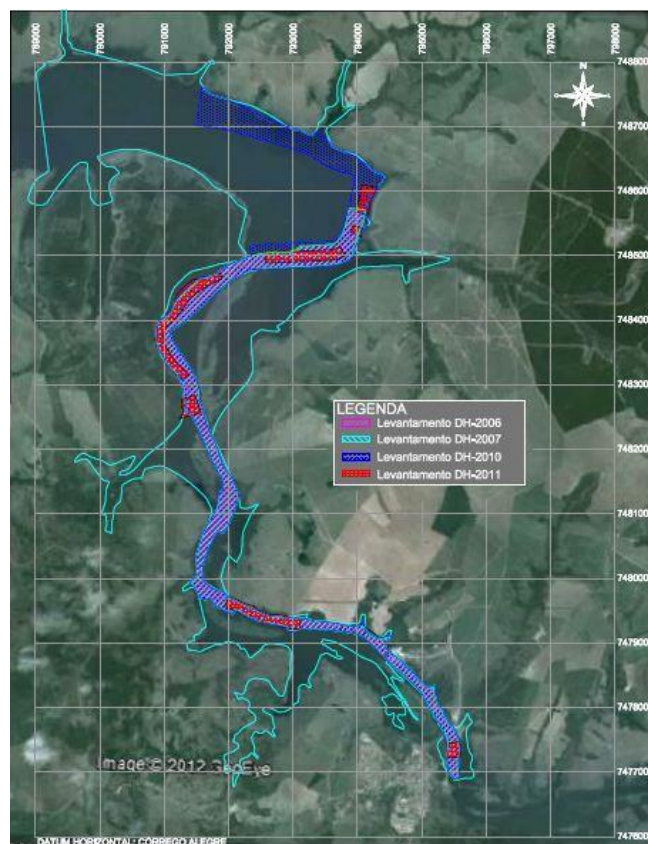


Figura 5.4 – Abrangência dos levantamentos executados pelo Departamento Hidroviário de São Paulo.

Fonte: MOREIRA (2012).

5.2.1.3. Tratamento dos dados dos levantamentos batimétricos

Os dados de todos os levantamentos foram transformados para o *datum* horizontal de Córrego Alegre, na projeção UTM e meridiano central -51° .

Os dados de batimetria para a geração do Modelo Digital de Elevação (MDE), são oriundos de levantamentos batimétricos executados em campo. Tais levantamentos apresentavam, para cada ponto, as localizações geográficas em coordenadas e a profundidade do ponto em relação à superfície da água.

Levantamentos de campo expeditos

Foram realizados, nos dias 27 e 28/11/2014 e 17 e 19/12/2014, levantamentos de campo com o intuito de determinar a altitude ortométrica de pontos conhecidos,

selecionados dos levantamentos batimétricos existentes. Conforme apresentado no item 4.1.1.1, procura-se verificar problemas como a influência da curva de remanso e da evolução do assoreamento no posicionamento vertical dos pontos localizados na zona de transição entre o trecho fluvial e a zona lacustre. As Figuras 5.5 à 5.7 apresentam a localização dos pontos levantados em campo, sobrepostos aos levantamentos anteriores realizados pela EESC/USP e pelo DH.

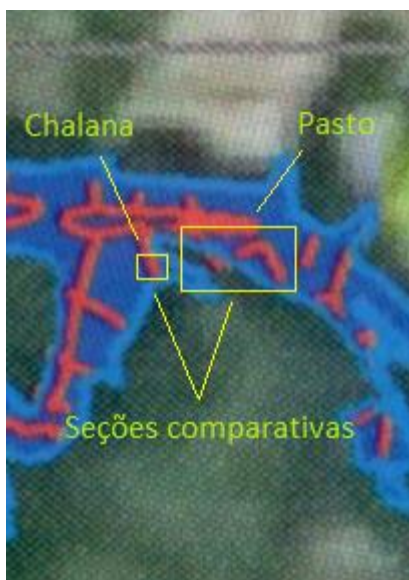


Figura 5.5 – Seções do levantamento da EESC/USP utilizadas na comparação de pontos homólogos – pasto e chalana (início do trecho).

Fonte: Autor.

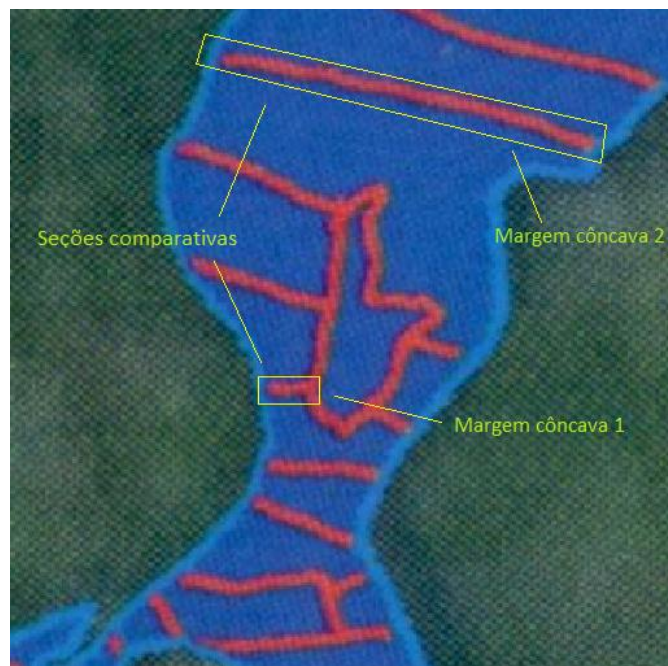


Figura 5.6 – Seções do levantamento da EESC/USP utilizadas na comparação de pontos homólogos – curvas margens côncavas 1 e 2 (início do trecho).

Fonte: Autor.

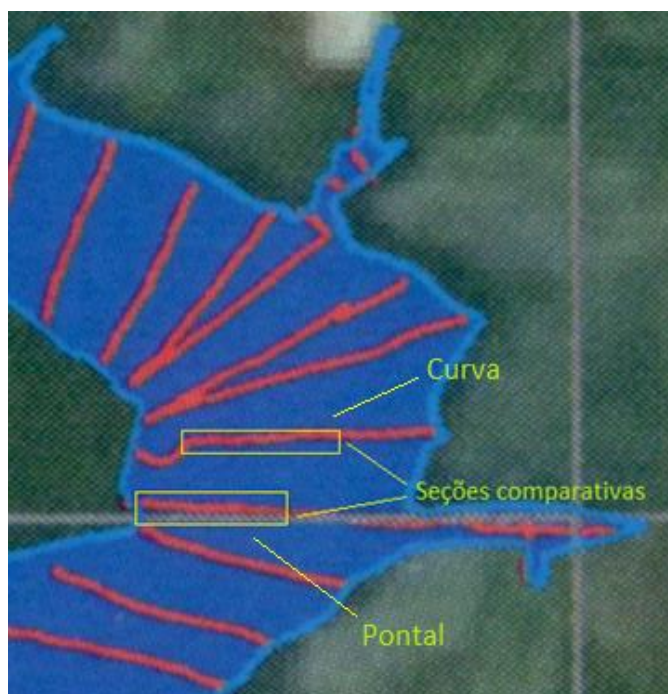


Figura 5.7 – Seções do levantamento da EESC/USP utilizadas na comparação de pontos homólogos – pontal e curva (final do trecho).

Fonte: Autor.

5.2.2. Determinação da Linha de Terra

A determinação da linha de terra ou linha de contorno do reservatório de Barra Bonita foi traçada utilizando como base a poligonal vetorizada disponibilizada pela AES Tietê, bem como os dados dos levantamentos batimétricos. Foi adotada a premissa de que os levantamentos batimétricos continham dados mais precisos e confiáveis, isto é, suas coordenadas foram tomadas como mais corretas e, assim, a linha de terra foi ajustada seguindo-se a tendência da poligonal vetorizada, porém, de forma a contornar todas as regiões onde haviam dados de batimetria. Utilizando o programa AutoCAD Civil 3D, foram importados todos os dados dos levantamentos batimétricos e, minuciosamente, foi ajustada a linha de terra, trecho a trecho. Deste modo, obteve-se um contorno mais coerente, que se encaixa perfeitamente aos dados de batimetria. A linha de terra foi definida na cota 460.00 metros, a fim de evitar problemas durante os cálculos nas regiões próximas às bordas (limite entre água e terra).

5.2.3. Dados hidrológicos

As séries históricas de vazões líquidas são utilizadas, após avaliadas suas consistências, durante o processo de modelagem hidrodinâmica. Para cada seção de controle, com dados de entrada do modelo, foram associadas séries temporais de um período pré-determinado. O programa permite que se associe diferentes tipos de séries históricas à mesma seção transversal, para diversos tipos de dados de entrada que se tenha (vazões, níveis d'água, velocidades etc.).

5.2.3.1. Estações Fluviométricas

Os dados utilizados são provenientes das estações fluviométricas de Laranjal Paulista e Piracicaba, mantidas pela AES Tietê, nos rios Tietê e Piracicaba respectivamente, como apresentado na Figura 5.5. As estações continham dados de vazões afluentes, de hora em hora, de 20/06/2006 à 12/09/2011.



Figura 5.5 – Localização das estações fluviométricas.

Fonte: MOREIRA (2012).

Os dados fluviométricos continham falhas e passaram por um tratamento, para que as inconsistências fossem reparadas. Foram identificados dois tipos de falhas: curtas e longas. As falhas foram consideradas curtas para intervalos de até quatro horas e, neste caso, os valores foram interpolados linearmente. Para intervalos superiores, os valores foram calculados seguindo-se a tendência observada nos dados da série histórica da outra estação fluviométrica, para o mesmo período. Isto é, foi analisado, para o intervalo de tempo com falha nos dados, como se comportava a vazão no outro rio e, observadas as diferentes proporções dos cursos d'água, foram preenchidas as inconsistências com valores que seguiam esta curva de tendência. Para tal, as variações nos valores de vazão horária foram definidas em porcentagem, com o intuito de se garantir a proporcionalidade das diferentes contribuições das sub-bacias. Como estas tem regimes de precipitação similares, considerou-se que a variação na vazão de um dos cursos d'água representava também uma variação na vazão do outro, e que, devido às diferentes dimensões das bacias, apresentam diferentes contribuições em termos de volume de água aportado durante uma chuva. Devido à esta diferença, as variações foram tomadas adimensionalmente, visando fornecer valores propocionais que conferissem consistência ao método aplicado.

Assim, consolidou-se a base de dados hidrológicos. Esta, foi considerada, posteriormente, no cálculo das vazões a serem inseridas na exata seção de entrada do modelo hidrodinâmico. Foi necessário calcular o valor incremental de vazão devido à não coincidência das primeiras seções de controle com a localização das estações fluviométricas. A determinação destas vazões de entrada, aplicada ao reservatório de Barra Bonita conforme item 4.1.3.1 é apresentada a seguir.

5.2.3.1.1. Vazões incrementais – estimativa por área de contribuição

A determinação das vazões incrementais drenadas pelos trechos das sub-bacias dos rios Tietê e Piracicaba, localizados entre os postos fluviométricos supracitados e as seções de entrada do modelo numérico, foi feita por correlação entre área e vazão. Considerou-se que as áreas das sub-bacias que tem como exutório as seções onde se localizam os postos de medição drenaram as vazões obtidas nas séries históricas. Sendo assim, os trechos adicionais, localizados entre estes postos e as primeiras seções de controle, são responsáveis por drenar um volume de água que é proporcional à sua área. Isto é, cada trecho compreende uma certa porcentagem da área total, que foi correlacionada diretamente com os dados de vazões das estações fluviométricas.

As áreas foram determinadas utilizando-se o programa AutoCAD. Determinou-se as contribuições percentuais, nas áreas totais, das sub-bacias dos rios Tietê e do Piracicaba. As sub-bacias do Tietê e do Piracicaba, assim como as áreas determinadas para o cálculo das vazões incrementais são apresentadas na Figura 5.6.

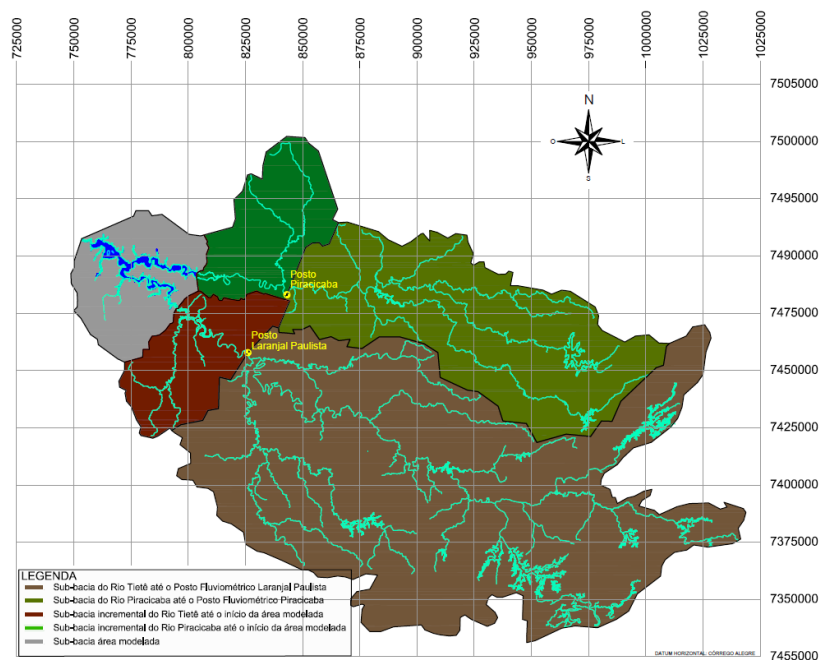


Figura 5.6 – Áreas de contribuição utilizadas no cálculo das vazões incrementais.

Fonte: MOREIRA (2012).

Para o rio Tietê, a área do trecho contribuinte da sub-bacia (vinho) representa um incremento de 13% na vazão medida no posto fluviométrico de Laranjal Paulista. Para o rio Piracicaba, a área contribuinte (verde escuro) representa um incremento de 34% na vazão medida no posto Piracicaba.

Foi possível, assim, estimar as vazões afluentes atravessam as seções de entrada adotadas na modelagem hidrodinâmica. O valor incremental foi somado às vazões dos postos em ambiente de planilha, para todas as séries históricas existentes.

5.2.4. Dados sedimentológicos

5.2.4.1. Amostras do material do leito

Os levantamentos de dados com informações sobre o material constituinte do leito do curso d'água foram feitos pelo DH-SP, entre os dias 25 e 26 de outubro de 2010, pela equipe de campo da CPEA – Consultoria, Planejamento e Estudos Ambientais, contemplando um total de 30 amostras.

Foram realizadas análises físico-químicas para determinar a qualidade dos materiais, que foram posteriormente comparadas com os valores propostos pela Resolução do CONAMA 344/04. Os pontos determinados para o levantamento levaram em consideração a área a ser dragada, a cota de dragagem e o número mínimo de amostras a serem coletadas. Cada ponto de coleta é determinado pela sigla PS, acompanhada do número correspondente e da camada em que se obteve o material: superfície, intermediária ou fundo.

Os resultados mostram a presença predominante de materiais mais finos como argilas e siltes. Contudo, apresentam também frações de areias finas e muito finas. A Figura 5.7 apresenta a posição dos pontos de coleta de material do leito, localizados no canal balizado do trecho assoreado mais crítico.

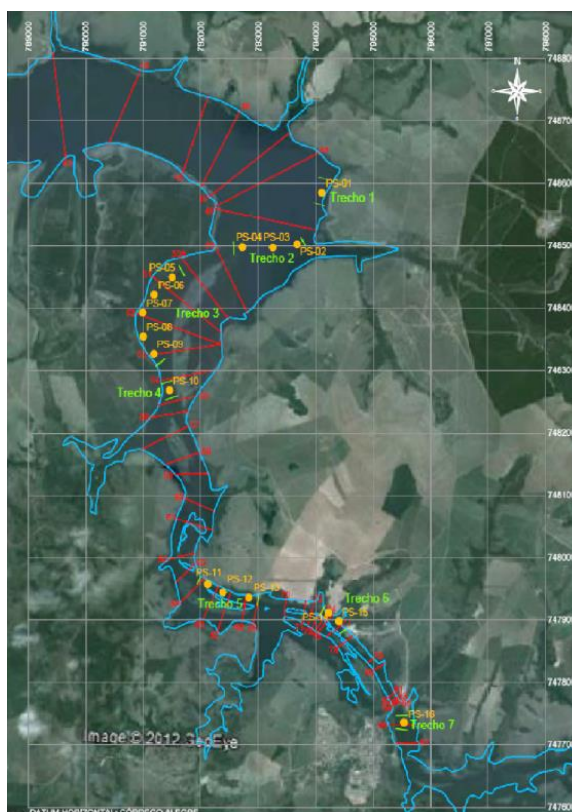


Figura 5.7 – Localização dos pontos de coleta de amostras de material do leito.

Fonte: MOREIRA (2012).

5.3. Simulações-teste: modelo hidrodinâmico

As simulações para avaliação da qualidade dos dados de campo, com finalidade de modelagem numérica da hidrodinâmica da região, utilizaram dados horários de vazões e níveis d'água que foram retirados de séries históricas com informações de janeiro de 2006 a 2014.

A régua que mede os níveis na seção de entrada (rio Tietê) se localiza no Terminal EPN-TORQUE, situado no Km 87 da hidrovia, e forneceu dados entre janeiro de 2006 e agosto de 2014. A régua localizada no barramento é mantida pela AES Tietê e forneceu dados horários de níveis d'água, para o mesmo período. Os dados utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Dados utilizados nas simulações-teste para as seções abertas do modelo numérico.

Simulações	Barramento	Tietê	Piracicaba
1	Nível	Nível	Nível
2	Nível	Vazão	Vazão
3	Vazão	Vazão	Vazão

Fonte: Autor.

Para os dados de batimetria foram elaborados mosaicos compostos pelo levantamento da EESC/USP e pelo levantamento do DH do ano de 2006, devido ao menor intervalo de tempo entre as duas campanhas. As coordenadas utilizadas tem como referência o *datum* horizontal de Córrego Alegre e a projeção escolhida foi UTM.

5.4. Comparação entre dados de batimetria e levantamentos expeditos

Utilizando os dados coletados em campo, nos levantamentos expeditos, foi possível comparar a evolução da forma do leito em seções conhecidas (homólogas). Previamente, são definidas seções de referência, a partir do levantamento da EESC/USP

e, em seguida, os pontos de interesse. Em campo foram medidas as altitudes ortométricas destes pontos que formam transectos, de forma a compará-los posteriormente em ambiente de planilha com os valores medidos com aparelhos de batimetria. Plota-se, portanto, num gráfico, os pontos das seções transversais originais e os pontos dos levantamentos expeditos. Para efeito de comparação foram utilizados dados do levantamento da EESC/USP de 2004 e dados do DH de 2010 (mais abrangentes e recentes), exceto nas regiões onde não havia dados do DH (pasto).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a compilação de dados de batimetria, fluvimétricos e sedimentológicos, gerou-se uma base de dados para o desenvolvimento da modelagem numérica hidrodinâmica bidimensional da região do reservatório do AHE de Barra Bonita-SP. Foram utilizados também os dados dos levantamentos expeditos na comparação com pontos homólogos dos levantamentos da EESC/USP (2004) e com os pontos do levantamento do DH de 2010 (mais abrangente).

Simulações – Mike Zero

As simulações executadas tinham a função de verificar se os dados de campo continham informações suficientes para o desenvolvimento da modelagem hidrodinâmica do reservatório de maneira satisfatória. Para tal, procurou-se reproduzir a diferença de níveis d'água observada entre as medidas da régua do barramento e do Terminal EPN-TORQUE.

As vazões e os níveis d'água utilizados como dados de entrada (*inputs*) do modelo foram mantidos constantes com o intuito de verificar a formação da curva de remanso, após a estabilização do modelo durante as simulações. O período de simulação foi de 3 dias e o passo de tempo de 30 segundos. O coeficiente de rugosidade de Manning adotado foi de 0,035, condizente com valores da literatura para cursos d'água naturais.

Como dados de saída (*outputs*) foram obtidas as vazões defluentes e os níveis d'água no barramento, as vazões afluentes e os níveis d'água nas seções dos rios, o nível d'água no terminal (pontual), e uma saída com dados de velocidades, direção do fluxo, vazões específicas entre outros de toda a área modelada. Para todas as simulações foram obtidos os mesmos tipos de dados de saída.

Simulação 1

A simulação 1 utilizou como dados de entrada os níveis d'água medidos no barramento (448,19 m) e os níveis na seções dos rios Tietê (448,37 m) e Piracicaba

(448,22 m), referente ao dia 08/10/2012. Para verificação dos níveis foi utilizado o dado de nível d'água do terminal EPN-TORQUE do mesmo dia (448,35 m).

Esta simulação apresentou a melhor correlação com o níveis medidos no terminal. Entretanto, para as vazões que atravessam as seções de entrada, não houve correlação alguma, apresentando valores cerca de 4 vezes maiores que os valores medidos em campo para o rio Tietê ($\cong 108 \text{ m}^3/\text{s}$ – protótipo; $\cong 450 \text{ m}^3/\text{s}$ – modelo) e cerca de 15 vezes maiores que a vazão medida em campo para o rio Piracicaba ($\cong 50 \text{ m}^3/\text{s}$ – protótipo; $\cong 740 \text{ m}^3/\text{s}$ – modelo).

Observa-se que a não correlação dos valores pode estar associada ao deslocamento vertical da batimetria ou à sua distorção caso as medidas da régua do barramento não sejam ortométricas. Quando se impõem níveis como dados de entrada para as seções dos rios Tietê e Piracicaba, apesar da boa correlação com o dado de nível do terminal, obtém-se como resultado vazões muito superiores, com valores que não são aceitáveis. Como a diferença de cotas entre as régua varia ao longo do tempo, sabe-se que há a influência do remanso nessa região, o que pode afetar os levantamentos de campo executados da maneira usual.

Outro problema que pode acarretar em diferenças significativas no processo de modelagem hidrodinâmica é a não utilização de altitudes ortométricas nas régua e, como agravante, a utilização de altitudes geométricas com *data* horizontais diferentes. Como se sabe, as ondulações geoidais podem acarretar em diferenças consideráveis nas cotas dos pontos para diferentes elipsoides e *data*.

Simulação 2

A simulação 2 utilizou como dados de entrada o nível d'água no barramento e vazões nas seções de entrada nos rios Tietê ($\cong 108 \text{ m}^3/\text{s}$) e Piracicaba ($\cong 50 \text{ m}^3/\text{s}$). Foram feitas simulações para duas situações diferentes – a primeira com níveis mais elevados (448,19 m) e a segunda com níveis mais baixos (445,80 m); as vazões foram mantidas iguais.

No primeiro caso não houve correlação com os níveis medidos na régua do terminal, isto é, não houve desnível algum que pudesse ser percebido pelas diferenças entre as cotas das réguas. Observa-se que as vazões com os valores originais não provocam a diferença no nível d'água que pode ser observado nas séries históricas dos dados de campo e, portanto, não refletem a influência do remanso no trecho estudado. Da maneira como se apresentam os resultados para esta simulação, o terminal e mesmo a seção de entrada do modelo estariam completamente dentro do reservatório (afogados), o que não é condizente com os dados de campo dos dias da simulação.

No segundo caso, o nível d'água mais baixo foi capaz de gerar resultados que condizem com os dados de campo. Este valor de nível d'água foi definido após diversas simulações, em que foram testados diferentes níveis, até que os valores de nível d'água nas réguas do barramento e do terminal obtidos com o modelo ficassem muito próximos dos valores medidos em campo. Assim, para o nível de 445,80 metros no barramento e as respectivas vazões dos rios Tietê e Piracicaba, observou-se um valor de 445,96 metros na régua do terminal. É possível notar que a curva de remanso se forma no modelo conforme os dados do protótipo (mesma diferença entre as réguas). Neste caso é possível que haja a influência do tempo que as partículas de água levam para se deslocar da seção de entrada até o barramento. Como os dados de campo pareados apresentam valores de níveis d'água e vazões afluentes únicos para o dia, estes podem não refletir a real situação do sistema. Portanto, caso não haja uma padronização na coleta destes dados, se torna inviável perceber a influência das ondas de cheia, das vazões vertidas e turbinadas no barramento, e do tempo gasto no deslocamento das partículas durante variações da vazão afluente nas diferenças de cotas entre as réguas.

Simulação 3

A simulação 3 utilizou apenas vazões como dados de entrada, tanto para o barramento quanto para as seções nos rios Tietê e Piracicaba. Esta simulação apresentou-se como a mais instável entre as três, com diversas inversões de fluxos nas seções transversais ao longo de todo o reservatório, indicando que as informações de campo não corroboram a conservação da massa (equação da continuidade) no sistema. Pode-se também inferir que não é possível verificar o balanço hídrico da região apenas

utilizando os dados de vazão e níveis existentes. Neste caso, o equilíbrio e estabilização da simulação se deu com o rebaixamento da linha d'água no barramento e, portanto, sem reproduzir as diferenças nos níveis medidas nas réguas.

Comparação entre os dados de batimetria e os levantamento expeditos

Além das simulações, foram coletados dados de campo em levantamentos expeditos com o intuito de comparar as cotas de pontos conhecidos de campanhas batimétricas anteriores com suas cotas ortométricas, medidas por meio de levantamento topográfico. As seções em que existem pontos homólogos foram comparadas em ambiente de planilha e os resultados das comparações são apresentados nas Figuras 6.1 a 6.6.

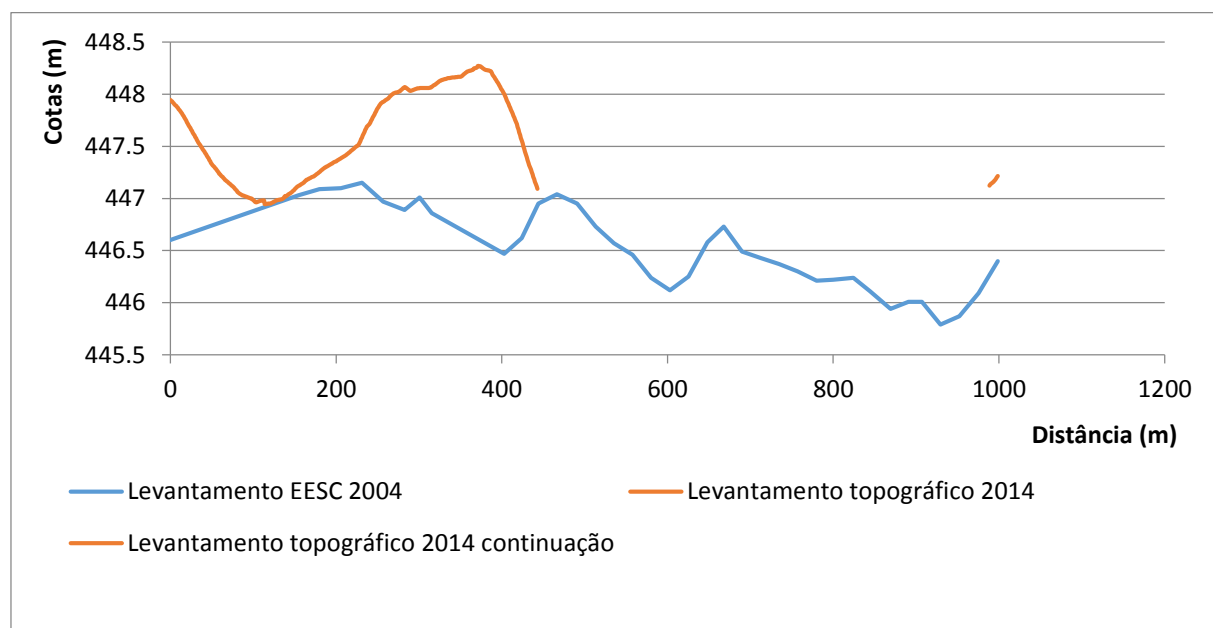


Figura 6.1 – Comparação entre levantamentos da EESC/USP e levantamentos expeditos (pasto).

Fonte: Autor.

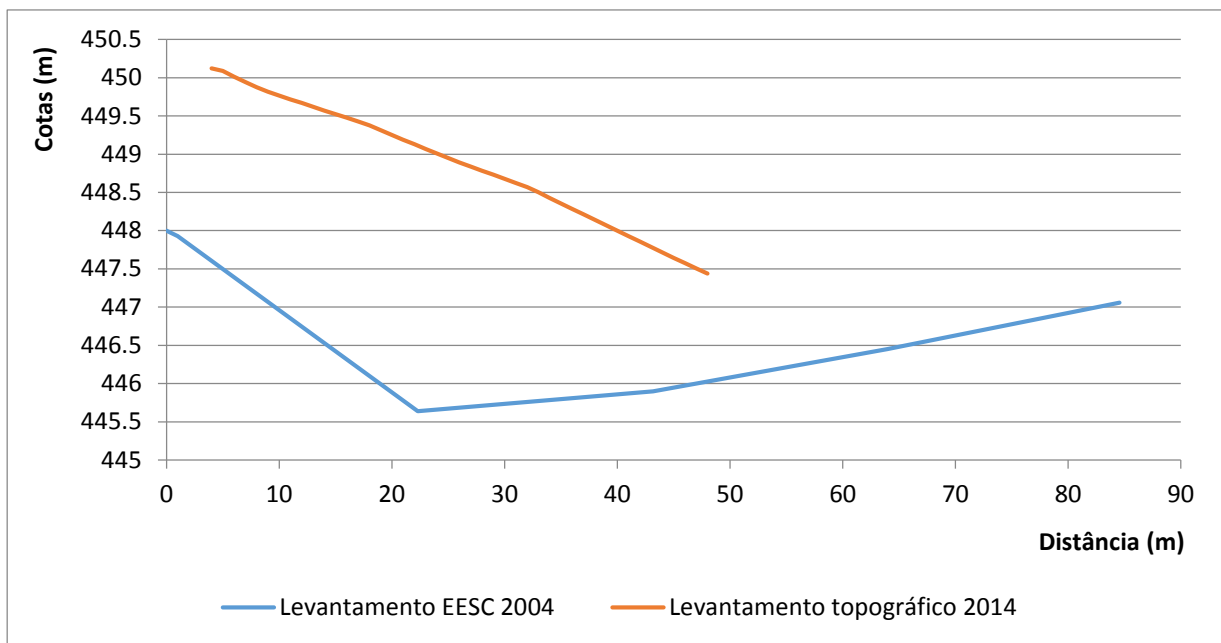


Figura 6.2 – Comparação entre levantamentos da EESC/USP e levantamentos expeditos (chalana).

Fonte: Autor.

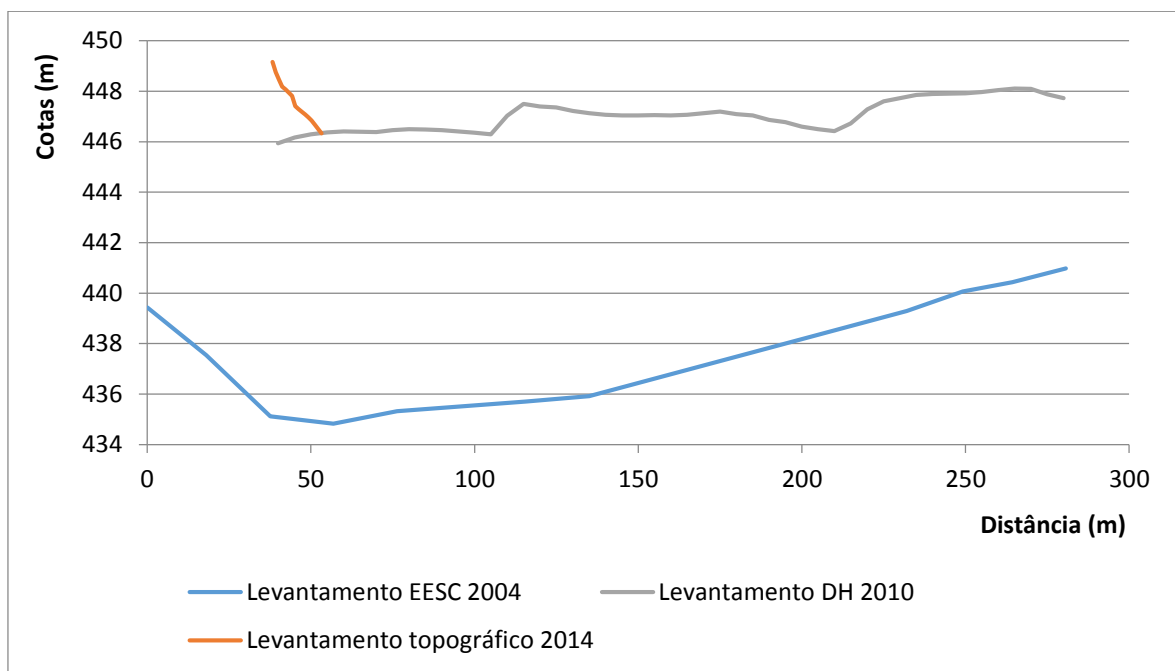


Figura 6.3 – Comparação entre levantamentos da EESC/USP e levantamentos expeditos (curva margem côncava 1).

Fonte: Autor.

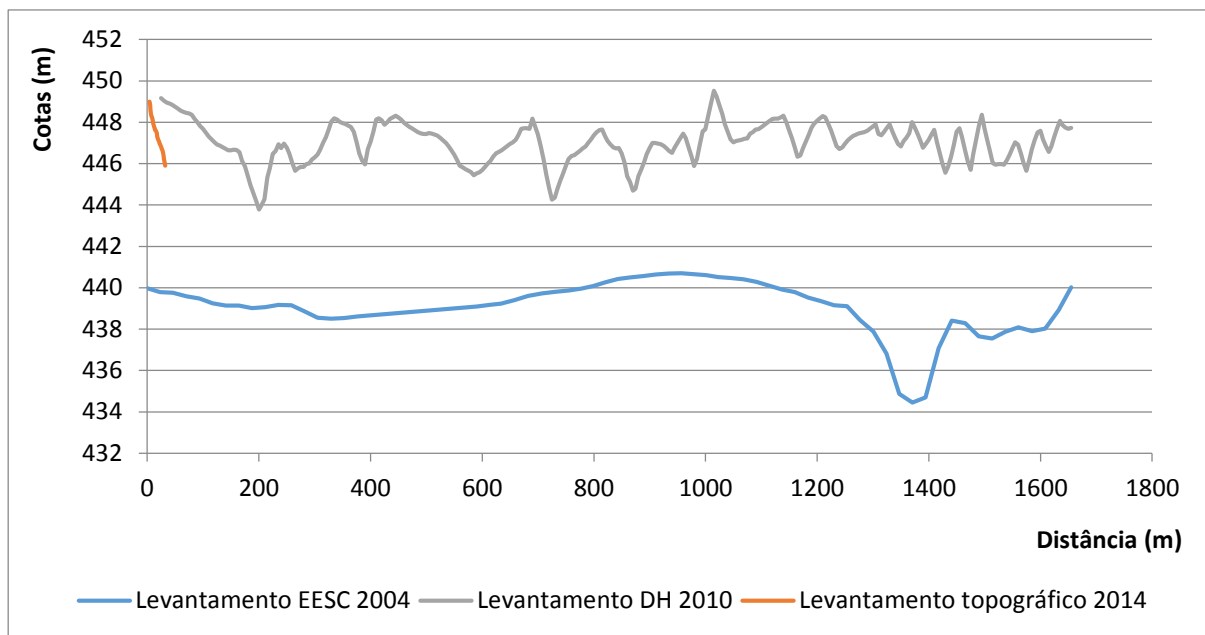


Figura 6.4 – Comparação entre levantamentos da EESC/USP e levantamentos expeditos (curva margem côncava 2).

Fonte: Autor.

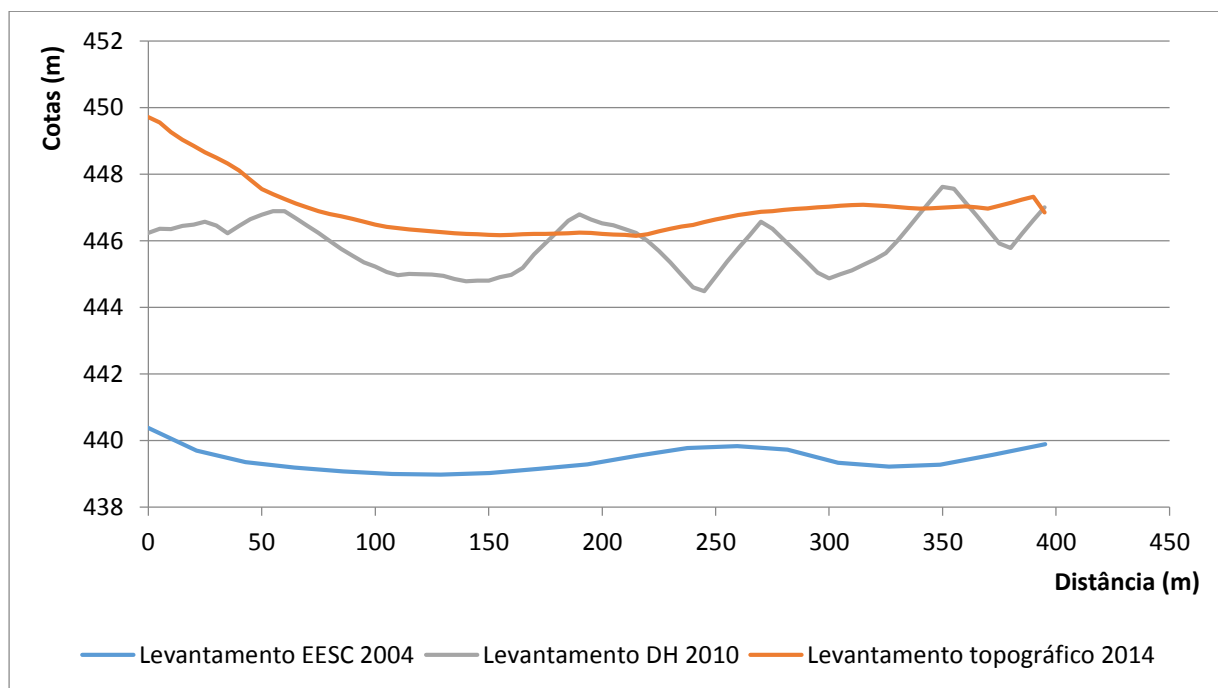


Figura 6.5 – Comparação entre levantamentos da EESC/USP e levantamentos expeditos (pontal).

Fonte: Autor.

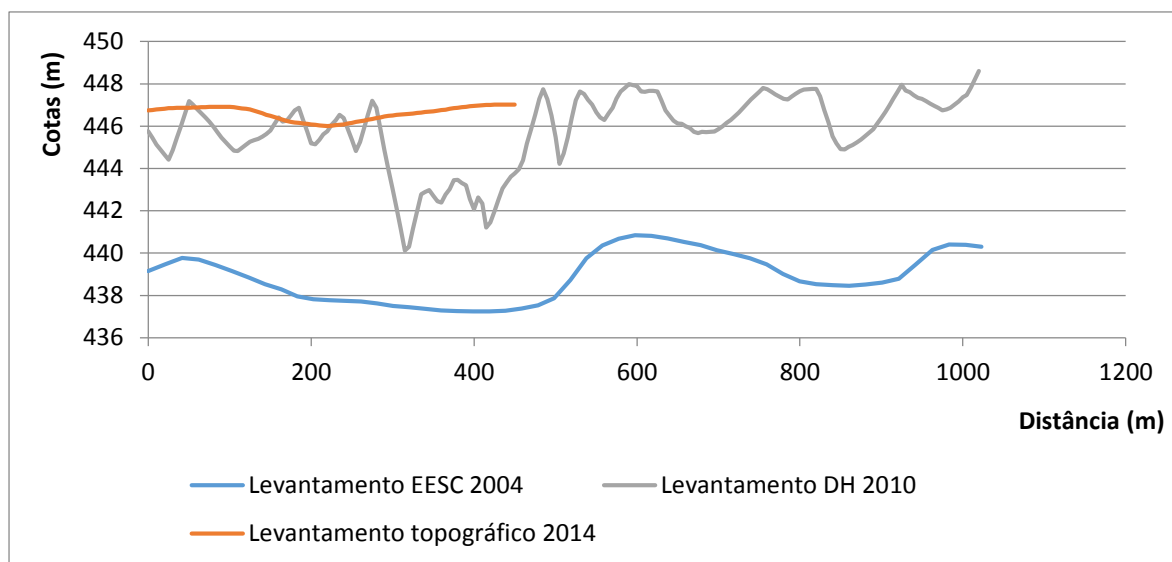


Figura 6.6 – Comparação entre levantamentos da EESC/USP e levantamentos expeditos (curva).

Fonte: Autor.

Não é possível definir um padrão no processo de assoreamento do reservatório. Como pôde ser observado, para diferentes trechos ao longo do reservatório houve movimentação de material sólido através das seções. Em alguns trechos o alteamento das cotas de fundo fica evidente, principalmente, quando são comparados os levantamentos da EESC/USP com os levantamentos expeditos. As feições batimétricas das seções seguem a mesma tendência, entretanto, existem diferenças de cotas de cerca de 10 metros em algumas regiões. Quando se compara o levantamento do DH com os demais, percebe-se uma certa discrepância nas feições, o que pode ser proveniente do maior detalhamento do levantamento e, também, do equipamento utilizado. É possível perceber que houve uma mudança na batimetria ao longo do tempo, o que pode ser correlacionado à dinâmica sedimentar do reservatório. Todavia, não há como corrigir os dados de batimetria no trecho de remanso apenas com as informações provenientes dos levantamentos expeditos, conforme proposto no item 4.1.1.1, pois não é possível identificar um padrão na mudança das cotas que possa ser aplicado a todos os dados dos levantamentos anteriores.

Desta forma, visando obter as altitudes ortométricas (cotas) dos pontos no trecho de remanso, é necessário que sejam instaladas réguas para medição de nível d'água ao

longo do reservatório, com espaçamento previamente definido, de forma a abranger toda a região dos levantamentos de campo. As réguas devem ser instaladas e zeradas a partir de um ponto com coordenadas e altitude ortométrica conhecidas (referência de nível), de modo a fornecerem dados da cota da linha d'água ao longo do trecho de remanso para utilização no processamento dos levantamentos batimétricos. A leitura das réguas deve ser feita simultaneamente, tanto das réguas já existentes quanto das instaladas, nos intervalos de tempo definidos para os levantamentos.

Para transectos localizados no alinhamento das réguas, o nível d'água de referência será o da própria régua; para os transectos intermediários, o nível d'água deve ser interpolado entre duas réguas subsequentes, considerando-se a curva de tendência que se forma ao plotar-se os pontos medidos em todas as réguas num dado intervalo. Este procedimento garante confiabilidade em relação ao posicionamento altimétrico dos pontos, que terão suas altitudes ortométricas definidas. Vale ressaltar que visa-se tornar o modelo hidrodinâmico muito mais representativo e fiel às condições de protótipo, garantindo que, posteriormente, durante a modelagem de transporte de sedimentos, os fenômenos hidráulicos sejam reproduzidos de maneira correta. Conforme reforçam GARCIA e GONÇALVES (2011) e DHI (2012a), a modelagem hidrodinâmica é de extrema importância e exige rigor em sua calibração e validação, pois o transporte de sedimentos está intimamente ligado à hidrodinâmica de um escoamento e à interação entre o fluido e o material sólido.

Para o posicionamento altimétrico, como se trata de um escoamento com superfície livre, é necessário que se obtenha para os pontos de batimetria suas altitudes ortométricas e não suas altitudes elipsoidais. Aqui, é necessário que se atente para o fato de que as altitudes geométricas estão relacionadas diretamente a elipsoides fictícios (descritos matematicamente) que se aproximam da forma do geoide. As diferenças entre as altitudes ortométricas e elipsoidais são denominadas ondulações geoidais e representam o afastamento do elipsoide em relação ao geoide ou vice-versa. A altitude ortométrica de um ponto é aquela medida em relação ao nível médio do mar e a altitude elipsoidal é aquela medida em relação ao elipsoide de referência (Figura 6.7). É possível

calcular a ondulação geoidal para um ponto com coordenadas conhecidas, e nota-se que para diferentes elipsoides, diferentes valores de ondulação geoidal são encontrados.

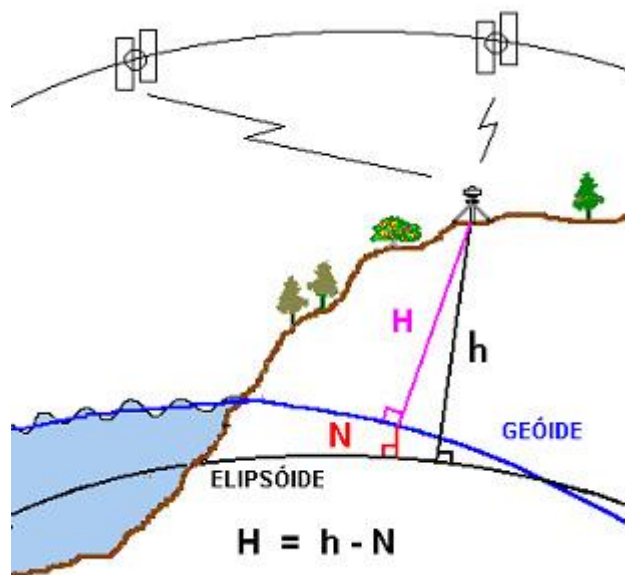


Figura 6.7 – Altitude geométrica (h), altitude ortométrica (H) e ondulação geoidal (N).

Fonte: IBGE (2015).

Expostos os problemas relacionados à base de dados e ao desenvolvimento da modelagem hidrodinâmica, apresenta-se os requisitos exigidos para que os levantamentos coletem dados que sejam suficientemente confiáveis para a modelagem numérica hidrossedimentológica.

Dados de batimetria

Conforme apresentado no item 4.1.1.1, a prática comum adotada nos levantamentos de batimetria em reservatórios pode acarretar em uma má representação das formas do leito e margens nas regiões sob influência do remanso, o que deve ser evitado pois compromete a modelagem hidrodinâmica neste trecho.

Para a região completamente dentro do lago, sob nenhuma influência do remanso, este procedimento é eficiente e menos trabalhoso. Entretanto, encontra-se grande dificuldade em definir os limites exatos entre o lago e o trecho de remanso e entre o trecho

de remanso e o trecho fluvial. Sendo assim, recomenda-se que seja feita a leitura de todas as réguas simultaneamente durante todo o levantamento.

É necessário evitar também distorções quanto ao posicionamento planimétrico dos pontos, quando são utilizados levantamentos oriundos de fontes distintas. A fim de prevenir futuras incompatibilidades entre levantamentos, é importante que se defina o *datum* horizontal, o meridiano central e a projeção padrões para todo o trabalho, evitando assim distorções entre dados de fontes diferentes utilizados em conjunto (mosaicos).

É importante que sejam feitos levantamentos batimétricos sistemáticos com o intuito de acompanhar a evolução, em termos morfológicos, de toda a região e, se necessário, em regiões de interesse, devem ser executados levantamentos com maior nível de detalhamento. Este é um procedimento que deve ser tomado como primordial se se pretende modelar um reservatório, pois permite avaliar o comportamento hidrossedimentológico do corpo d'água ao longo do tempo.

Para fins de modelagem, é necessário acompanhar a evolução da batimetria ao longo de todo o reservatório, tanto em áreas mais propícias à deposição de material sólido quanto nas áreas mais sujeitas à erosão, de modo que seja viável estimar os volumes de erosão/deposição. Este tipo de informação é indispensável para alimentar os modelos de transporte de sedimentos, uma vez que nos casos em que são utilizados modelos em duas dimensões, é de extrema importância a localização em planta das regiões assoreadas e erodidas, assim como compreender como acontecem as alterações na batimetria devido ao transporte sólido. Campanhas que contemplem dados para períodos úmidos e secos são necessários para que se avalie a influência da sazonalidade das vazões na resposta fluvial e na adaptação do corpo d'água durante um período mais longo.

É importante ressaltar que os trechos localizados entre as seções das estações fluviométricas e as seções de entrada dos modelos numéricos devem fazer parte do escopo de levantamentos batimétricos, uma vez que as séries históricas dizem respeito apenas àquela seção específica. Buscando resolver esse problema de forma mais simples, estimou-se vazões incrementais, conforme apresentado no item 4.1.3.1.

Entretanto, para resultados mais satisfatórios recomenda-se estender os levantamentos batimétricos até as estações fluviométricas mais próximas a montante, ou então que sejam instaladas novas estações em locais mais adequados quantos as existentes estiverem muito distantes.

Dados fluviométricos e hidrológicos

Os dados fluviométricos de vazões líquidas e sólidas, de níveis d'água, de velocidades e outros, são de extrema importância para a execução da modelagem hidrodinâmica e hidrossedimentológica de uma região que contém um reservatório de barragem. Estas informações são utilizadas como dados de entrada para as simulações e exige-se consistência e confiabilidade para que se obtenha resultados condizentes com o que se observa no protótipo. As exigências requeridas para a coleta destes dados são apresentadas:

Vazões líquidas

Devem ser coletados dados com uma discretização temporal preestabelecida, alimentando continuamente uma série histórica de vazões para cada estação fluviométrica dentro do sistema. É necessário que as estações de medição sejam instaladas em seções a montante da influência do remanso e tenham sua batimetria sempre atualizada. Além do acompanhamento das mudanças na batimetria, é necessário que se verifique a curva chave de vazão líquida, medindo periodicamente velocidades e níveis ao longo da seção transversal, atualizando os equacionamentos para as descargas líquidas. Dados coletados periodicamente e de maneira sistemática fornecem informações mais consistentes acerca dos fenômenos que regem hidro e morfodinamicamente a região, viabilizando um modelagem que reproduza mais fielmente as condições observadas no protótipo. É importante que sejam medidas as vazões dos tributários que deságuam dentro do reservatório assim como a jusante das estações fluviométricas localizadas no talvegue principal. Tais vazões contribuem para o balanço hídrico da sub-bacia hidrográfica e certamente influenciam a modelagem.

Para um melhor controle e acompanhamento do balanço hídrico e visando, acima de tudo, fornecer dados suficientemente detalhados para a modelagem numérica de um reservatório de barragem e das regiões adjacentes, é importante conhecer as vazões defluentes à jusante do barramento. Para tal, em muitas ocasiões, estes valores são computados somando-se as vazões vertidas àquelas calculadas teoricamente para turbinas de um aproveitamento hidrelétrico, o que acarreta em certas discrepâncias durante o processo de modelagem. O ideal, portanto, é que as vazões defluentes sejam medidas a jusante do barramento, numa estação fluviométrica distante da influência dos fluxos turbulentos do canal de fuga e do vertedor.

Vazões sólidas

Devem ser coletados dados com uma discretização temporal preestabelecida, alimentando continuamente uma série histórica de vazões para cada estação fluviométrica dentro do sistema. É importante que sejam coletados nas mesmas seções dos dados de vazões líquidas para que seja plotada, posteriormente, a curva chave de vazões, a qual correlaciona as descargas líquidas e a sólidas por meio de um equacionamento. Devem ser coletadas amostras tanto do material transportado em suspensão quanto dos grãos arrastados junto ao fundo, e computadas as contribuições das diferentes frações.

Deve-se atentar também para a grande importância que os tributários tem no carreamento de material sólido para dentro do reservatório. Em geral, os afluentes apresentam declividades superiores às do talvegue principal, podendo contribuir de maneira significativa para a entrada de sedimentos de maior granulometria no sistema. É importante que sejam medidas as contribuições em termos de vazão sólida dos tributários, assim como a granulometria do material aportado no canal principal.

Estes dados são de extrema importância para a modelagem do transporte de sedimentos pois fornecem, para períodos de tempo predefinidos, os volumes de sedimento trazidos de montante e que, certamente, serão depositados dentro do reservatório. Deve ser desconsiderada a carga de lavagem, pois esta não faz parte do material usualmente transportado pelo rio.

Níveis d'água

Devem ser coletados dados com uma discretização temporal preestabelecida, alimentando continuamente uma série histórica de níveis d'água para cada ponto de medição dentro do sistema. Estes pontos devem compreender toda a região que se estende desde a estação fluviométrica até o barramento, ficando a critério do usuário a quantidade necessária para atender aos objetivos dos estudos. Assim como apresentado para os pontos de batimetria, o lago, o trecho de remanso e o trecho fluvial a montante devem ter seus níveis d'água conhecidos para que seja possível distingui-los hidrodinamicamente. A coleta de dados destes pontos deve ser feita de maneira simultânea, isto é, para cada intervalo de tempo definido deve haver dados de todos os pontos de medição, a fim de que se trace a declividade da linha d'água e que se possa inferir a perda de energia sofrida pelo escoamento trecho a trecho. Este é um fato que está diretamente ligado à modelagem hidrodinâmica destes ambientes, uma vez que, como apresentado no item 3.2, os reservatórios podem ser divididos longitudinalmente em três regiões com características conhecidas e distintas entre si : zona lacustre, zona de transição e trecho fluvial (UNEP, 2000).

Sabendo-se que a perda de energia do escoamento não acontece apenas em função do atrito proporcionado pela rugosidade das fronteiras e nem pelas tensões viscosas entre as partículas do fluido, torna-se então extremamente útil inferir a perda de carga através da análise de dados de nível d'água. Estes dados permitem avaliar as alturas de lâminas d'água e relacioná-las com dados de vazões líquidas e sólidas desde o trecho fluvial – considerado, simplificado, como escoamento permanente e uniforme, passando pelo trecho de remanso – onde há a formação de uma curva de acomodação da água (transição entre o rio e o lago do reservatório), até o lago propriamente dito, com características hidrodinâmicas muito diferentes das observadas nas regiões anteriores.

Derivadores

Derivadores são quaisquer dispositivos dotados de uma parte flutuante na superfície da água e de direcionadores (haletas) que se alinham às linhas de corrente do

escoamento. Para que este dispositivo forneça informações que sejam úteis, é necessário que seja acoplado um equipamento de posicionamento global via satélite que armazene informações para reproduzir, posteriormente, o trajeto percorrido pelo derivador. É importante medir o tempo gasto durante o deslocamento entre dois pontos conhecidos para o cálculo da velocidade média do escoamento neste trecho. É possível posicionar as haletas em diferentes profundidades e, assim, ajustá-las para a que melhor represente o perfil de velocidades no trecho. Além de fornecer dados sobre a velocidade média no trecho, estas trajetórias conhecidas nos indicam as direções do fluxo no trajeto, indicando como se comportam as linhas de corrente. Estas, ao se aproximarem ou afastarem, são indicadores qualitativos sobre as regiões com maiores probabilidades de erosão/deposição. Desta forma, torna-se viável inferir acerca da influência da geomorfologia sobre a hidrodinâmica do escoamento, assim como estimar o tempo que partículas de água gastam para percorrer certas distâncias.

Os dados oriundos de levantamentos com derivadores podem ser utilizados na calibração dos modelos hidrodinâmicos, através da avaliação dos resultados obtidos nas simulações para trajetórias de partículas. Tais partículas podem ser acompanhadas durante as simulações e suas trajetórias, se se apresentarem similares às observadas no protótipo, são um ótimo indicativo de que a modelagem reproduz fielmente as condições reais de campo. Este método é também utilizado para estudos das correntes de vazante e enchente em estuários, apresentando-se ferramenta eficaz na modelagem hidrodinâmica.

Dados sedimentológicos

A coleta de dados sedimentológicos é de grande importância para a caracterização do leito e das margens do corpo d'água. Estas informações são utilizadas na modelagem do transporte de sedimentos e constituem a base para uma reprodução fiel do protótipo. Os dados obtidos das coletas devem apresentar a granulometria do material presente em diferentes locais do relevo submerso, possibilitando inferir sobre os locais mais propícios à deposição de finos ou de material mais grosseiro, assim como a composição granulométrica das diferentes camadas do solo do leito e das margens.

Recomenda-se, para fins de modelagem, que estas coletas sejam executadas ao longo de todo o reservatório, com especial ênfase na região do delta de deposição.

Os dados que fornecem informações sobre o material que compõe o relevo submerso do corpo d'água servem também para que se avalie a carga sedimentar transportada pelo curso d'água, além de darem indicativos sobre a rugosidade do leito que atua diretamente sobre a hidrodinâmica do escoamento. A hidrodinâmica do escoamento e a evolução da geomorfologia se influenciam mutuamente, sendo o principal fator a complicar a modelagem de ambientes com fronteiras móveis, como é o caso do transporte de sedimentos.

No processo de modelagem do fenômeno de transporte de sedimentos num curso d'água e dentro de um reservatório, quanto maior a quantidade e a qualidade dos dados de campo coletados na região de interesse, mais fidedigna será a reprodução destes processos por meio de recursos computacionais. Uma vez que se trata de um fenômeno de grande complexidade, ainda carente de formulações analíticas que o descrevam e, portanto, com certo grau de empirismo associado aos equacionamentos hoje existentes, é notória a importância de se obter dados das regiões estudadas.

7. CONCLUSÕES

Conclui-se que para fins de modelagem numérica hidrodinâmica e de transporte de sedimentos, o procedimento de coleta dos dados de campo é de extrema importância para a qualidade e confiabilidade dos mesmo. Logo, uma quantidade mínima de informações é requerida e deve ser obtida de maneira rigorosa, com procedimentos específicos.

Por se tratar de um reservatório de barragem, com todas as suas peculiaridades e dificuldades inerentes, fica evidente a necessidade de uma base de dados mais sólida para ser utilizada durante a modelagem. Os fenômenos envolvidos nestas regiões ainda não tem formulações analíticas que se apliquem a uma grande gama de casos, requerendo uma maior quantidade de informações de campo.

Verificou-se, a partir das simulações e da comparação entre os levantamentos, que apesar de dispor de uma grande quantidade de dados quando comparado a outros reservatórios, estes não são suficientes para embasar uma modelagem hidrodinâmica satisfatória. Esta, por sua vez, irá embasar a modelagem de transporte de sedimentos que está intimamente ligada à hidrodinâmica de um escoamento.

RECOMENDAÇÕES

Desta forma, como recomendação para levantamentos de campo que visem obter dados com a finalidade de embasar modelagens numéricas desses ambientes, apresenta-se os requisitos desejáveis e mínimos:

Dados desejáveis

- Batimetria: levantamentos a cada 6 meses, nos períodos seco e úmido, desde as estações fluviométricas até o barramento. Deve-se distinguir os trechos fluvial, de remanso e do reservatório. Deve se estender até a estação fluviométrica mais próxima a montante; caso seja inviável deve ser instalada uma nova estação em local adequado.

- Hidrológicos:

- Vazões líquidas: coleta de dados a cada hora em todas as estações fluviométricas, tanto a montante quanto a jusante do barramento.

- Vazões sólidas: coleta de dados 1 vez ao dia, em todas as estações fluviométricas, tanto a montante quanto a jusante do barramento. Coleta de material transportado em suspensão e por arrastamento de fundo. Determinação das proporções das frações e faixas granulométricas. Definir a curva chave de vazões líquidas e sólidas e o respectivo equacionamento.

- Níveis d'água: coleta de dados a cada hora em todas as réguas ao longo do reservatório (existentes e instaladas). Deve ser dada maior atenção para o trecho de remanso, instalando-se número suficiente de réguas para a abrangência dos levantamentos batimétricos nesta região. A precisão ideal é da ordem dos milímetros. Os dados devem ser compilados junto aos dados de vazões líquidas nos respectivos horários.

- Derivadores: obtenção de trajetórias de derivadores em no mínimo 3 regiões diferentes, nos diferentes trechos do reservatório.

- Sedimentológicos: coleta de material do leito e das margens, ao menos 1 vez por ano, desde o trecho de remanso até o lago. Definir as proporções das frações e as curvas granulométricas.

Dados mínimos

- Batimetria: levantamentos a cada 12 meses desde as estações fluviométricas até o barramento. Deve-se distinguir os trechos fluvial, de remanso e do reservatório. Deve se estender até a estação fluviométrica mais próxima a montante; caso seja inviável deve ser instalada uma nova estação em local adequado.

- Hidrológicos:

- Vazões líquidas: coleta de dados a cada hora em todas as estações fluviométricas, no mínimo a montante do barramento.

- Vazões sólidas: coleta de dados a cada mês, em todas as estações fluviométricas, tanto a montante quanto a jusante do barramento. Coleta de material transportado em suspensão e por arrastamento de fundo. Determinação das proporções das frações e faixas granulométricas. Definir a curva chave de vazões líquidas e sólidas e o respectivo equacionamento.

- Níveis d'água: coleta de dados a cada hora em no mínimo 3 pontos de coleta ao longo do reservatório (barramento, transições entre lago e remanso e remanso e trecho fluvial). A precisão mínima é da ordem dos centímetros. Os dados devem ser compilados junto aos dados de vazões líquidas nos respectivos horários.

- Derivadores: obtenção de trajetórias de derivadores em no mínimo 1 região das diferentes zonas do reservatório – de preferência no trecho de remanso.

- Sedimentológicos: coleta de material do leito e das margens, ao menos 1 vez por ano, desde o trecho de remanso até o lago. Definir as proporções das frações e as curvas granulométricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFREDINI, P. **Obras e Gestão de Portos e Costas**, Ed. Edgard Blücher, 2 ed., 2009.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6023**: Informação e documentação – Referências – Elaboração, Rio de Janeiro: ABNT, ago. 2002.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10520**: Informação e documentação – Citações em documentos – Apresentação, Rio de Janeiro: ABNT, ago. 2002.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14720**: Informação e Documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, abr. 2011.
- BRAGA, B; BARBOSA, P. S. F.; NAKAYAMA, P. T. **Sistema de suporte à decisão em recursos hídricos**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH, Porto Alegre, v. 3, n. 3, p. 73-95, 1998.
- BRASIL. Agência Nacional de Transporte Aquaviário. **Panorama Aquaviário**, v. 3. Brasília: ANTAQ, 2009. 97 p. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/portal/pdf/PanoramaAquaviario3.pdf>>. Acesso em: 08 set. 2013.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. CARVALHO, N.O; FILIZOLA JÚNIOR, N.P; SANTOS, P.M.C; LIMA, J.E.F.W. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL, 2000, 140 p.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Modelo de ondulação geoidal - MAPGEO**: altitudes ortométricas, altitudes elipsoidais e ondulação geoidal. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm. Acesso em: 20 dez. 2014.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. **Plano Nacional de Logística e Transportes - PNLT**. 2012. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/images/2014/11/PNLT/2011.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2015.
- CARVALHO, N.O., GUILHON, L.G.; TRINDADE, P. A. **O assoreamento de um pequeno reservatório** - Itiquira, um estudo de caso. RBRH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 5, n. 1. Jan/Mar 2000, 68-79. Porto Alegre, RS, 2000.
- DELFT. Delft Hydraulics. **Software SOBEK** – manual. Disponível em: <http://www.ipp-hydro-consult.de/visioncontent/mediendatenbank/090630132150.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2014.

- DHI. MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM. **Hydrodynamic and Transport Module:** Scientific Documentation. 46 p., 2012a.
- DHI. MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM. **Mud Transport Module:** Scientific Documentation. Manual do usuário. 46 p. 2012b.
- ELOUBAIDY, A. F., MOHAMMED, T. A. GHAZALI, A. H., JUSOHL, A. B. **Regime Hydraulic Concepts and Equations:** The Case of Klang River, Malaysia. Pertanika Journal of Science. & Technology, p. 57-67, ISSN: 0128-7680 ,1999.
- FRANCATO, A. L., GIRELI, T. Z., LOPES, W. P. **Sistema de avaliação de perdas energéticas em hidroelétricas causadas por transporte hidroviário.** – SAPEHTH: “Relatório Etapa 7 – Proposição de alternativas que congreguem geração de energia e transporte hidroviário”. 2012, 104 p.
- FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics.** Organizado por KRAUSE, E. (1997). Berlin. Springer-Verlag. XIV, 1996, 356p.
- GARDE, R. J. **River Morphology.** Instituto de Tecnologia Indiano Roorkee. Ed. New Age International (P) Ltd. Publishers. 2006, 473 p.
- GARCIA, G. E.; GONÇALVES, J. E. **Implementação de modelo numérico para avaliação do transporte de sedimentos no reservatório de Itaipu - PR.** RBRH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 16, n. 3. Jul/Set 2011, 49-58. Porto Alegre, RS, 2011.
- GARCIA, P. D.; **“Caracterização Hidrossedimentológica das Correntes de Maré e do Transporte de Sedimentos associado à área portuária do Maranhão”.** Tese (Doutorado) – EPUSP, São Paulo, 2007.
- HICKIN, E. J., **River Geomorphology: Chapter 2:** Hydrology and the size of a river. Notas de aula do curso de geomorfologia fluvial. Departamento de Geografia da Faculdade de Meio Ambiente da Universidade Simon Fraser. Burnaby, British Columbia, Canadá, 2009a. Disponível em: <<http://www.sfu.ca/~hickin/RIVERS/Rivers2%28Hydrology%29.pdf>>. Acesso em: 06 ago. 2014.
- HICKIN, E. J., **River Geomorphology: Chapter 3:** River hydraulic and the channel. Notas de aula do curso de geomorfologia fluvial. Departamento de Geografia da Faculdade de Meio Ambiente da Universidade Simon Fraser. Burnaby, British Columbia, Canadá, 2009b. Disponível em: <<http://www.sfu.ca/~hickin/RIVERS/Rivers3%28Hydraulics%29.pdf>>. Acesso em: 06 ago. 2014.
- HICKIN, E. J., **River Geomorphology: Chapter 4:** Sediment Transport. Notas de aula do curso de geomorfologia fluvial. Departamento de Geografia da Faculdade de Meio Ambiente da Universidade Simon Fraser. Burnaby, British Columbia, Canadá, 2009c.

Disponível em: <
<http://www.sfu.ca/~hickin/RIVERS/Rivers4%28Sediment%20transport%29.pdf>>.
Acesso em: 06 ago. 2014.

HICKIN, E. J., **“River Geomorphology: Chapter 5: Channel morphology and planform.** Notas de aula do curso de geomorfologia fluvial. Departamento de Geografia da Faculdade de Meio Ambiente da Universidade Simon Fraser. Burnaby, British Columbia, Canadá, 2009d. Disponível em: <
<http://www.sfu.ca/~hickin/RIVERS/Rivers5%28Morphology-Planform%29.pdf>>.
Acesso em: 06 ago. 2014.

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

ICOLD, International Commission On Large Dams. **“World Register Of Dams, Update”**. Paris. 1988.

KOLBERG, F. J., HOWARD, A. D., **“Active channel geometry and discharge relations of U.S. Piedmont and Midwestern streams: The variable exponent model revisited”**. Water Resources Research, v. 31, n. 9, p. 2353-2365, 1995.

LANE, E. W., **A Study of the shape of channels formed by natural streams flowing in erodible material**. Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE), p.1-106, 1957.

LEOPOLD, L. B., MADDOCK, T., **The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications**. US Geological Survey Professional Paper, 55p. 1953. Disponível em: <
[http://eps.berkeley.edu/people/lunaleopold/\(040\)%20The%20Hydraulic%20Geometry%20of%20Stream%20Channels%20and%20Some%20Physiographic%20Implications.pdf](http://eps.berkeley.edu/people/lunaleopold/(040)%20The%20Hydraulic%20Geometry%20of%20Stream%20Channels%20and%20Some%20Physiographic%20Implications.pdf)>. Acesso em: 11 abr. 2014.

LEOPOLD, L.B., AND WOLMAN, M.G, **River channel patterns: Braided, meandering, and straight**: U.S. Geological Survey Professional Paper 282-B, p. 39–84, 1957.

MAUAD, F. F. **Previsão do assoreamento de reservatórios formados por barragens: Levantamento batimétrico e geração da curva cota-área-volume** – Represa de Barra Bonita. Trabalho executado pelo Núcleo de Hidrometria da EESC-USP em convênio com AES Tietê. 2005.

MATOS, A. J. S. **Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos por meio da ferramenta computacional “CAV-NH”**. Tese de Doutorado apresenta à EESC-USP, São Carlos, 2012.

MOREIRA, M. C. A., **Avaliação da influência da barragem de Barra Bonita-SP na morfodinâmica do rio tietê e seus impactos à navegação**. Tese (Mestrado) –

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

MORRIS, G.L., FAN, J. **Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use**. McGraw-Hill, New York, 1997.

NOVAK, P. MOFFA, A.I.B., NALLURI, C., NARAYANAN., **Hydraulic Structures**, 2.ed. London: E&FN SPON, 1996, 599 p.

PAIGE, A. D., HICKIN, E. J., **Annual bed-elevation regime in the alluvial channel of squamish river, southwestern British Columbia, Canada**. Earth Surface Processes and Landforms, v. 25, p. 991-1009, 2000. Disponível em: <<http://www.sfu.ca/~hickin/PDF%20Library/Paige&Hickin.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2014.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. EESC-USP. São Carlos. Projeto REENGE. 4ed., 2006, 529 p.

PRENT, M. T. H., HICKIN, E. J., **Annual regime problems of bedforms, roughness and flow resistance, Lillooet River, British Columbia, BC**. Journal of Geomorphology Research, Elsevier Science B. V., v. 41, n. 4, p. 369-390, 2001. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X0100068X>>. Acesso em: 12 ago. 2014.

RAMOS, C. L. **Hidráulica Fluvial**. Notas de aula do curso de graduação em Engenharia Civil da Faculdade Politécnica da Universidade de São Paulo. 2008.

ROSGEN, D. L., **A classification of natural rivers**. Catena, Elsevier Science B. V., v. 22, p. 169-199, 1994.

SAMPER, A. V. .G., **Descrição das obras de melhoria da hidrovia Tietê-Paraná previstas até 2014 e seus impactos na matriz de transportes**. Trabalho Final de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, 2011, 53 p.

SCHNITTER, N. J., **A History of DAMS – THE USEFUL PYRAMIDS**, Rotterdam: A.A.Balkema, 1994, 266 p.

SLEIGH, P.A., GASKELL, P.H., BERSINS, M. e WRIGHT, N.G. **An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries**, Computers & Fluids, v. 27, n. 4, p. 479-508, 1998.

SHUYOU, C., KNIGHT, D. W., **Review of regime theory for alluvial channels**. Journal of Hydrodynamics, China Ocean Press, v. 3, p. 1-7, Beijing, 2002.

SINGH, V. P., **On the theories of hydraulic geometry**. International Journal of Sediment Research, v. 18, n. 3, p. 196-218, 2003.

SOBENA HIDROVIÁRIO, **Hidrovia Tietê-Paraná** - Atracadouro de Espera da Eclusa de Bariri, Porto Alegre, 2011, 7 p.

UHLMANN, D., PAUL, L., HUPFER, M., FISCHER, R. **Lakes and Reservoirs**. Treatise on water science, Elsevier Science, p. 135-156, cap. 2.08. 2011.

UNEP. United Nations Environment Programme. Division of Technology, Industry and Economics. **Lakes and Reservoirs: Similarities, Differences and Importance**. Short Series on Planning and Management of Lakes and Reservoirs, v. 1, 2000. Disponível em: <http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/Short_Series/LakeReservoirs-1/index.asp>. Acesso em: 24 jul. 2014.

USACE. Uniter States Army Corp of Engineers. **Software HEC-RAS** – reference manual. Disponível em: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf). Acesso em: 05 jun. 2014.

WDFW. Washingon Department of Fish and Wildlife. **Capítulo 7.4 - Direct and Indirect Effects: Hydraulic and Geomorphic Modifications**. Compiled White Papers For Hydraulic Project Approval Habitat Conservation Plan (HCP), 2009, 904 p.

WRIGHT, N.G., CROSATO, A. **The hydrodynamics and morphodynamics of rivers**. Treatise on water science, Elsevier Science, p. 135-156, cap. 2.07, 2011.

WROBEL, L. C.; EIGER, S.; ROSMAN, P. C.; TUCCI, C. E.; CIRILLO, J. A. et al. **Métodos numéricos em recursos hídricos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH. Rio de Janeiro, 1989, 390 p.

ZHAO, D.H., SHEN, H.W., TABIOS, G.Q., Tan, W.Y. e Lai, J.S. **Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins**, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 120, n. 7, p. 863-833, 1994.