



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PATRÍCIA DA SILVA HOLANDA

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA E ESTUDO MORFOLÓGICO DO LAGO
ÁGUA PRETA: UM DOS MANANCIAIS DA GRANDE BELÉM**

BELÉM
2010

PATRÍCIA DA SILVA HOLANDA

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA E ESTUDO MORFOLÓGICO DO LAGO ÁGUA
PRETA: UM DOS MANANCIAS DA GRANDE BELÉM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará, para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração Térmicas e Fluidos. Orientador: Prof^o Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

BELÉM
2010

PATRÍCIA DA SILVA HOLANDA

MODELAGEM HIDRODINÂMICA E ESTUDO MORFOLÓGICO DO LAGO ÁGUA

PRETA: UM DOS MANANCIAIS DA GRANDE BELÉM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará, para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração Térmicas e Fluidos. Orientador: Prof^o Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Prof^o. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.
(UFPA - Orientador)

Prof^o. Dr. José Carlos César Amorim
(IME - Membro Externo)

Prof^o. Dr. Manoel José dos Santos Sena
(IESAM – Membro Externo)

Prof^o. Dr. Erb Ferreira Lins
(UFPA - Membro Interno)

BELÉM
2010

A meus pais (Zenira e Wellington),
Irmãos (Narjara, Bianca e Marcus
Vinícius).

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre me dar confiança e fé para acreditar que sou capaz.

Aos meus pais, que sempre valorizaram a busca pelo conhecimento, que me apoiaram ao longo desta jornada e que estão sempre ao meu lado.

Aos meus queridos irmãos Narjara, Bianca e Marcus Vinícius, pelo amor, carinho e dedicação.

Ao meu orientador Prof. Claudio José Cavalcante Blanco Ph.D, pela orientação e amizade durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Yves Secretan por disponibilizar o software *Modeleur/Hydrosim*, ferramenta no desenvolvimento do referido trabalho.

Ao Prof. Dr. João Nazareno e ao Prof^o Dr. Emanuel Negrão pela amizade e pelos ensinamentos.

A SEDECT – Secretaria de Estado de Desenvolvimento, Ciência e Tecnologia pelo financiamento do projeto “Estudo Hidrodinâmico e de Dispersão de Poluentes dos Mananciais da Grande Belém visando à gestão dos Recursos Hídricos”, o presente trabalho faz parte deste projeto.

Ao CNPQ pela concessão da bolsa de estudo, o qual permitiu a viabilização do referido trabalho.

A COSANPA- Companhia de Saneamento do Pará, que forneceu os dados do lago Água Preta do ano de 1975, necessários ao desenvolvimento do trabalho, em especial ao Biólogo Moacir Melo e ao Engenheiro Carlos Roberto Palmeira Greidinger.

A CPRM- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, que disponibilizou uma equipe técnica para a campanha de campo de coleta dos dados topobatimétricos do ano de 2009, a qual teve como líder o Engenheiro Sanitarista Davi Franco Lopes, além do técnico Roberval.

A SEMA- Secretaria de Meio Ambiente, na pessoa do gerente do Parque Ambiental Jorge Mauricio e ao técnico Claudio Melo, que concedeu a autorização para que fosse realizada a coleta de dados no lago Água Preta.

Aos Professores e Amigos do Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Amazônia-GRHAMA, à Prof^a. Ana Rosa Baganha Barp e ao Prof. Lindemberg Lima Fernandes, Mariane Furtado, Manoel Furtado, Naiana Lima, que colaboraram para a realização deste trabalho.

Ao PPGEM- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, em especial à coordenadora Prof^a. Danielle Guerra, aos secretários Juliana Ruffeil e Jonathan pelo pronto atendimento em todos os momentos necessários.

Aos meus amigos do PRODERNA- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Sil, Clauderino, Benedito e Rômulo.

Aos meus amigos Jacques Martins e Iara Ferreira, pela amizade, compreensão e companheirismo.

Aos meus amigos Michelly Moy, Roselene Garcia, Paulo Adão, Roseane Sousa, por sempre estarem ao meu lado, apoiando e incentivando a conquistar de meus objetivos.

“... a água é para o mundo, o mesmo que o sangue é para o nosso corpo e, sem dúvida, mais: ela circula segundo regras fixas, tanto no interior quanto no exterior da Terra, ela cai em chuva e neve, ela surge do solo, corre em rios, e depois retorna aos vastos reservatórios que são os oceanos e mares que nos cercam por todos os lados ...”

Leonardo Da Vinci

RESUMO

As condições naturais dos recursos hídricos podem ser modificadas com o uso insustentável dos mesmos. Por exemplo, em Belém, capital do Estado do Pará, o lago Água Preta, apresenta uma história de degradação que põe em risco o abastecimento de água potável em Belém. Nesse contexto, a principal contribuição do presente trabalho, é a realização de um estudo sobre a modelagem hidrodinâmica e a morfologia do lago Água Preta. Tal estudo foi efetuado a partir de duas fontes de dados. A primeira é um mapa topobatimétrico de 1975, que faz parte dos arquivos da COSANPA. A segunda foi uma batimetria realizada com um ADCP em 2009. A modelagem inicia-se com a elaboração dos modelos de elevação de terreno de 1975 e 2009, também utilizados para o estudo morfológico do lago. Para a utilização do modelo hidrodinâmico, são necessários os modelos de elevação de terreno supracitados; o modelo de rugosidade do relevo subaquático do lago, para o cálculo do coeficiente de Manning; e as condições de contorno. As simulações hidrodinâmicas de velocidade e profundidades foram realizadas utilizando o modelo de Saint-Venant do tipo águas rasas. No caso das profundidades, as mesmas foram comparadas com dados disponíveis na literatura, a fim de validá-las. Os resultados das simulações hidrodinâmicas, ou seja, profundidades e velocidades, associadas ao estudo morfológico, são peças chave na análise dos padrões de escoamento e de tendências de assoreamento do lago.

Palavras-Chave: Modelo de elevação do terreno; Estudo morfológico; Modelagem hidrodinâmica; Lago Água Preta.

ABSTRACT

The natural conditions of water resources can be modified with the unsustainable use of them. For example, in Belém, capital of Pará State, Água Preta Lake has a history of degradation jeopardize the drinking water supply in Belém. Thus, the main contribution of this work is to develop a study on modeling hydrodynamic and morphological study of Água Preta Lake. Such study is carried out through two data sources. The first is a bathymetric chart to date from 1975. This chart is available in the archives of COSANPA. The second was performed with an ADCP and the dates from 2009. The modeling began with the development of models of terrain elevation to date from 1975 and 2009, also used for the morphological study of the lake. To assemble the hydrodynamic model were needed bathymetrics data, substrates data for the friction model of the underwater relief of the lake to calculate the coefficient of Manning; and boundary conditions. The hydrodynamic simulations, depths and velocities, are performed using the model of Saint-Venant shallow water. The simulated depths were compared to data available in the literature. The simulated depths and velocities and the morphological study were used to analysis water flow pattern and sedimentation trends in the lake.

Keywords: Elevation model; Morphological study; Hydrodynamic modeling; Água Preta Lake.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Distribuição de água no planeta Terra.....	16
Figura 1.2 - Lagos Bolonha, Água Preta e região.....	18
Figura 2.1 - Área de Proteção Ambiental do Utinga (APAU) e Região Metropolitana de Belém. ...	21
Figura 2.2 – Principais mananciais de abastecimento da RMB.....	23
Figura 3.1 - Fluxograma representativo de um processo de modelagem computacional.....	26
Figura 3.2 - Sistema de coordenadas para as equações integrais na vertical.....	33
Figura 3.3 – Estrutura de uma partição utilizada pelo <i>Modeleur</i>	36
Figura 3.4 – Triangularização utilizada pelo <i>Modeleur</i>	37
Figura 3.5 – Calculadora do <i>Modeleur</i>	37
Figura 4.1 - Dados de topobatimetria de 1975.....	41
Figura 4.2 - Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP).....	42
Figura 4.3 - Margem do lago Água Preta coberta por macrófitas.....	43
Figura 4.4 - Dados batimétricos de 2009.....	43
Figura 4.5- MET do lago Água Preta 1975 sob a forma de curvas de nível.....	44
Figura 4.6 - MET do lago Água Preta 2009 sob a forma de curvas de nível.....	45
Figura 4.7 – Representações dos modelos de rugosidade do <i>Modeleur</i>	45
Figura 4.8 – Condições de contorno do lago Água Preta.....	47
Figura 4.9 - Malha hidrodinâmica de 1975.....	48
Figura 4.10 - Malha hidrodinâmica 2009.....	49
Figura 5.1 - MET interpolado de 1975.	50
Figura 5.2 –MET interpolado de 2009.....	51
Figura 5.3 – MET interpolado 1975 sob a forma de isosuperfícies de elevação.	51
Figura 5.4 – MET interpolado 2009 sob a forma de isosuperfícies de elevação.....	52
Figura 5.5 – Isosuperfícies de profundidade de 1975.....	53
Figura 5.6 - Isosuperfícies de profundidade para a batimetria de 2009.....	54
Figura 5.7 – Carta batimétrica do lago Água Preta.....	55
Figura 5.8 – Isosuperfícies de profundidade de 2009.....	56
Figura 5.9 – Padrão de escoamento do lago Água Preta.....	57
Figura 5.10 – Perfil de velocidade do lago Água Preta.....	57
Figura 5.11 – Vetores velocidade do escoamento do lago Água Preta.....	58
Figura 5.12- Isosuperfícies da diferença do relevo subaquático entre 2009 e 1975.....	59
Figura 5.13 – Isosuperfícies da diferença do relevo subaquático (zoom in).....	60

Figura 5.14 – Cálculo da integral da diferença do campo escalar de topografia entre 2009 e 1975 .	61
Figura 5.15 - Campo escalar unitário.....	61
Figura 5.16 - Calculo da área através da integral do campo escalar unitário.	62
Figura 5.17 - Cálculo do $\overline{\Delta h}$ utilizando a calculadora do <i>Modeleur</i>	62
Figura 5.18 - Calculo da taxa de deposição média.	63
Figura 5.19 – Cálculo da profundidade média de 2009.	64
Figura 5.20 - Volume calculado através da Calculadora <i>Modeleur</i>	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Amostra do arquivo de dados topográficos utilizados pelo <i>Modeleur</i>	41
Tabela 4.2 - Partículas, granulometria e porcentagem do substrato.	46

LISTA DE SIGLAS E SIGNIFICADOS

ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler

APAU: Área de Proteção Ambiental do Utinga

CODEM Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém

CPRM Companhia de Recursos Minerais –Serviço Geológico do Brasil

COSANPA: Companhia de Saneamento do Pará

DATUM: Superfície de referência posicionada usada para o cálculo de coordenadas de pontos na superfície da terra.

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ETA: Estação de Tratamento de Água

MEF: Método dos Elementos Finitos

MET: Modelo de Elevação do Terreno

PMB: Prefeitura Municipal de Belém

RMB: Região Metropolitana de Belém

SECTAM: Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia e Meio Ambiente

SEMA: Secretaria do Estado de Meio Ambiente

SIG: Sistema de Informações Georeferenciadas

TIN: Triangular Irregular Network

UFPA: Universidade Federal do Pará

UTM: Universal Transverse Mercator

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	16
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
1.2. JUSTIFICATIVA.....	17
1.3. OBJETIVOS	19
1.3.1. Objetivo Geral.....	19
1.3.2. Objetivos Específicos.....	19
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	20
CAPÍTULO 2 - ÁREA DE ESTUDO.....	21
2.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA	21
2.1.1. Lago Água Preta.....	22
2.2. HISTÓRICO DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM E DO SISTEMA HÍDRICO DO UTINGA.	22
CAPÍTULO 3 - MODELOS E MODELAGEM EM RECURSOS HÍDRICOS	25
3.1. A IMPORTÂNCIA DO USO DE MODELOS.....	25
3.2. MODELAGEM COMPUTACIONAL	25
3.3. MODELO DE ELEVAÇÃO DO TERRENO	29
3.4. APLICAÇÕES DE MODELAGEM HIDRODINÂMICA.....	30
3.5. MODELO HIDRODINÂMICO DE SUPERFÍCIE LIVRE.....	32
3.6. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.....	35
3.6.1. Descrição dos programas <i>Modeleur</i> e <i>Hydrosim</i>	35
3.6.2. Calculadora do <i>Modeleur</i>	37
3.6.3. Exemplos de utilização do <i>Modeleur/Hydrosim</i>	38
CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA	40
4.1. BATIMETRIA.....	40
4.1.1. Topobatimetria de 1975	40
4.1.2. Batimetria de 2009.....	42
4.2. MODELOS DE ELEVAÇÃO DE TERRENO DE 1975 E 2009.....	44
4.3. SUBSTRATO	45
4.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO	47
4.5. MALHA HIDRODINÂMICA.....	47
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1. MODELOS DE ELEVAÇÃO DE TERRENO SIMULADOS	50

5.2.	PROFUNDIDADES DO LAGO ÁGUA PRETA	52
5.2.1.	Validação da batimetria de 2009.....	53
5.2.2.	Profundidade de 2009	55
5.3.	PERFIL DE VELOCIDADE	56
5.4.	ESTUDO MORFOLÓGICO DO LAGO ÁGUA PRETA	58
CAPÍTULO 6 -	CONCLUSÕES E PESQUISAS FUTURAS	66
6.1.	CONCLUSÕES	66
6.2.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	67
REFERÊNCIAS	68
ANEXOS	73
Anexo 1 –	Mapa de curvas de níveis do ano de 1975 do lago Água Preta.....	74
Anexo 2 –	Artigo publicado no 20th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2009: Hydrodynamic Modeling of the Lake Água Preta: Water Source of The Belém Metropolitan Area	75

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A água é um dos insumos básicos vitais para a existência do homem. Ela também é essencial para garantia da vida nos ecossistemas, é um dos constituintes básicos do sistema que compõem o Planeta Terra, cobrindo 71% da superfície. A distribuição do volume de água no planeta está de acordo com a Figura 1.1.

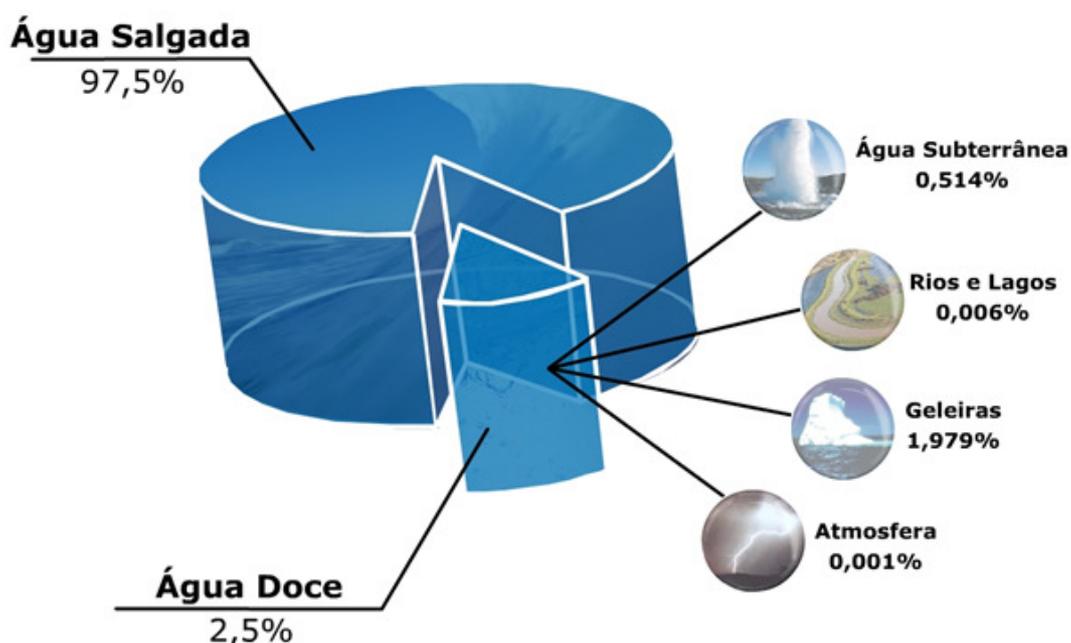


Figura 1.1 - Distribuição de água no planeta Terra.

Fonte: Águas de Nova Friburgo (2009).

No Brasil, os recursos naturais têm importância decisiva no plano econômico. O país é dotado de uma vasta e densa rede hidrográfica. A situação da poluição hídrica tem-se agravado devido ao aumento de cargas poluidoras urbanas e industriais, uso inadequado do solo e de insumos agrícolas, erosão, desmatamento e mineração. Esses fatores levam a danos dos recursos hídricos, dentre os quais se destacam o aumento do transporte de sedimentos e a contaminação orgânica e química das águas. Essa situação crítica faz com que cuidados adicionais sejam tomados na implantação de novas indústrias, especialmente quando for necessário o descarte de seus efluentes em rios ou lagos (MACHADO et al., 2008).

Uma das principais causas da poluição das águas é a matéria orgânica presente no esgoto. A solução imediata adotada pelos órgãos responsáveis pelo saneamento básico é o lançamento nos corpos d'água, na maioria das vezes sem nenhum tratamento prévio, comprometendo a qualidade da

água não apenas no local onde o esgoto é despejado, mas em toda a sua bacia hidrográfica. Uma tendência atual para se analisar a poluição em corpos d'água, começa pela modelagem hidrodinâmica. Assim, inúmeros estudos foram realizados no que diz respeito à modelagem hidrodinâmica em lagos, lagoas, estuários e rios, entre os quais são citados os seguintes: Lima et al. (2009) modelaram e analisaram a hidrodinâmica e a morfologia do lago Bolonha, um dos mananciais da grande Belém. Rosman et al. (2009) desenvolveram estudos de hidrodinâmica ambiental para suporte e planejamento da ligação da lagoa Rodrigo de Freitas ao mar via dutos afogados no Rio de Janeiro. Ferrarin et al. (2008) modelaram a hidrodinâmica e a morfologia da lagoa Venice na Itália. Ji et al. (2007) analisaram a qualidade da água do lago Xuanwu, China. Rocha (2007) utilizou o modelo Mike 21 na análise de cenários hidrodinâmicos na lagoa da Conceição em Santa Catarina. Barros et al. (2005) construíram um modelo hidrodinâmico da Baía do Guajará em Belém, usando Sistema de Informação Geográfica e o Método de Elementos Finitos. Rigo (2004), estudou o escoamento provocado pela maré em estuários com manguezais, na região da Baía de Vitória localizada no Espírito Santo. Gobbi et al. (2003) implementaram um modelo hidrodinâmico e de qualidade da água do lago Irai na Região Metropolitana de Curitiba o qual, como o lago Água Preta, é utilizado para o abastecimento de água. Paz (2003), utilizou um modelo hidrodinâmico bidimensional horizontal (modelo IPH-A), no sistema formado pela lagoa Mangueira e pelo banhado Taim localizado no Rio Grande do Sul. Rosman (2001), estudou a caracterização hidrodinâmica da Baía de Sepetiba, a qual está localizada no estado Rio de Janeiro. Vargas et al. (2001) estudaram a circulação d'água e de dispersão de poluentes no complexo lagunar sul de Santa Catarina, Brasil. Rajar et al. (1997) modelaram a qualidade da água do lago Bohinj na Eslovênia.

1.2. JUSTIFICATIVA

Em Belém, dois lagos são utilizados no abastecimento de água da Região Metropolitana, os lagos Bolonha e Água Preta, localizados no Parque Ambiental de Belém. O maior deles é o lago Água Preta, com dez bilhões de litros d'água, possuindo uma área de 3.116.860 m² (Dias et al., 1991) e um volume de 9.905.000 m³ (Sodré, 2007). Estes reservatórios estão interligados entre si e formam o manancial do Utinga, como mostra a Figura 1.2.



Figura 1.2 - Lagos Bolonha, Água Preta e região.

Fonte: Adaptado de Google Earth, 2009.

O sistema hídrico dos lagos Bolonha e Água Preta vem sofrendo diversas pressões, seja pelas constantes invasões de suas cabeceiras, por moradias sem esgotamento sanitário, como por conjuntos habitacionais construídos na região. Segundo SECTAM (1992), os lagos vêm servindo também como receptores finais de esgotos domésticos e industriais e das águas lançadas em suas bacias. No mais, as águas do rio Guamá, nas marés enchentes, carregam as águas da Baía do Guajará, receptora dos esgotos e águas pluviais da cidade de Belém, potencializando seu papel como agente poluidor dos reservatórios. A água que compõem o lago é bombeada do rio Guamá para o lago Água Preta. A Figura 1.2 mostra a adução do rio Guamá.

Vários estudos têm sido realizados e aprimorados nos últimos anos para identificar e solucionar os problemas que ocorrem nos lagos Bolonha e Água Preta.

Dias et al. (1991) estabeleceram um estudo ambiental do Utinga, visando à análise da vida útil do sistema de abastecimento de Belém. Neste caso, a amostragem dos sedimentos carreados ao lago Água Preta é utilizada para a determinação do coeficiente de Manning do modelo hidrodinâmico proposto.

Um estudo de avaliação da qualidade das águas dos lagos Água Preta e Bolonha realizado por Ribeiro (1992). Nesse caso, foi verificada a existência de concentrações de metais pesados nos sedimentos dos lagos.

Uma análise biológica do Aguapé (*Eichhornia crassipes* Mart.), que é uma espécie bioindicadora de poluição presente nos lagos Bolonha e Água Preta, foi realizada por Matni (2003).

Sodré (2007) realizou um estudo sobre a hidroquímica dos lagos Bolonha e Água Preta, que envolve a distribuição de parâmetros abióticos, tais como: transparência, cor aparente, turbidez, oxigênio dissolvido, temperatura, pH, sólidos suspensos, nitrato, N-amoniacal e fosfato.

Recentemente, Lima et al. (2009) estudaram a modelagem hidrodinâmica e a análise morfológica do lago Bolonha.

Baseado nestas informações, a motivação inicial para a elaboração do presente trabalho é fundamentada nas agressões citadas anteriormente que o lago Água Preta vem sofrendo e também pela constatação da carência de informações sobre estudos morfológicos e de modelagem hidrodinâmica do reservatório, e principalmente procurando obter parâmetros, que possam subsidiar uma melhor gestão dos recursos hídricos que abastecem Belém de água potável.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é a modelagem hidrodinâmica e um estudo morfológico do lago Água Preta, o qual é detalhado em quatro objetivos específicos apresentados a seguir.

1.3.2. Objetivos Específicos

- ❖ Levantar e analisar os dados topobatimétricos: este objetivo é de fundamental importância na concepção do estudo morfológico, pois permite descrever de forma sucinta a topografia do corpo d'água. Esta descrição é estabelecida em um certo momento do tempo para posteriormente ser comparada. A partir do resultado destas comparações, pode-se realizar a análise da evolução morfológica do corpo hídrico. No caso do lago Água Preta, foi possível descrever dois conjuntos de dados topobatimétricos. O primeiro foi do ano de 1975 (Anexo 1) quando não existia o canal de interligação entre os lagos Água Preta e Bolonha, e o segundo, mais atual, foi realizado no ano de 2009, já com os lagos interligados.
- ❖ Obter os modelos de elevação de terreno (MET): os dois conjuntos de dados topobatimétricos (1975 e 2009), originaram dois modelos de elevação do terreno. Estes modelos auxiliaram tanto no estudo morfológico do lago como também na simulação do escoamento das águas que são bombeadas do rio Guamá e saem pela ação da gravidade pelo canal de interligação para o lago Bolonha. Os METs alimentam o modelo hidrodinâmico com as variáveis topográficas (cotas e posições x,y georeferenciadas), as quais são utilizadas nas simulações hidrodinâmicas.
- ❖ Verificar o modelo hidrodinâmico: o modelo hidrodinâmico utilizado para modelar o escoamento do lago Água Preta é o modelo de águas rasas de Saint-Venant. A verificação do modelo é efetuada via comparação entre velocidades simuladas e aquelas medidas pelo

ADCP. Uma boa concordância entre as velocidades medidas e as simuladas pode demonstrar que o modelo representa bem o escoamento estabelecido no lago, além de comprovar que os METs e o modelo de substrato retratam bem a morfologia da área de estudo.

- ❖ Obter um modelo de substrato: outro fator de fundamental importância para a modelagem hidrodinâmica é o conhecimento da composição do substrato do corpo hídrico, pois sua composição define o coeficiente de Manning, que demonstra se há maior ou menor dissipação de energia pelo atrito do escoamento com o fundo do lago. Assim, foi elaborado um modelo de substrato para o lago Água Preta, baseado em dados secundários disponíveis na literatura, mais precisamente através dos trabalhos de Dias et al. (1991) e Lima et al. (2009).

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 1, buscou-se enfatizar as motivações e os objetivos do trabalho.

O capítulo 2 apresenta a caracterização da área de estudo, descrevendo a sua localização geográfica, o histórico do abastecimento de água da RMB (Região Metropolitana de Belém) e do Sistema Utinga.

O capítulo 3 descreve a revisão da literatura, a importância e aplicação de modelos numéricos para o estudo da modelagem hidrodinâmica.

O capítulo 4 descreve a metodologia para o desenvolvimento do referido estudo.

No capítulo 5, são apresentados os resultados e discussões referentes às simulações hidrodinâmicas e ao estudo morfológico.

O capítulo 6 apresenta as principais conclusões do trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

No anexo 1, é apresentado o mapa de curvas de níveis do ano de 1975 do lago Água Preta.

No anexo 2, é apresentado sob forma de artigo, um estudo sobre a **Modelagem Hidrodinâmica do lago Água Preta**, utilizando os dados de topobatimetria de 1975 visando “treinar” o Modelo Hidrodinâmico a ser utilizado no presente estudo, o mesmo foi publicado no XX Congresso de Engenharia Mecânica – COBEM (2009).

CAPÍTULO 2 - ÁREA DE ESTUDO

2.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

O lago Água Preta localiza-se na Área de Proteção Ambiental do Utinga (APAU), onde também está inserido o lago Bolonha. A área fisiográfica do Parque do Utinga compreende os lagos Bolonha e Água Preta, na Região Metropolitana de Belém, como mostra a Figura 2.1.

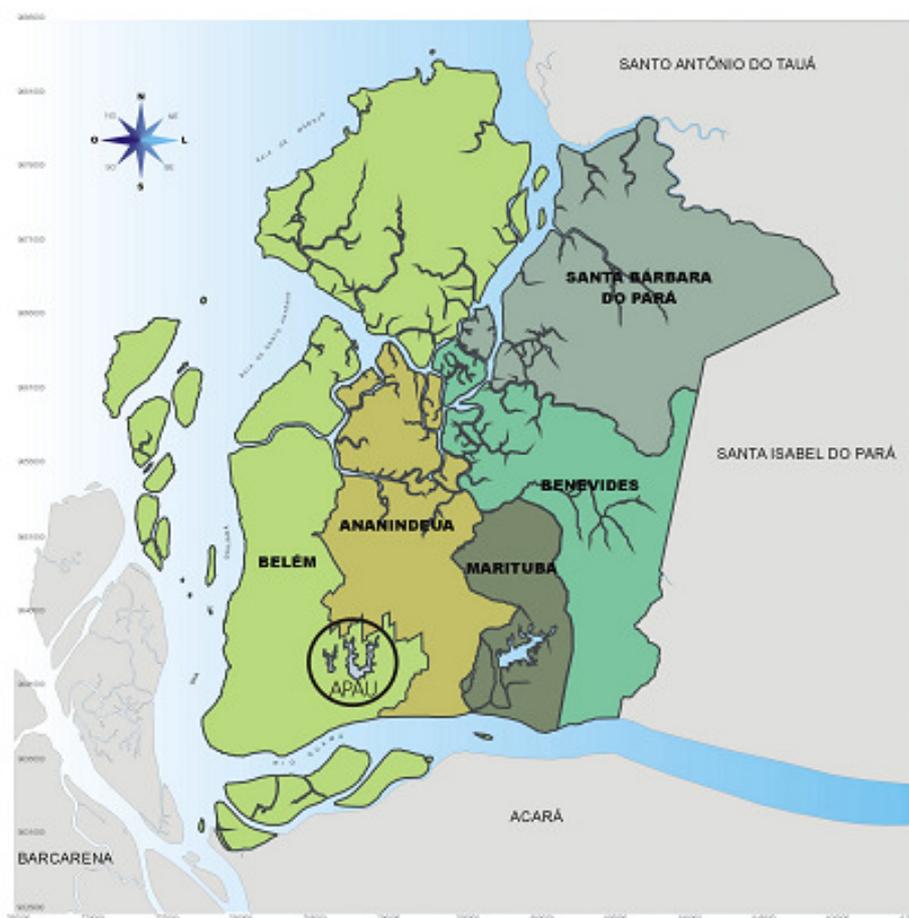


Figura 2.1 - Área de Proteção Ambiental do Utinga (APAU) e Região Metropolitana de Belém.

Fonte: Prefeitura Municipal de Belém 2001.

A Região Metropolitana de Belém (RMB) possui uma área igual a 1.827,7 km². Ela é formada pelos municípios de Belém, Ananindeua, Marituba, Santa Bárbara e Benevides (IBGE, 2000, apud FERNANDES, 2005, p. 138).

Segundo Mercês, 1997 (apud FERNANDES, 2005, p. 139) a RMB apresenta uma fisiografia diferenciada envolvendo superfícies continentais, estuarinas, insulares e aquáticas, situada entre as coordenadas geográficas e os limites abaixo discriminados.

- ❖ ao Norte: coordenadas 00°58'00" de latitude Sul e 48°24'00" de longitude WGr, localizado na Baía de Marajó definindo o limite da RMB com o município de Colares;
- ❖ ao Sul: coordenadas 01°31'34" de latitude Sul e 48°30'27" de longitude WGr, localizado na foz do Rio Moju, definindo o limite da RMB com o município de Acará;
- ❖ a Leste: coordenadas 01°11'59" de latitude e 48°07'55" de longitude WGr, localizado na confluência do Rio Tauá com o Igarapé São Francisco definindo o limite da RMB com os municípios de Santa Isabel do Pará e Santo Antônio do Tauá;
- ❖ a Oeste: coordenadas 01°11'59" de latitude Sul e 48°07'55" de longitude WGR, localizado na Baía de Marajó, definindo o limite da RMB com o município de Ponta de Pedras.

2.1.1. Lago Água Preta

A bacia hidrográfica do lago Água Preta localiza-se na Região Metropolitana de Belém (RMB) entre a bacia do lago Bolonha, BR 316, Águas Lindas e EMBRAPA (Figura 1.2). É formado pelas bacias hidrológicas dos Igarapés Catu e Água Preta. É um dos principais lagos que abastecem a RMB, sendo margeado por uma vegetação densa característica da região, contribuindo assim, para sua preservação natural.

2.2. HISTÓRICO DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM E DO SISTEMA HÍDRICO DO UTINGA.

O abastecimento de água potável em Belém ocorre desde o início da colonização, por meio de poços e bicas, públicos ou privados, acessíveis em ambos os casos à população (DIAS et al., 1991).

A partir do século XIX, uma rua alagadiça denominada de rua do Pau d'água (atual rua Governador José Malcher, próximo à praça da República) foi transformada em manancial (local onde se tirava água para o abastecimento da cidade) explorado por particulares que vendiam água potável à população, chamados de aguadeiros (pessoas que se dedicavam ao comércio da água, que eram em sua maioria portugueses) (FERNANDES, 2005).

Após diversas tentativas realizadas pelo poder público no sentido de dotar Belém de serviços de abastecimento de água, foi criada no ano de 1881 a Companhia das águas do Grão-Pará. A partir daquele ano, foram demarcados os terrenos a serem desapropriados na área do Utinga, sendo

proposto o represamento dos igarapés Murucutu e Água Preta, que formam atualmente os lagos Bolonha e Água Preta.

Em abril de 1885, foi inaugurada no largo de São Braz, a principal obra da companhia de abastecimento, um reservatório com capacidade para 1.570.000 litros, que recebia água bombeada dos mananciais do Utinga, através de uma adutora e as canalizações das redes eram todas de ferro fundido (SECTAM, 1992).

No governo de Augusto Montenegro em 1903, o Utinga já se mostrava insuficiente para atender à demanda de água em Belém, então o governo mandou construir uma represa na bacia do Utinga e muros ao longo da vala que conduzia as águas das três nascentes (Utinga, Baiussuquara e Catu) evitando assim o contato com as águas do igapó, aumentando o volume de água represado (DIAS et al., 1991).

No ano de 1930, o sistema dos lagos do Utinga já não supria à demanda de água em Belém, com isso foram realizados estudos topográficos e geológicos da bacia do Utinga, para então aproveitar melhor as águas vindas dos mananciais.

Em 1951, com o aumento populacional da cidade de Belém, foi realizada a instalação de uma bomba de recalque para captar água do rio Guamá, para abastecer o lago Água Preta, completando assim o abastecimento do sistema Utinga, que já apresentava déficits nos períodos de estiagem (SECTAM, 1992).

No ano de 1968, ocorreu a ampliação da capacidade de bombeamento, por meio do aumento do diâmetro da adutora entre o rio Guamá e o lago Água Preta.

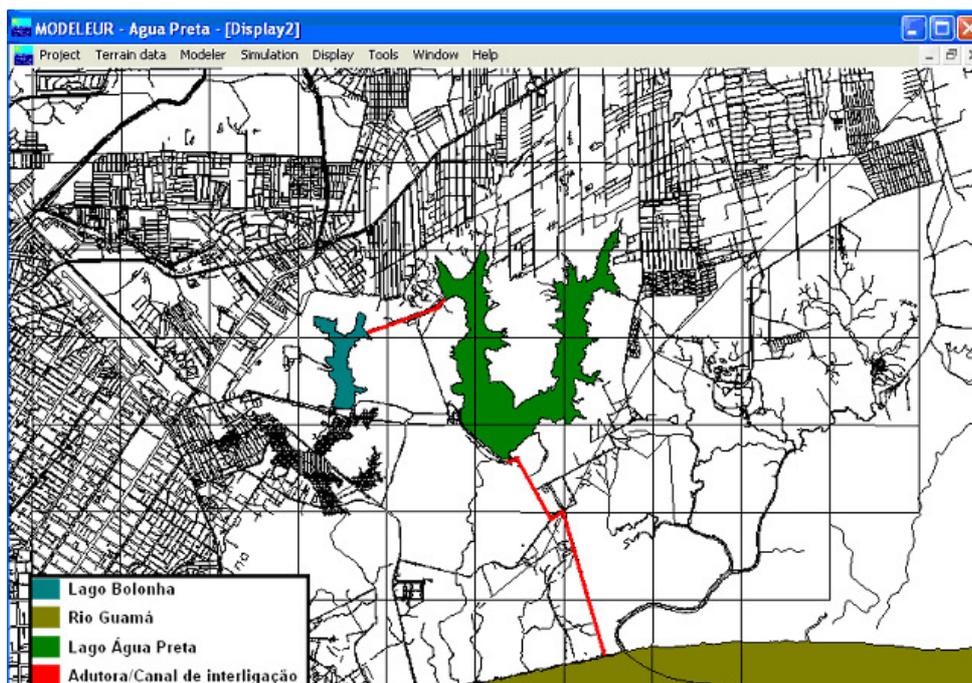


Figura 2.2 – Principais mananciais de abastecimento da RMB.

Na década de 80, foi construído um canal artificial que interliga os lagos Água Preta e Bolonha, chamado YUNA (do Tupi Y=água, UNA= preta), com isso as águas do lago Água Preta passaram a convergir para o lago Bolonha e a partir daí foram captadas pelas bombas das ETAs Bolonha e São Brás. Os principais mananciais superficiais que abastecem hoje a RMB são: o rio Guamá e os lagos Bolonha e Água Preta (Figura 2.2).

CAPÍTULO 3 - MODELOS E MODELAGEM EM RECURSOS HÍDRICOS

3.1. A IMPORTÂNCIA DO USO DE MODELOS

A necessidade da aplicação de modelos para estudo, projetos e auxílios à gestão de recursos hídricos é inquestionável, face à complexidade do ambiente em corpos d'água, especialmente em lagos, reservatórios, estuários e zonas costeiras adjacentes. Modelos são ferramentas integradoras, sem as quais dificilmente se consegue uma visão dinâmica dos fenômenos inerentes aos sistemas hídricos.

Eles também permitem integrar informações espacialmente dispersas interpolar informações para regiões nas quais não há medições, ajudando a interpretar medidas pontuais, propiciando o entendimento da dinâmica de processos e a prever situações simulando cenários futuros.

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que a envolvem. Os modelos estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a entender o impacto das ações antrópicas e a prever alterações futuras nas bacias hidrográficas.

3.2. MODELAGEM COMPUTACIONAL

Outra definição importante é a de modelagem, que pode ser uma construção teórica, que procura descrever e explicar o funcionamento de um determinado sistema através da representação de um fenômeno ou conjunto de fenômenos do mundo real e eventualmente fazer a previsão de novos fenômenos ou propriedades, tomando como base certas hipóteses. O principal produto da modelagem é o modelo.

Em virtude da grande versatilidade e aplicabilidade, os modelos computacionais são comuns nas mais diversas áreas. Eles fornecem previsões, a partir de um conjunto de informações de entrada, que permitem examinar as conseqüências de diversos cenários de um sistema existente ou de um sistema em projeto.

A modelagem dos sistemas hídricos pode ser empregada no intuito de fornecer um importante subsídio técnico aos processos de tomadas de decisão referentes ao planejamento e à operação dos mesmos, além de proporcionar condições para elaboração de vários estudos sobre os processos naturais e antrópicos de uma região (MAGALHÃES, 2005). No caso do presente trabalho, destacam-se as modelagens hidrodinâmica e de Elevação do Terreno, as quais estão inseridas na modelagem de sistemas hídricos. A Figura 3.1 pode ser aplicada às modelagens supracitadas.

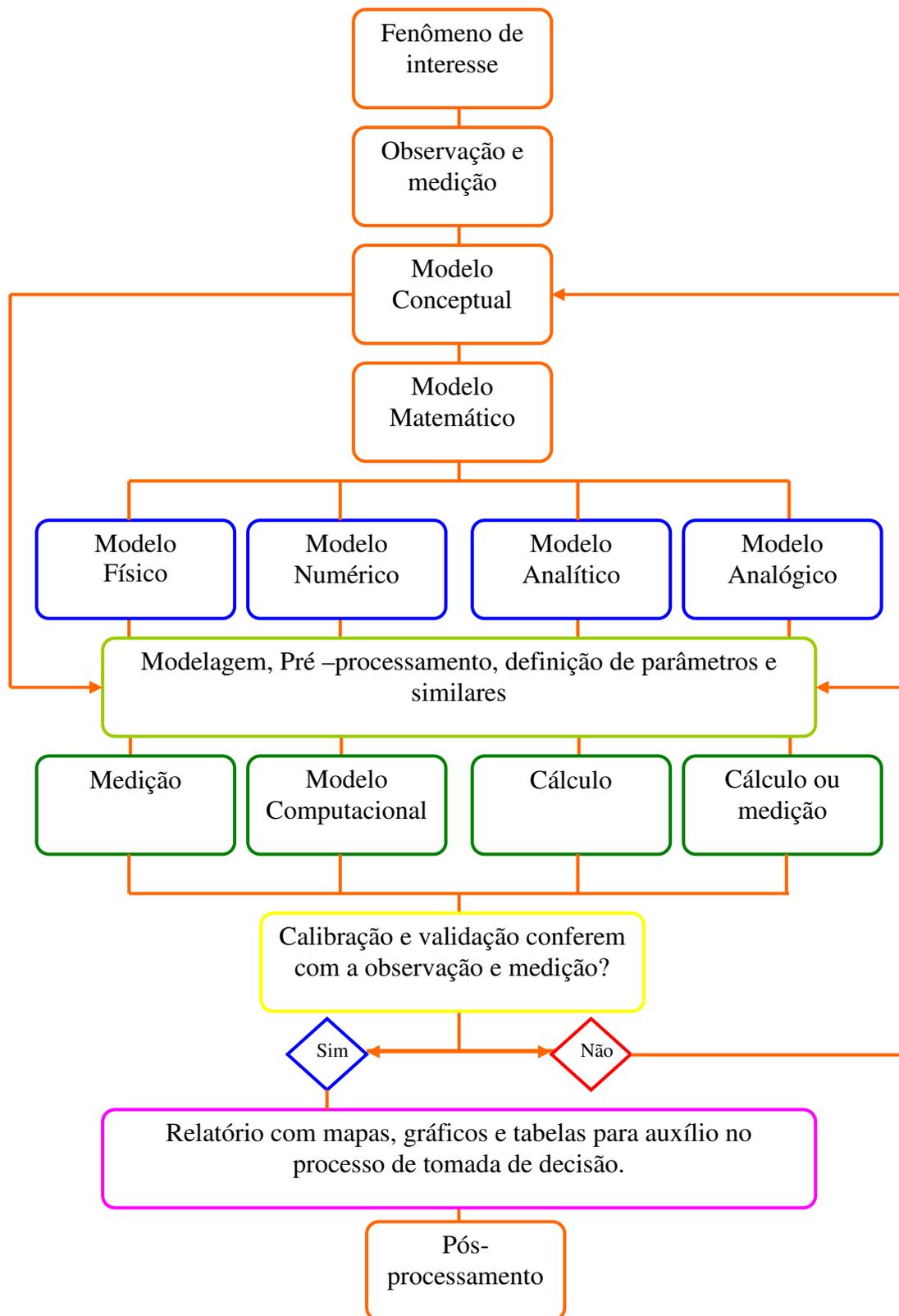


Figura 3.1 - Fluxograma representativo de um processo de modelagem computacional.

Fonte: Adaptado de Rosman et al., 2001

Rosman et al. (2001), descrevem os diversos quadros e rotas do fluxograma do processo de modelagem presente na Figura 3.1:

- ❖ Fenômeno de Interesse: No caso de corpos d'água, em geral, os fenômenos de interesse estão relacionados aos movimentos ou transportes de substâncias e propriedades que se quer estudar.
- ❖ Observação e medição: Em geral, as observações iniciais de um dado fenômeno são qualitativas, tendo por intuito propiciar um entendimento das causas, efeitos e agentes intervenientes. Em uma segunda etapa, parte-se para observações quantitativas, fazendo-se medições de grandezas das causas e efeitos e agentes intervenientes inferidos na etapa de observação qualitativa. Através das observações e medições desenvolvem-se modelos conceptuais dos fenômenos de interesse.
- ❖ Modelo conceptual: é de fundamental importância, pois a modelagem conceptual corresponde a formar a concepção do fenômeno observado, conhecer suas causas e efeitos, compreender as interações e relevância dos agentes intervenientes na sua ocorrência. Neste caso, é comum os modelos conceptuais serem chamados de “Leis” ou “Princípios”.
- ❖ Modelo matemático: A modelagem matemática consiste na tradução para a linguagem matemática do modelo conceptual do fenômeno de interesse. Os diferentes modelos matemáticos são diferentes arranjos, incluindo um número maior ou menor de causas e efeitos, e de agentes intervenientes em diferentes formas. O modelo matemático é a grande encruzilhada do processo de modelagem, pois dependendo da possibilidade de resolvê-lo, quatro rotas são possíveis, levando respectivamente aos modelos físico, numérico, analítico e analógico.
- ❖ Modelo analítico: As equações diferenciais que regem o escoamento e o transporte de escalares em corpos d'água só propiciam soluções gerais para situações bastante simplificadas e idealizadas. Nas situações que compreendem a grande maioria das de interesse prático, não há solução geral conhecida. Neste caso recorre-se aos modelos físicos e aos modelos numéricos.
- ❖ Modelo analógico: Este modelo só é utilizado em situações muito peculiares e em geral de cunho mais acadêmico do que prático. Por exemplo, fazendo-se analogia entre o fluxo das correntes elétricas e o fluxo das correntes hidráulicas pode-se desenvolver alguns modelos de circuito hidráulico em analogia a modelos de circuitos elétricos.
- ❖ Modelo físico: em geral são modelos que reproduzem em escala reduzida, modelos conceptuais de fenômenos de interesse, chamados de protótipos. Uma etapa de modelagem matemática prévia é necessária, já que a modelagem conceptual por trás do modelo físico reduzido, é a hipótese de semelhança entre os fenômenos em diferentes escalas. Assim, através de um modelo matemático de semelhança, define-se a escala de semelhança entre o

protótipo e o modelo físico reduzido. Tal necessidade está no fluxograma pela rota ligando o modelo matemático ao modelo físico.

- ❖ Modelo numérico: os modelos numéricos são traduções dos modelos matemáticos adaptados para diferentes métodos de cálculo, como, por exemplo, diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos. Com a viabilização de se fazer um grande número de cálculos rapidamente através dos computadores, esta se tornou a rota mais comum para aproximar os modelos matemáticos. Praticamente qualquer modelo matemático pode ser através de um modelo numérico e, em geral, há relativamente pouca perda de informação de um para outro.
- ❖ Montagem, pré-processamento, definição de parâmetros e similares: é uma etapa comum a qualquer tipo de modelo usado para obter informações quantitativas do modelo conceptual e do modelo matemático. De fato, qualquer que seja o modelo usado para se obter informações quantitativas, antes de obtê-las, será necessário preparar o modelo e organizar os dados de entrada. O tipo de pré-processamento a ser feito depende do modelo adotado.
- ❖ Rotas para obtenção de informações quantitativas: após a etapa de pré-processamento, para cada tipo de modelo haverá uma rota de modelo para se obter os resultados quantitativos desejados. Para os modelos físicos, as informações quantitativas são obtidas através de medição direta, através de diversos equipamentos específicos. Para os modelos numéricos, os resultados quantitativos desejados serão obtidos via um modelo computacional, que é a tradução de um modelo numérico para a linguagem computacional que possa ser compilada e executada em um computador por um operador.
- ❖ Calibração e Validação: é nesta imprescindível etapa do processo de modelagem que está a “hora da verdade” para qualquer modelo. É nesta etapa que se pode de fato verificar e validar um dado modelo através de uma pergunta: os resultados obtidos conferem com o que se observa e se mede a respeito do fenômeno de interesse?

Não: neste caso o modelo não está validado e entra-se no processo de calibração efetivamente, com duas rotas possíveis. A mais comum é a rota circular curta que leva à caixa do pré-processamento, o que corresponde ao usual procedimento de calibração, via ajuste de montagem e parâmetros, acertos de dados de entrada a qualquer tipo de modelo. A outra rota é a circular longa, que leva novamente para o modelo conceptual. A rota longa é seguida apenas no caso de repetidos insucessos de validação do modelo com a rota curta. Neste caso, questiona-se mais fundamentalmente a modelagem e verifica-se se não existem erros de concepção.
- ❖ Mapas, gráficos e tabelas: tradicionalmente na etapa de pós-processamento os resultados quantitativos dos modelos são transformados em mapas, gráficos e tabelas. Mais

recentemente, resultados de modelos computacionais têm sido apresentados através de animações. Dependendo do fenômeno sendo modelado, uma animação ajuda na compreensão da dinâmica do fenômeno.

Sim: neste caso o modelo está validado é o processo de modelagem termina na efetiva incorporação dos resultados do modelo ao acervo de informações a serem consideradas no processo de tomada de decisão.

- ❖ Pós-processamento: esta etapa do processo de modelagem é também comum a todos os modelos. O fato é que o cérebro humano é incapaz de assimilar um grande número de informações quantitativas, se esta não for organizada ou “modelada” de maneira adequada. Por isso, a etapa de pós-processamento é uma importantíssima etapa de modelagem na qual faz-se a tradução da massa de informações quantitativas saídas dos modelos em formas que possam mais facilmente ser assimiladas.
- ❖ Relatório para o auxílio no processo de decisão: é objetivo final do processo de modelagem, ou seja, produzir informações organizadas para auxiliar um processo de tomada de decisões.

3.3. MODELO DE ELEVAÇÃO DO TERRENO

O modelo de elevação do terreno é uma representação matemática da variação da topografia que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre, onde se conhece um conjunto finito de pontos com coordenadas $(x, y$ e $z)$, sendo que a partir destes se interpolam todas as informações relativas à superfície das quais tais pontos fazem parte, buscando-se na maioria dos casos a modelagem da altimetria da área de estudo.

Os pontos amostrais fornecidos ao modelador são valores coletados a partir de uma superfície real ou de outras fontes, constituídos por triplas formadas por um par de coordenadas (x, y) (representativo da posição da amostragem na superfície), associada a uma variável z (cota do terreno), ou seja, variável que se quer modelar. Os pontos amostrais estão todos referenciados a um sistema de eixos cartesianos triortogonais que apresenta dependência funcional em relação às coordenadas (x,y) (SIMÕES, 1993, apud LIMA, 2008, p.29).

Para a representação de uma superfície real no computador, é indispensável à criação de um modelo de elevação do terreno. Este pode ser representado por equações analíticas ou uma rede de pontos, de modo a transmitir características espaciais do terreno. Assim, a topografia de uma área pode ser representada pelo modelo de elevação do terreno. Portanto, o modelo de elevação do terreno é uma ferramenta computacional destinada a gerar uma superfície representativa da distribuição espacial de uma determinada característica, possibilitando sua análise, manipulação e avaliação espacial contínua.

Os modelos de elevação do terreno são capazes de representar um conjunto de dados, gerando informações adicionais, seja por meio de consultas diretas ou através de análises ou manipulações. Com isso, o modelo de elevação é utilizado para obter informações da superfície em estudo sem se trabalhar diretamente com a superfície real. A criação de um modelo de elevação do terreno corresponde a uma nova maneira de focar o problema de elaboração e implantação de projetos. A partir do modelo de elevação de terreno podem-se calcular volumes, áreas, desenhar perfis e seções transversais.

3.4. APLICAÇÕES DE MODELAGEM HIDRODINÂMICA.

Nesta seção são apresentados alguns trabalhos encontrados na literatura que englobam a modelagem hidrodinâmica.

Rajar et al. (1997), modelaram a qualidade da água do lago Bohinj na Eslovênia, utilizando um modelo hidrodinâmico 3DH.

Araújo e Melo (1999), utilizaram um sistema de simulação 2DH, baseado nas equações de águas rasas, usando elementos finitos na discretização espacial e diferenças finitas na evolução temporal, desenvolvido pelo grupo de Mecânica dos Fluidos Ambiental da UFPE.

Heniche et.al. (2000), utilizaram uma técnica baseada em Elementos Finitos, para simulação de escoamento de vazões bidimensionais em superfícies livres de rios e estuários, sendo que as variáveis do modelo são vazões e níveis d'água.

Rosman (2001), estudou a caracterização hidrodinâmica da Baía de Sepetiba, a qual está localizada no estado Rio de Janeiro. O modelo adotado no referido estudo foi bidimensional, este usa elementos finitos. Os resultados demonstram que as velocidades das correntes na baía não ultrapassam 1,0 m/s em situação de maré de sizígia e 0,3 m/s em situação de maré de quadratura. As velocidades residuais são extremamente fracas exceto nas embocaduras de alguns estuários.

Vargas et al. (2001), realizaram estudos sobre a modelagem matemática para avaliar a penetração das águas do rio Tubarão na lagoa do Imauri, em Santa Catarina e a influência do aterro do canal de Laranjeiras sobre a circulação d'água nessa lagoa. Na modelagem matemática foi utilizado o software MIKE 21, com os seus módulos HD (hidrodinâmico) e AD (advecção-dispersão), desenvolvido pelo DHI (Danish Hydraulic Institute) da Dinamarca.

MARTINS et al. (2002), utilizaram um modelo numérico hidrodinâmico tridimensional na Baía de Guanabara no Estado Rio de Janeiro e realizaram uma calibração preliminar através de dados de maré e séries temporais das correntes. O programa utilizado foi o SisBAHIA.

Gobbi et al. (2003) implementaram um modelo hidrodinâmico e de qualidade da água do lago Irai na Região Metropolitana de Curitiba, utilizando um modelo hidrodinâmico bidimensional - 2DH.

Paz (2003), utilizou um modelo hidrodinâmico bidimensional horizontal (modelo IPH-A), associado a um algoritmo de área seca/área molhada, no sistema formado pela lagoa Mangueira e pelo banhado Taim localizado no Rio Grande do Sul, procurando analisar os principais fatores intervenientes no comportamento hidrodinâmico do banhado.

Rigo (2004), estudou o escoamento provocado pela maré em estuários com manguezais, na região da Baía de Vitória localizada no Espírito Santo. O escoamento nesta região foi modelado a partir de um modelo 2DH. O estudo foi realizado a partir de levantamento batimétricos e altimétricos no manguezal, além de medições de nível d'água e correntes.

Barros et al. (2005), estudaram a modelagem hidrodinâmica do sistema estuarino da Baía do Guajará, através de modelagem computacional. Os programas utilizados na modelagem foram *Modeleur/Hydrosim*, os quais, utilizam o modelo de elementos finitos que discretiza a Equação de Saint-Venant. O modelo adotado no referido estudo é bidimensional longitudinal-transversal. O modelo hidrodinâmico foi calibrado utilizando alturas de maré. Os resultados mostraram que a metodologia adotada contribuiu para um melhor entendimento do sistema, sendo obtida uma boa representação dos padrões de escoamento da Baía do Guajará, com resultados de níveis d'água de maneira geral satisfatória.

Saldanha (2007), utilizou o software SisBahia, na região que compreende o trecho final do rio Santa Maria da Vitória e a Baía de Vitória no Espírito Santo. Após a calibração e validação do modelo, associaram-se às características hidrodinâmicas da região a aspectos ligados à qualidade de suas águas, realizando-se simulações de transporte de constituinte.

Machado et al. (2008), descreveram um modelo Fluidodinâmico Computacional Tridimensional para simular a dispersão de substâncias solúveis em rios. Os resultados mostraram que a metodologia proposta é uma boa ferramenta para a avaliação do impacto ambiental causado pela emissão de efluentes em rios.

Lima et al. (2009), realizaram um estudo sobre a modelagem hidrodinâmica e o estudo morfológico do lago Bolonha. O estudo compreendeu dois conjuntos de dados de batimetria, referentes aos anos de 1983 e 2007 apresentando uma boa representação do modelo de elevação do terreno. A partir do MET, do modelo de rugosidade, das condições de contorno definidas parte se para a simulação do escoamento do lago Bolonha, o qual, revela uma sutil correnteza entre a saída do canal de interligação entre os lagos Bolonha e Água Preta, e as entradas da ETA Bolonha e da ETA São Brás. Quanto à análise morfológica, o trabalho verificou que entre 1983 e 2007, ocorreram poucas mudanças no relevo de fundo do lago Bolonha, a principal foi o canal formado pelo escoamento que não existia antes de 1983.

Rosman et al. (2009), estudaram a hidrodinâmica ambiental para suporte e planejamento da ligação da lagoa Rodrigo de Freitas ao mar via dutos afogados no Rio de Janeiro. Os objetivos de

tal ligação eram sanar os seguintes problemas na lagoa: má qualidade de água em função do excessivo estoque de nutrientes que se acumula em função da incapacidade do sistema atual de exportar os nutrientes que recebe; alagamentos marginais decorrentes de obstruções do canal do Jardim de Alah em épocas de fortes chuvas; assoreamento do Canal do Jardim de Alah e perda das características estuarinas em função da estagnação e uniformização de suas águas.

Usualmente, na modelagem hidrodinâmica de lagos, utiliza-se o modelo bidimensional, através da redução do modelo tridimensional integrando as equações na profundidade. Esse modelo bidimensional simplificado tem seu emprego aceitável quando os fluxos são predominantemente horizontais e existe pouca ou nenhuma estratificação no corpo d'água a ser estudado. Este tipo de modelo é conhecido como de Saint-Venant ou de águas rasas.

3.5. MODELO HIDRODINÂMICO DE SUPERFÍCIE LIVRE

Os modelos hidrodinâmicos servem para determinar o padrão de correntes em corpos de água em superfície livre, como águas costeiras, baías, sistemas estuarinos, rios, lagoas, lago tipo reservatório, entre outros. Esses modelos variam muito em complexidade, desde unidimensionais (1D), passando por modelos bidimensionais (2D) e até modelos tridimensionais (3D).

Os modelos hidrodinâmicos são frequentemente utilizados no intuito de simular a variação do campo de velocidade em função do espaço e do tempo. Tais modelos alimentam outros modelos, entre eles os de qualidade de água ou de transporte de sedimentos, uma vez que estes fenômenos dependem de características hidrodinâmicas dos corpos d'água (BARROS et al., 2005).

As equações fundamentais que governam a hidrodinâmica em corpos d'água são deduzidas a partir da aplicação dos princípios básicos de leis de conservação de três grandezas fundamentais da Mecânica dos Fluidos: *energia, massa e quantidade de movimento*. As relações matemáticas que estas leis expressam podem ser obtidas a partir do balanço de massa em um volume de controle infinitesimal de um fluido. A partir do balanço de massa surge a equação da continuidade. A partir da aplicação do balanço da quantidade de movimento originam-se as Equações de Navier-Stokes. Tais equações podem ser encontradas em Fox e Mc Donald (1988).

As equações tridimensionais de Navier-Stokes constituem o modelo matemático geral para o escoamento de fluidos. A representação dos escoamentos através da consideração destas equações de forma completa consiste em uma abordagem mais complexa. No entanto, a representação de alguns corpos d'água pode ser feita considerando simplificações destas equações, o que leva a modelos mais simples, rápidos e com menor exigência de dados de entrada. Além de uma exigência menor de recursos computacionais.

O modelo hidrodinâmico adotado neste trabalho é o bidimensional longitudinal-transversal. As equações de conservação da massa e de conservação da quantidade de movimento foram

integradas em relação a variável “z” (Figura 3.2). Tal integração é permitida pela hipótese de que os gradientes nas direções “x” e “y” são mais importantes que os na direção “z”. Isto se aplica às pequenas profundidades do lago Água Preta, que não ultrapassam 5,50 m. Outra consequência da hipótese supracitada é que a aceleração do movimento na vertical pode ser desprezada, permitindo a aproximação de pressão hidrostática.

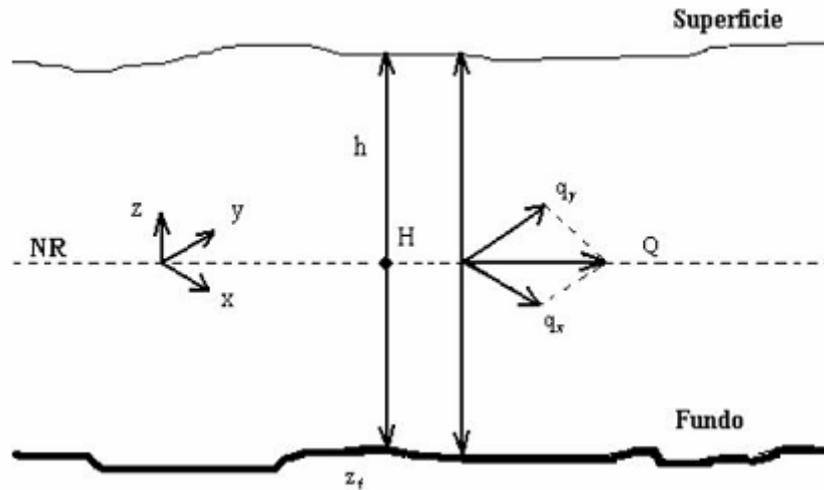


Figura 3.2 - Sistema de coordenadas para as equações integrais na vertical.

Fonte: Secretan et al. (2000).

As hipóteses apresentadas anteriormente aplicadas à equação da continuidade e posteriormente às equações de Navier-Stokes, seguindo o sistema de coordenadas como mostra a Figura 3.2, originam as equações a seguir.

A equação (1) representa a conservação da massa e as equações (2) e (3) representam a conservação da quantidade de movimento para o fluido, nas direções x e y, para um escoamento bidimensional, incompressível e em regime permanente.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{q_x}{H} + \frac{\partial q_x}{\partial y} \frac{q_y}{H} = \sum F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial q_y}{\partial x} \frac{q_x}{H} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \frac{q_y}{H} = \sum F_y \quad (3)$$

onde q_x e q_y (m^3/s) são as vazões nas coordenadas cartesianas x e y; t (s) tempo; h (m) nível da água; H (m) a profundidade da coluna d' água; F_x e F_y (N) forças de volume nas direções x e y.

Os termos do lado direito das equações (2) e (3) são dados pelas equações (4) e (5)

$$\sum F_x = -gH \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{n^2 g |\vec{q}| q_x}{H^{1/3}} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) + F_{cx} + F_{wx} \quad (4)$$

$$\sum F_y = -gH \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{n^2 g |\vec{q}| q_y}{H^{1/3}} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial(H\tau_{yx})}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \right) + F_{cy} + F_{wy} \quad (5)$$

onde g é a aceleração da gravidade (m^2/s); n é o coeficiente de atrito de Manning; $|\vec{q}|$ (m^3/s) é o módulo da vazão específica; ρ (kg/m^3) é a massa específica da água; τ_{ij} (Pa) é o tensor de tensões de Reynolds; F_{cx} e F_{cy} (N) são as componentes da Força de Coriolis; e F_{wx} e F_{wy} (N) são as componentes da força devido ao vento nas direções x e y, respectivamente.

No presente trabalho, o efeito da Força de Coriolis e do vento, foram julgados pequenos o suficiente para serem desprezados, devido às dimensões do domínio.

O modelo de turbulência utilizado pelo *Modeleur* é o de comprimento de mistura, que leva em consideração à distância da parede a partir da qual, o tamanho das estruturas turbulentas não é mais influenciado pela parede (RODI, 1993). Neste caso, a viscosidade turbulenta é dada pela equação (6).

$$v_t = L_m^2 \sqrt{2D_{ij}D_{ij}} \quad (6)$$

onde v_t é a viscosidade turbulenta; D_{ij} são as componentes "ij" do tensor da taxa de deformação do movimento médio; \bar{U}_i é a componente da velocidade média na direção i, como mostra a equação (7).

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

3.6. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

3.6.1. Descrição dos programas *Modeleur* e *Hydrosim*

Os programas *Modeleur* e *Hydrosim*, utilizados na elaboração do MET (Modelo de Elevação de Terreno), do estudo morfológico e nas simulações hidrodinâmicas do lago Água Preta fazem parte do pacote Hydreau (GRE-EHN, 2009). No pacote Hydreau, existem os programas: *Hydrosim*, que simula o escoamento, constrói e resolve o modelo de elementos finitos que discretiza as Equações de Saint-Venant; o *Habiosim*, que tem como finalidade simular habitats de fauna e flora aquáticas; e o *H2D2*, que simula a dispersão de poluentes em meio aquático. O Hydreau é desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa e Estudos em Eco-Hidráulica Numérica (GRE-EHN) do INRS-ETE/ da Universidade do Quebec - Canadá.

O *Modeleur / Hydrosim* é a combinação de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) adaptado à hidráulica fluvial. É um poderoso pré e pós-processador de Elementos Finitos (SECRETAN et al.,1998). O programa realiza todas as etapas da integração dos diversos dados de campo para a concepção do MET suportado por uma malha de Elementos Finitos. Assim, o *Modeleur* formata os dados necessários às simulações hidrodinâmicas, enquanto que o *Hydrosim* executa tais simulações através do Modelo de Saint-Venant.

No *Modeleur*, existem partições para: topografia, malha hidrodinâmica, substrato, vento e condições de contorno. A Figura 3.3 mostra uma partição, que consiste em uma ferramenta espacial, composta por vértices, bordas e subdomínios, possuindo condições de coerência em sua estrutura, por exemplo, uma borda não pode cruzar outra borda, o subdomínio deverá estar fechando superfícies e nunca deverá estar no interior de outro subdomínio. A partição permite ser utilizada de várias formas para a construção e modificação geométrica, ela é uma ferramenta genérica designada pra suprir informações nos vértices e subdomínios.

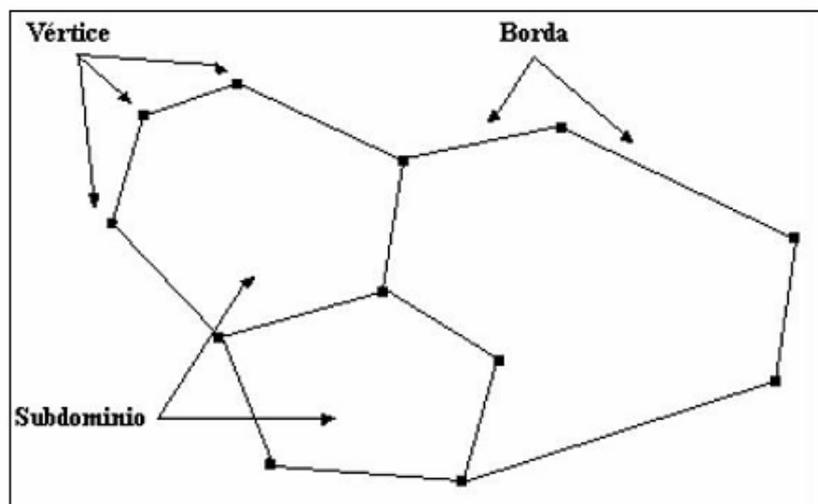


Figura 3.3 – Estrutura de uma partição utilizada pelo *Modeleur*.

Existe certo número de partições que são designadas para gerar dados específicos. A base da partição conta com a independência entre os dados do terreno e os dados reais utilizados na simulação hidrodinâmica. Com isso, o banco de dados do programa pode ser alimentado com a adição de novas partições que podem ser combinadas as já existentes. Assim, a qualidade do modelo pode evoluir com o tempo.

O modelo matemático representado pelas equações de Saint-Venant não possui solução analítica, desta forma, deve se utilizar um método numérico para sua solução. O software *Modeleur/Hydrosim* utiliza o método de elementos finitos (MEF) para a discretização espacial da Equação de Saint-Venant. O modelo é bidimensional-longitudinal-transversal. As equações de conservação da massa e de conservação da quantidade de movimento são integradas na profundidade. Deste modo, os valores obtidos para a velocidade e para a concentração são médios na direção vertical. (SECRETAN et al., 1998).

O MEF utilizado faz uma interpolação quadrática em cada elemento da malha triangular, isto significa que a malha é formada por triângulos constituídos por seis nós, denominados de T6L, como mostra a Figura 3.4. Desta forma, o MEF permite não somente representar os valores médios em um campo variável, mas também resolve as equações da mecânica do contínuo aplicáveis ao problema físico analisado (SECRETAN et al., 2001).

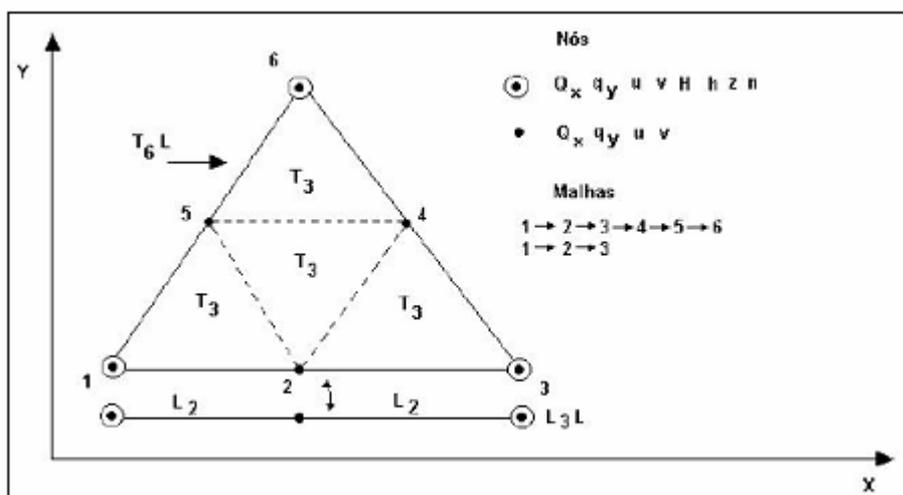


Figura 3.4 – Triangularização utilizada pelo *Modeleur*.

Fonte: Secretan et al., 2001.

Na Figura 3.4 as variáveis h (altura d'água), H (profundidade), z_f (cota de fundo) e o coeficiente de rugosidade (pontos 1, 3 e 6 da Figura 3.4), são interpolados linearmente, pois seus gradientes são menos acentuados que os gradientes das velocidades e vazões específicas (pontos 2, 4 e 5 da Figura 3.4), os quais são interpolados quadraticamente, por, geralmente, possuírem gradientes mais acentuados.

3.6.2. Calculadora do *Modeleur*

O *Modeleur* possui uma calculadora que é uma ferramenta que trabalha com campos escalares e vetoriais gerados a partir das simulações efetuadas com o *Hydrosim*.

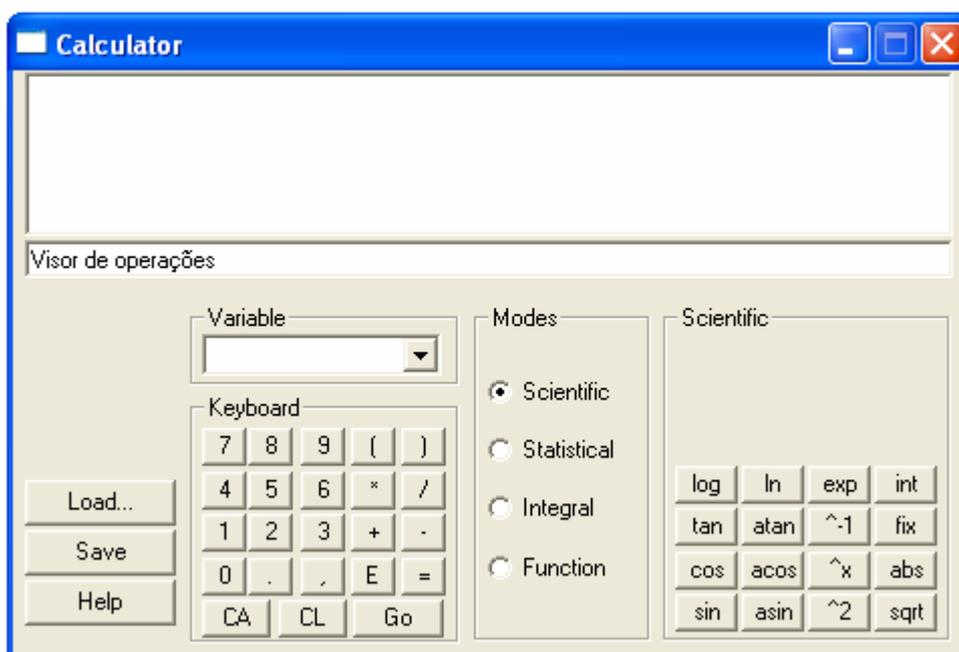


Figura 3.5 – Calculadora do *Modeleur*.

A partir da manipulação matemática desses campos, é possível a criação de novos campos para a análise de fenômenos encontrados no campo da hidráulica fluvial. Tais análises são possíveis devido à linguagem de programação científica, que permite escrever funções compatíveis com a calculadora, descrevendo grandezas hidráulicas dependentes dos campos básicos de velocidade e profundidade, dentre outros. Para acessar a calculadora (Figura 3.5) basta selecionar a opção ferramenta e clicar no item “calculator” (versão em inglês do software *Modeleur*).

Os campos mais utilizados da calculadora do *Modeleur* (Figura 3.5) no referente estudo, foram: Integral e *Function*. A partir dessas funções da calculadora, foram obtidos valores de grandezas tais como:

- ❖ Superfície e volume do corpo hídrico estudado;
- ❖ Diferenças de topografia, área e volume.

Tais grandezas podem ser utilizadas para subsidiar, por exemplo, estudos de evolução morfológica de corpos hídricos, como os pretendidos aqui neste trabalho.

3.6.3. Exemplos de utilização do *Modeleur/Hydrosim*

O *Modeleur/Hydrosim* foi usado com sucesso em vários projetos, como por exemplo:

- ❖ Simulação dos eventos de inundações de julho de 1996 na região de Saguenay (Quebec-Canadá), simulando uma seção longa, 37 Km, do rio Saguenay (SECRETAN et al., 2000).
- ❖ Barros, em seu trabalho de conclusão de curso (2003) e em sua dissertação (2005). No primeiro trabalho, realizou a modelagem hidrodinâmica do igarapé do Tucunduba e no segundo a modelagem hidrodinâmica da Baía do Guajará.
- ❖ Braga e Cruz (2006) realizaram um estudo hidrodinâmico do rio Guamá às imediações do Campus universitário.
- ❖ Sena et al. (2006), realizaram um trabalho que tem como objetivo apresentar o estudo sobre parte dos possíveis impactos ambientais que podem ser causados na área de confluência entre o rio Guamá e a Baía de Guajará, onde está sendo construída a nova orla da cidade de Belém. Este estudo fez uma análise do escoamento da baía do Guajará, utilizando um modelo hidrodinâmico computacional do tipo águas rasas.
- ❖ Blanco et al. (2009), comprovaram a eficiência do modelo para a região de aplicação, possibilitando a simulação do escoamento, e em consequência a estimação das velocidades antes e depois da implantação do projeto nova orla de Belém. O trabalho analisa o momento

mais crítico para a obra, que se dá no momento de pico das velocidades, o qual ocorre na cheia da maré.

- ❖ Lima et al. (2009), realizaram um estudo sobre a modelagem hidrodinâmica e o estudo morfológico do lago Bolonha. O estudo compreendeu dois conjuntos de dados de batimetria, referentes aos anos de 1983 e 2007 apresentando uma boa representação do modelo de elevação do terreno. A partir do MET, do modelo de rugosidade, das condições de contorno definidas parte se para a simulação do escoamento do lago Bolonha, o qual, revela uma sutil correnteza entre a saída do canal de interligação entre os lagos Bolonha e Água Preta, e as entradas da ETA Bolonha e da ETA São Brás. Quanto à análise morfológica, o trabalho verificou que entre 1983 e 2007, ocorreram poucas mudanças no relevo de fundo do lago Bolonha, a principal foi o canal formado pelo escoamento que não existia antes de 1983.

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA

O procedimento metodológico do presente trabalho, pauta-se nas seguintes etapas necessárias à utilização das ferramentas computacionais citadas anteriormente.

- ❖ Definição dos dados topobatimétricos dos anos de 1975 e 2009 visando à elaboração do MET;
- ❖ Definição do substrato do fundo do corpo hídrico para a elaboração de um modelo de rugosidade;
- ❖ Definição das condições de contorno;
- ❖ Com o MET, a rugosidade e as condições de contorno definidos e transferidos para a malha hidrodinâmica em elementos finitos, simula-se, através do modelo de Saint-Venant, as velocidades e as profundidades do lago Água Preta;

4.1. BATIMETRIA

No escopo deste trabalho, a primeira etapa para que os modelos numéricos possam funcionar de forma satisfatória, é que se faça um levantamento cuidadoso e minucioso dos dados topobatimétricos. Neste estudo, as simulações hidrodinâmicas são funções de dois conjuntos de dados topobatimétricos. O primeiro, do ano de 1975, foi levantado através de consulta ao acervo cartográfico da COSANPA (Anexo 1) e o segundo, foi levantado através de uma batimetria realizada em outubro de 2009. O mapa da RMB utilizada no presente trabalho pertence ao acervo da CODEM (Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém), a mesma foi importada para o software *Modeleur*, servindo de base georeferenciada para o estudo em questão.

4.1.1. Topobatimetria de 1975

Levantou-se de forma detalhada a batimetria e a topografia do lago Água Preta do ano de 1975, utilizando o mapa de curvas de níveis pertencente ao acervo cartográfico da COSANPA. A topobatimetria contida no mapa consultado foi transferida para uma malha regular de 50x50m, a partir do conhecimento de um ponto georeferenciado em coordenadas UTM e da escala do referido mapa topográfico. A malha resultante contém 750 pontos georeferenciados e dotados de cotas. Com isso, foram gerados a partir da digitalização do mapa topobatimétrico um conjunto de dados do ano de 1975. Este, então, foi adaptado ao formato do arquivo de dados topográficos do *Modeleur* (Tabela 4.1). O arquivo contém a descrição do elipsóide utilizado como georeferência, as coordenadas UTM, bem como as cotas que foram utilizadas para definir o MET. A última coluna do arquivo representa o erro referente aos dados.

Tabela 4.1 - Amostra do arquivo de dados topográficos utilizados pelo *Modeleur*.

X	Y	Z	Erro
787843.00	9841595.00	8.00	0.00
787840.00	9841595.00	7.50	0.00
787901.00	9841595.00	8.00	0.00
787864.00	9841595.00	8.50	0.00
787872.00	9841595.00	9.00	0.00
787936.02	9841621.63	8.50	0.00
787824.04	9841627.16	9.00	0.00
787748.08	9841674.12	9.00	0.00

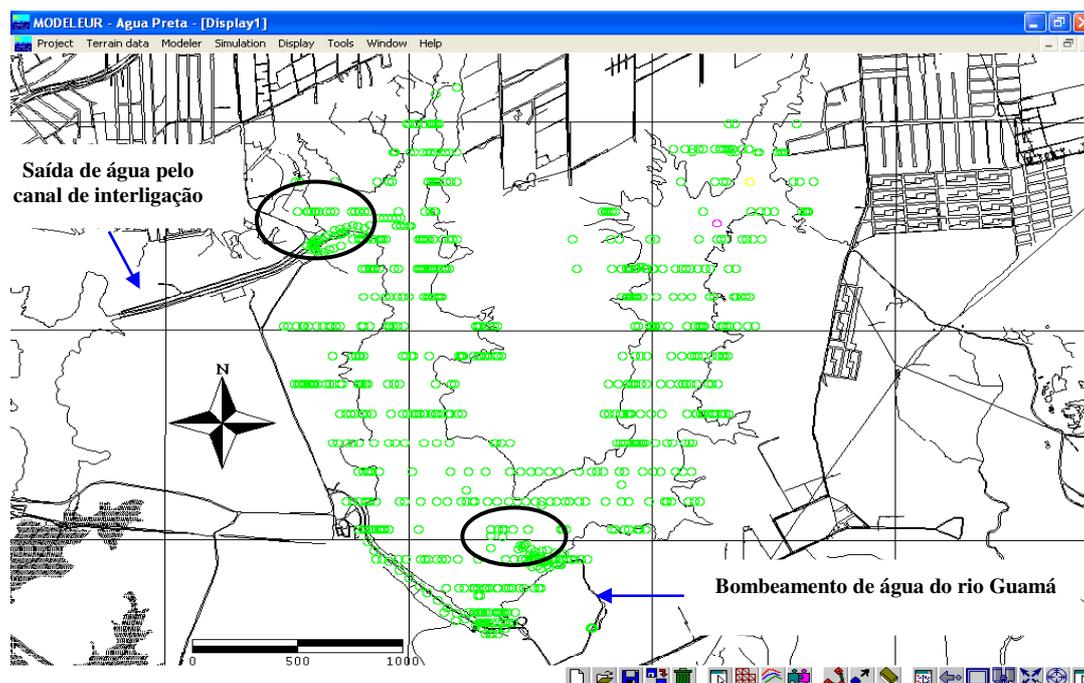


Figura 4.1 - Dados de topobatimetria de 1975.

O arquivo então foi importado para o software *Modeleur 1.0a07*, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) para interpolar os dados de topografia, produzindo assim, um Modelo de Elevação de Terreno (MET). A Figura 4.1 apresenta os 750 pontos de coordenadas x, y e z, representando os dados brutos de topografia do lago Água Preta na plataforma do *Modeleur*.

Nas regiões circundadas da Figura 4.1, pontos de topografia foram inseridos, com intuito de representar o Modelo de Elevação de Terreno de forma mais completa, a região mais ao sul adução do rio Guamá e mais ao norte onde se encontra a saída de água pelo canal de interligação possui

maiores elevações, pois em 1975 não existiam nem a adução do rio Guamá e o canal de interligação entre os lagos Bolonha e Água Preta.

4.1.2. Batimetria de 2009

A batimetria de 2009 foi obtida a partir de uma coleta de dados em campo no dia 08/10/2009, utilizando um ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). A Figura 4.2 apresenta o ADCP. Tal equipamento possui uma faixa de medição de profundidades entre 100 e 0,30 m, com uma resolução de 10,0 cm, adequada à grande maioria de profundidades encontradas no lago Água Preta. O procedimento de medida foi estabelecido para cada vertical, onde um valor de profundidade foi determinado, acompanhado da geolocalização do ponto através de um GPS manual, acoplado ao ADCP. A frequência de amostragem de 1Hz do ADCP, garantiu rapidez no levantamento dos dados, permitindo a obtenção de 12.716 pontos topobatimétricos nos 4 km de área navegável do lago.



Figura 4.2 - Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP).

A coleta de dados batimétricos foi limitada pelas condições ambientais do lago Água Preta, pois às suas margens encontra-se quantidade considerável de macrófitas e troncos de árvores (Figura 4.3). Por isso, algumas áreas da Figura 4.4 apresentam a inserção de dados de 1975 para suprir a falta de dados de 2009. Tal inserção não acarretou danos a análise do escoamento, já que na região de maior dinâmica do lago (Figura 5.9), os dados são prioritariamente de 2009. Nesse caso, para essas regiões, a diferença entre as topografias de 2009 e 1975 é nula.



Figura 4.3 - Margem do lago Água Preta coberta por macrófitas.

O conjunto de dados possui 12.716 pontos de coordenadas x, y e z que podem ser observados na Figura 4.4, a qual mostra a batimetria do ano de 2009.

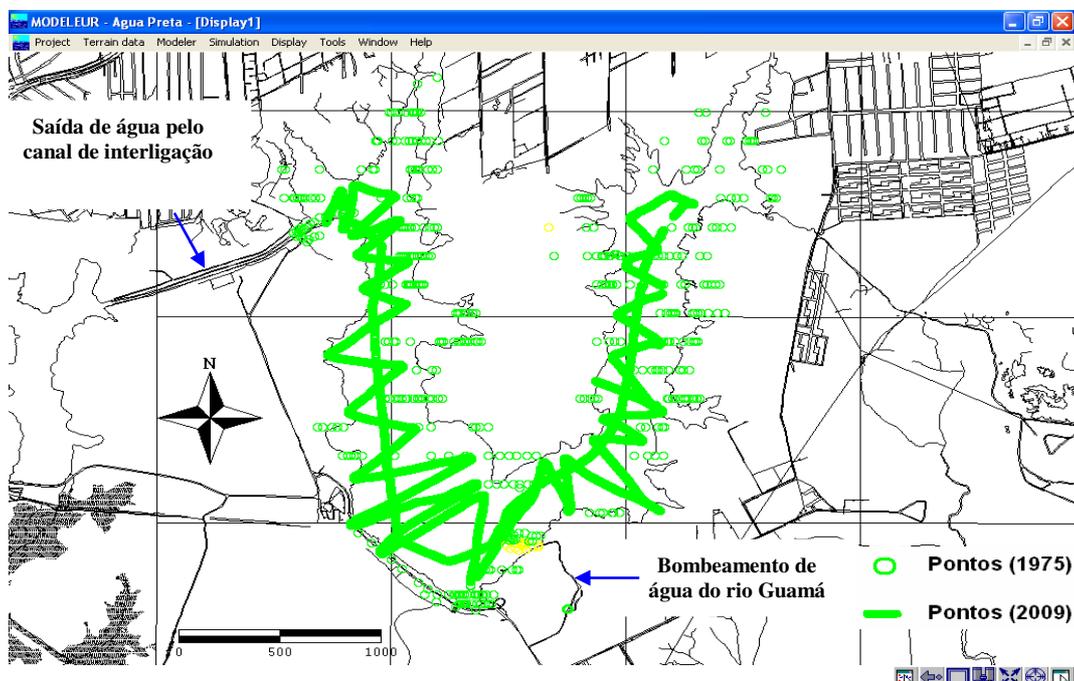


Figura 4.4 - Dados batimétricos de 2009.

4.2. MODELOS DE ELEVAÇÃO DE TERRENO DE 1975 E 2009

A partir do conjunto de dados brutos de topografia obtidos nos anos de 1975 e 2009, obtiveram-se os METs em forma de curvas de nível. A Figura 4.5 apresenta o MET do lago Água Preta de 1975 sob a forma de curvas de nível.

Analisando a Figura 4.5, observa-se que as cotas altimétricas do terreno situam-se entre 3,5 e 15,5 m. Entretanto, a maior parte do lago encontra-se entre as cotas 3,5 e 10,5 m, pois somente ao Norte as cotas atingem 15,5 m. Com os novos dados brutos de topografia de 2009 (Figura 4.4), gerou-se também o MET de 2009, em formas de curvas de nível, como mostra a Figura 4.6.

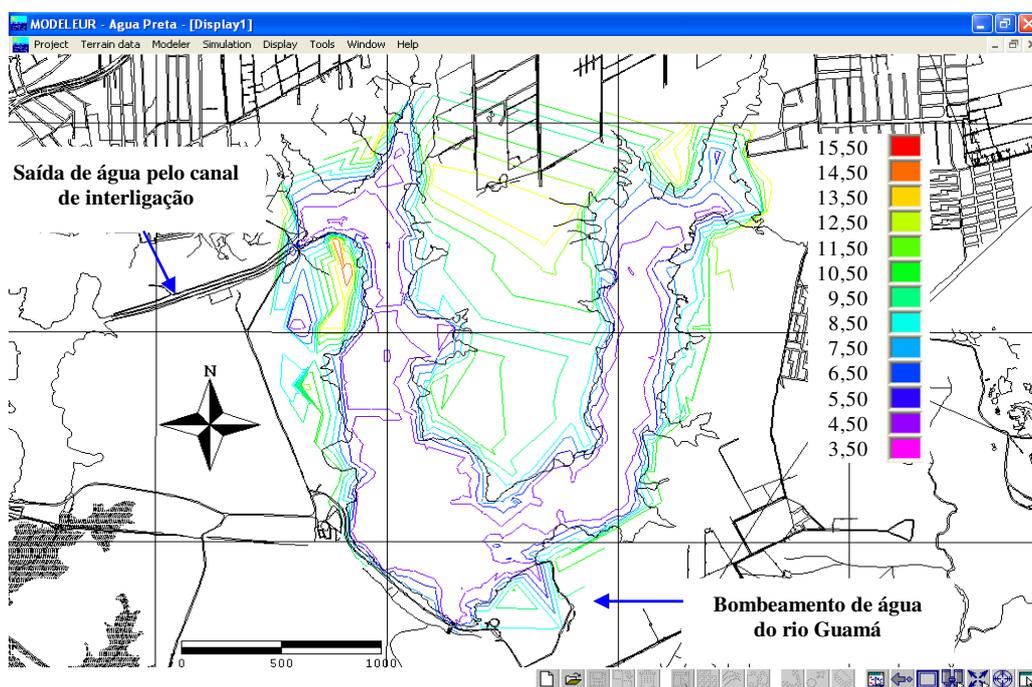


Figura 4.5- MET do lago Água Preta 1975 sob a forma de curvas de nível

Comparando-se as duas Figuras, o estudo revela que as elevações topográficas do lago Água Preta não mudaram significativamente nos 34 anos que separam as batimetrias, a não ser na região circundada na Figura 4.6, onde o MET de 2009 revela uma região de menores cotas altimétricas, revelando o assoreamento provocado pelos sedimentos advindos do rio Guamá.

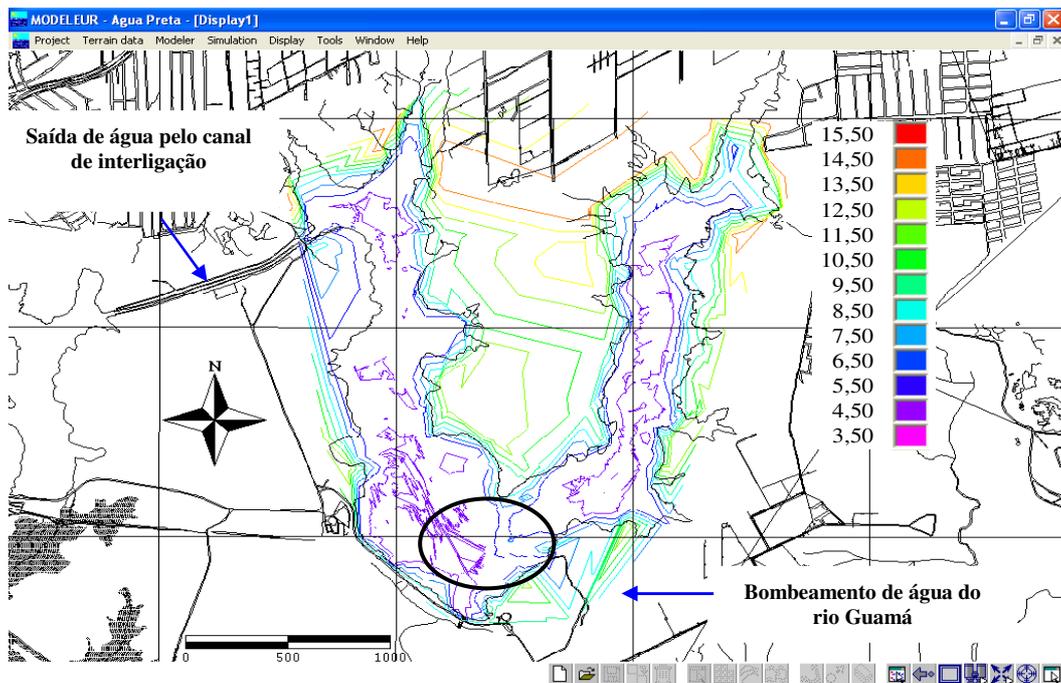
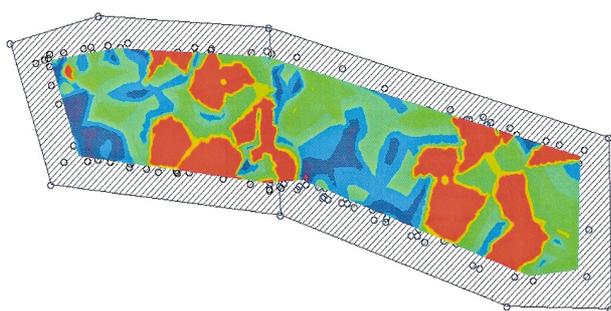


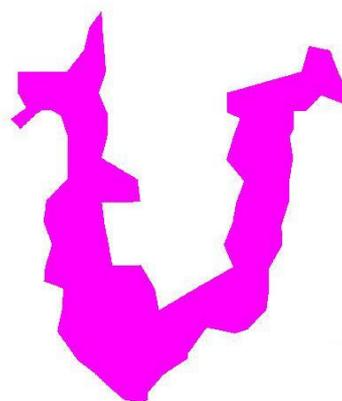
Figura 4.6 - MET do lago Água Preta 2009 sob a forma de curvas de nível.

4.3. SUBSTRATO

Para a determinação da rugosidade equivalente de fundo, é necessário ter conhecimento da granulometria dos materiais que formam o leito do corpo d'água. Tal granulometria serve como base para a elaboração do modelo de rugosidade, imprescindível na construção do modelo hidrodinâmico.



(a) Forma direta



(b) Forma indireta

Figura 4.7 – Representações dos modelos de rugosidade do *Modeleur*.

Fonte: SECRETAN, 2001.

O software *Modeleur* apresenta duas possibilidades para a construção deste modelo, que são as formas direta ou indireta. Na primeira (Figura 4.7(a)), o parâmetro de rugosidade é explicitamente definido através de um campo de distribuição de substrato. Na segunda (Figura 4.7(b)), são usadas faixas de granulometria como dados de entrada, no intuito de se calcular um diâmetro médio, que represente a rugosidade do fundo do corpo d'água, neste caso representado por uma só cor.

No referido estudo, optou-se pela segunda forma de representar o substrato, utilizando-se as informações coletadas por Dias et al. (1991) que descreveram a granulometria e sua proporção. Este trabalho teve como objetivo específico mensurar, por processos diretos, o carreamento de materiais sólidos na bacia hidrográfica dos lagos Bolonha e Água Preta. Foram coletadas 469 amostras de sedimento, pelo período de 2 anos, em diversas partes, conforme as diferenças de cobertura vegetal, distribuídos sistematicamente nas bacias dos lagos Bolonha e Água Preta, com as seguintes coberturas vegetais: sem vegetação, pastagem, floresta densa, floresta secundária ou capoeira.

A Tabela 4.2 (Lima et al., 2009) apresenta a distribuição das médias granulométricas analisadas por Dias et al. (1991), o estudo revelou que as classes predominantes foram as de areia grossa e fina.

Tabela 4.2 - Partículas, granulometria e porcentagem do substrato.

Partícula	Diâmetro das partículas (mm)	%
Areia Grossa	2 a 0,2	47
Areia Fina	0,2 a 0,05	33
Silte	0,05 a 0,002	8
Argila	0,002	12

Fonte: LIMA et al., 2009.

Considerando que todo o fundo do lago é composto pelas porcentagens apresentadas na Tabela 4.2, o coeficiente de atrito de Manning (n) é calculado pela expressão a seguir (SECRETAN et al., 2000),

$$n = \frac{1}{\left\{34,9 \left[-\log(d_{med}) \right]^{0,31} \right\} + 0,00017} \quad (8)$$

onde d_{med} é o diâmetro médio das partículas componentes do substrato, as quais são apresentadas na Tabela 4.2. Assim o coeficiente de Manning para o fundo do lago Água Preta teve um valor calculado de 0,019.

Em rios o coeficiente de Manning pode variar entre 0,025 e 0,150 (Tucci et al., 2000), estes valores somam a rugosidade apresentada pelo leito do rio e margens. O valor 0,019 refere-se apenas à rugosidade referente ao material do leito, sendo essa a razão dos valores de n serem inferiores aos valores da literatura.

4.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO

Outro elemento fundamental para que o modelo hidrodinâmico funcione de forma adequada, são as condições de contorno ou de fronteira apropriadas (superfície livre, fundo e fronteiras fechadas, móveis ou abertas). Nelas podem ser impostos valores das propriedades ou fluxos de entrada ou saída de acordo com a tipologia da fronteira.

Neste estudo foram consideradas as seguintes condições de contorno:

- Fronteiras sólidas: condição de impermeabilidade.
- Fronteiras líquidas: vazões e níveis d'água.
- ❖ **Fronteira 1:** Adução do rio Guamá: Vazão máxima captada = $6,0 \text{ m}^3/\text{s}$ e nível d'água = 8,90 m.
- ❖ **Fronteira 2:** Saída de água pelo canal de interligação do lago Água Preta com o Bolonha: Vazão = $6,0 \text{ m}^3/\text{s}$ e nível d'água = 8,90 m.

O nível de água foi medido na campanha do dia 29/10/2009. A régua disponível estava na marca de 8,90m e encontrava-se próximo à adução do Rio Guamá. A Figura 4.8 mostra as condições de contorno para o lago Água Preta.

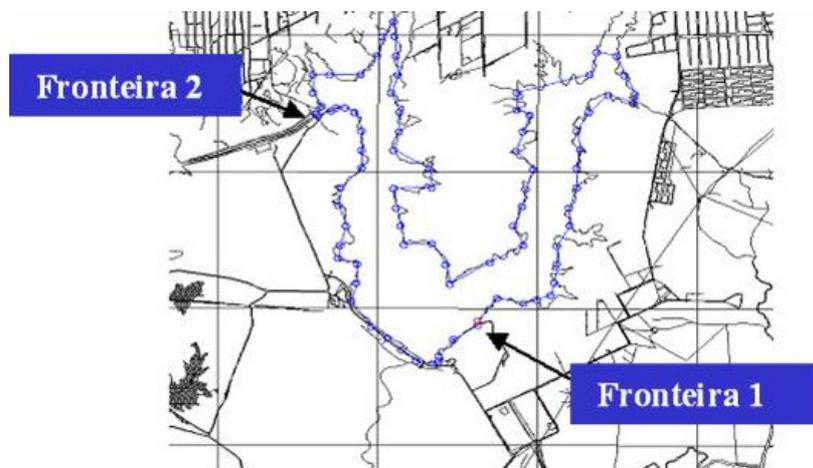


Figura 4.8 – Condições de contorno do lago Água Preta.

4.5. MALHA HIDRODINÂMICA

Com os modelos de elevações de terrenos brutos, de rugosidade e as condições de contorno definidas, o *Modeleur* pôde gerar as malhas hidrodinâmicas das Figuras 4.9 e 4.10, que estocaram todas as grandezas de entradas necessárias à resolução das equações de Saint-Venant, bem como as grandezas resultantes da simulação do escoamento bidimensional (v_x , v_y , profundidade e nível d'água). Para o modelo considerado aqui, as grandezas de entrada são: as coordenadas x , y e z ,

interpoladas via MEF e transferidas para a malha hidrodinâmica, o valor de rugosidade médio calculado e as condições de contorno definidas anteriormente.

As malhas triangulares foram geradas a partir de um algoritmo isotrópico frontal que utiliza um só parâmetro de espaçamento e tenta gerar triângulos os mais regulares possíveis (SECRETAN et al., 2000).

A Figura 4.9 demonstra a malha hidrodinâmica utilizada para simular o MET do ano de 1975. Os triângulos, ou seja, os elementos finitos da malha de 1975, em número de 33.288, possuem aresta de 10m de comprimento, o número total de nós é de 68.237.

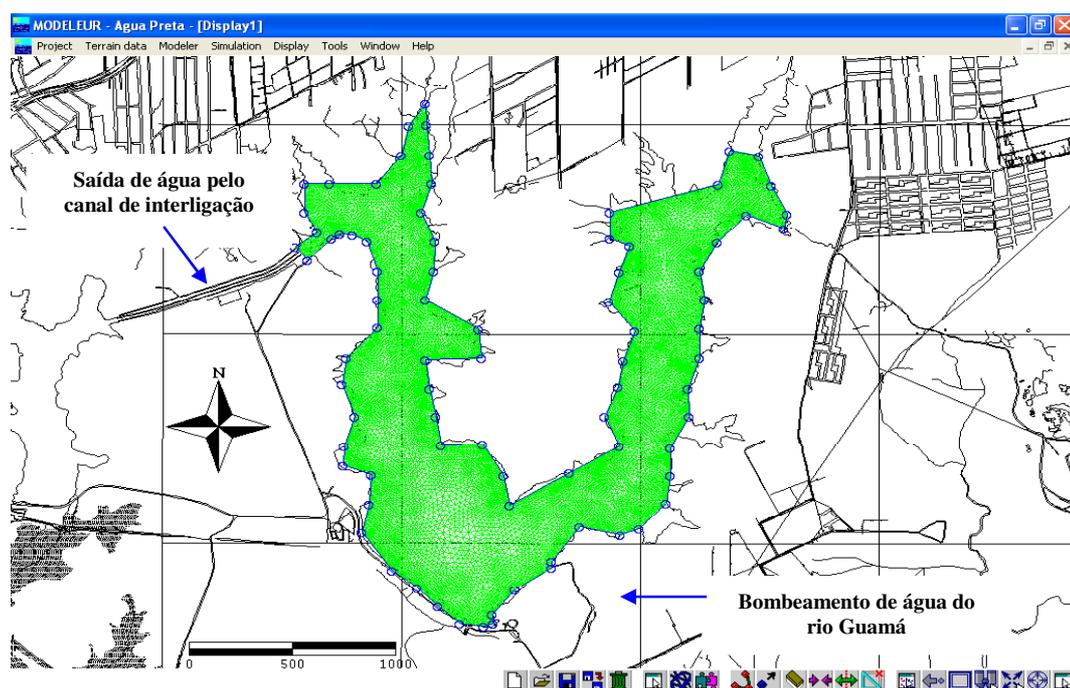


Figura 4.9 - Malha hidrodinâmica de 1975.

Foram utilizadas nas simulações de 1975 malhas hidrodinâmicas com aresta maior dos triângulos iguais a 15, 10 e 5m. A diferença entre os erros do balanço de massa entre a entrada e a saída do domínio para as malhas de 10 e 5 foi pequena, sendo que a malha de 10m consome um tempo computacional menor. Logo, tomou-se a malha de 10m para se analisar os resultados dessa modelagem preliminar. Neste caso, o balanço de massa mostrou-se equilibrado apresentando um erro de 0,033%, considerado um erro desprezível para o escoamento em reservatórios de pouca dinâmica. O modelo convergiu em 01h 55m 06s em um computador pessoal Pentium 4 de 2.8 GHZ, mostrando a praticidade, em termos de recursos computacionais, do software *Modeleur/Hydrosim*.

Nas simulações de 2009, tentou-se utilizar a mesma malha de 1975, ou seja, a malha com aresta maior dos triângulos igual a 10m. Entretanto, os erros dos balanços de massa aumentaram um pouco. Dessa forma, foi feito um refino de malha tentando-se recuperar os erros da simulação de

1975, resultando em uma malha com aresta maior dos triângulos igual a 8m. A Figura 4.10 demonstra a malha hidrodinâmica da batimetria do ano de 2009. O número de triângulos é de 33.379, totalizando o número de nós de 68.432.

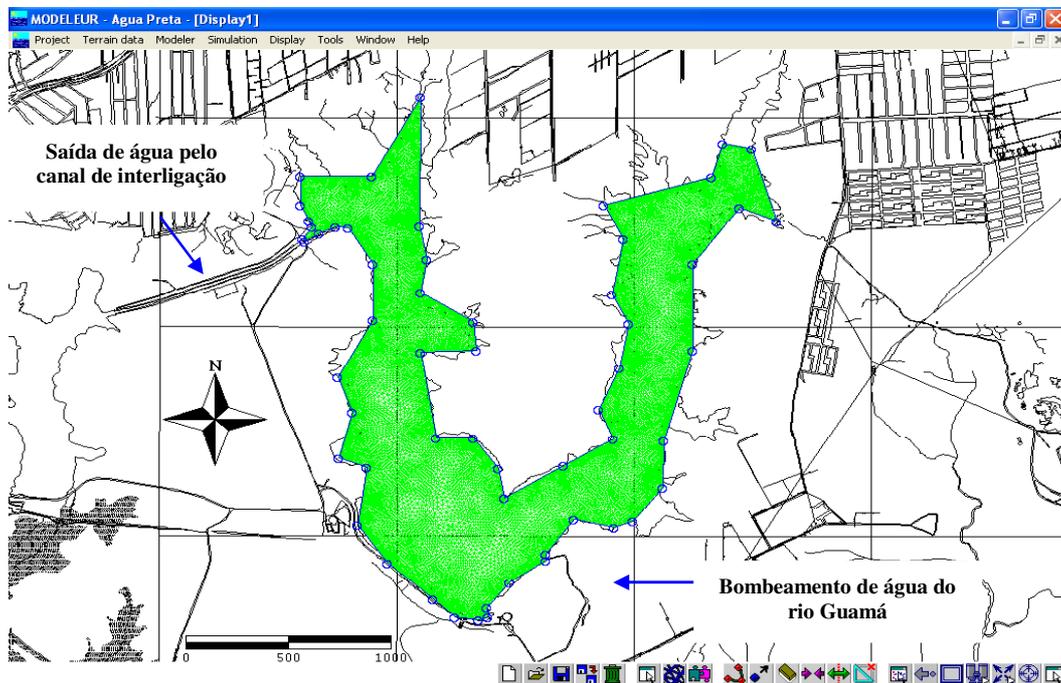


Figura 4.10 - Malha hidrodinâmica 2009.

Com a malha de 8 m, o balanço de massa apresentou um erro de 0,009%, menor ainda que o erro apresentado pela malha de 10 m utilizada para as simulações de 1975. O modelo convergiu em 13h: 47m: 37s em um computador pessoal AMD Duron 1.26 GHZ.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. MODELOS DE ELEVAÇÃO DE TERRENO SIMULADOS

Os modelos de elevação de terreno, resultantes da interpolação da cota z sobre as malhas, são também, como os modelos de elevação de terreno bruto, apresentados sob a forma de curvas de nível. A Figura 5.1 apresenta o MET interpolado do ano de 1975 e a Figura 5.2 apresenta o MET interpolado do ano de 2009.

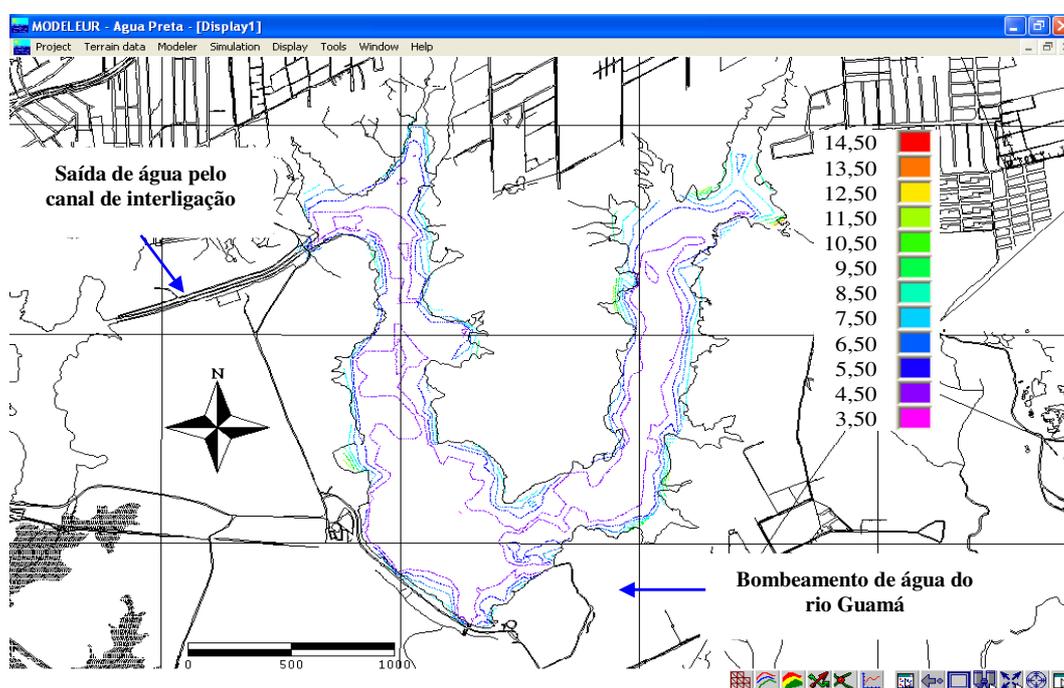


Figura 5.1 - MET interpolado de 1975.

Comparando os METs brutos a partir das Figuras 4.5 e 4.6 com os interpolados das Figuras 5.1 e 5.2, percebe-se que os METs interpolados representam bem a topografia do lago Água Preta. O software *Modeleur* pode representar também os modelos de elevação de terreno interpolados sob as formas de isosuperfícies. As Figuras 5.3 e 5.4 demonstram as isosuperfícies de 1975 e 2009 respectivamente.

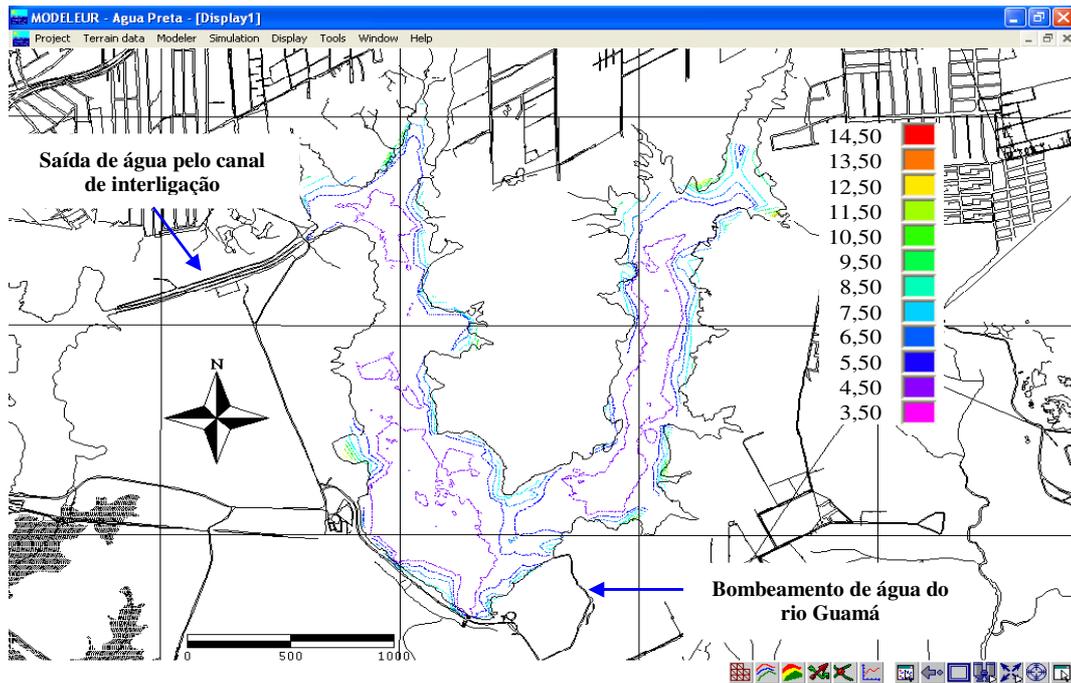


Figura 5.2 –MET interpolado de 2009.

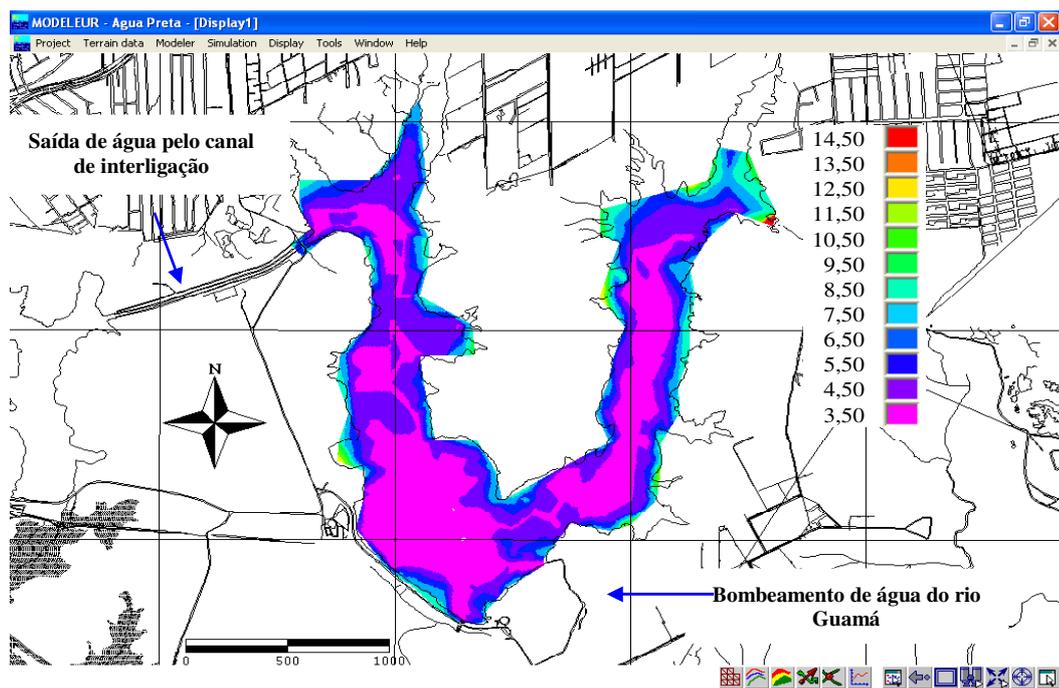


Figura 5.3 – MET interpolado 1975 sob a forma de isosuperfícies de elevação.

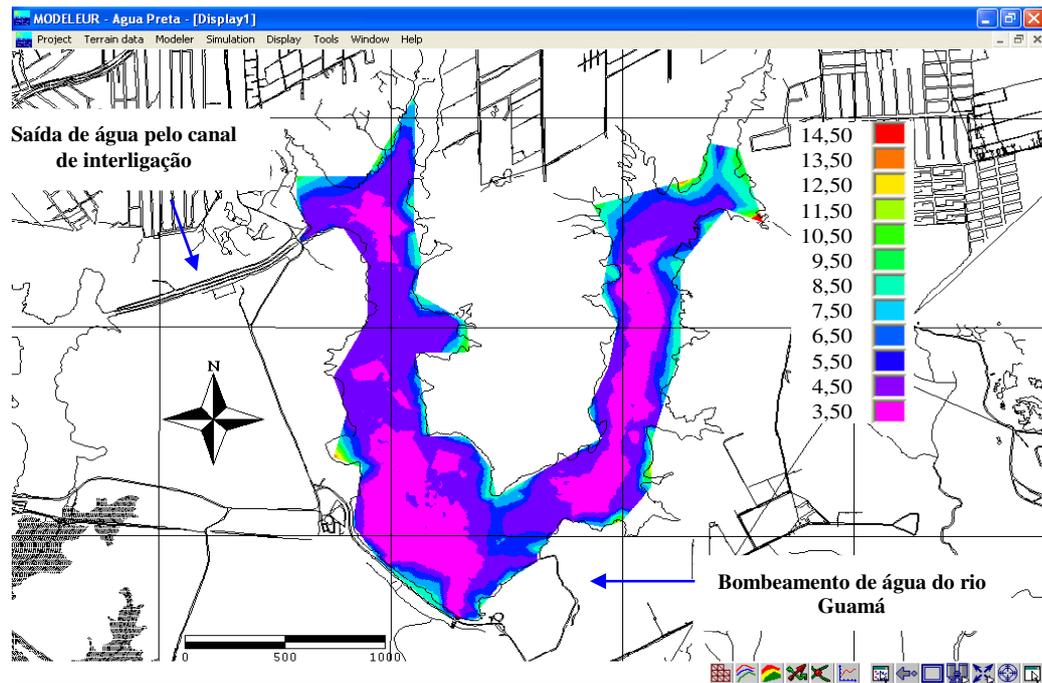


Figura 5.4 – MET interpolado 2009 sob a forma de isosuperfícies de elevação.

5.2. PROFUNDIDADES DO LAGO ÁGUA PRETA

A análise das profundidades do lago Água Preta é de primordial importância para verificarmos o comportamento morfológico do lago entre 1975 e 2009. As simulações hidrodinâmicas efetuadas sobre os METs do lago Água Preta são realizadas com base no nível d'água de 8,9 m (1975), para 2009 foram considerados dois níveis d'água: o primeiro de 7,9 m para se efetuar a validação da batimetria de 2009; e o segundo de 8,9 m considerado neste trabalho como N.A máximo do lago, já que foi o maior observado em 2009 pela equipe de pesquisa.

As simulações foram realizadas tendo como base as malhas hidrodinâmicas apresentadas nas Figuras 4.9 e 4.10, as quais, em cada um de seus nós, armazena as coordenadas x,y e z provenientes do MET interpolado, o valor da rugosidade do substrato do lago e as condições de contorno prescritas nas fronteiras líquidas do domínio de cálculo.

Os resultados simulados de nível d'água acompanham os valores de níveis d'água impostos como condição de contorno nas fronteiras líquidas, já que o escoamento no lago Água Preta, diferentemente dos escoamentos em rios, não é gerado pelos desníveis topográficos entre seções a montante e a jusante de um determinado trecho de rio e sim pelo bombeamento de água através da adução do rio Guamá.

No caso da simulação das profundidades, a mesma foi determinada através da Equação (9) (SECRETAN et al., 2000). Sendo que, os valores de topografia assumidos na Equação (9), são

provenientes do MET interpolado, e os valores de nível d'água (N.A.) são provenientes das condições de contorno impostas nas fronteiras líquidas como explicado anteriormente.

$$\text{Prof} = \text{N.A.} - \text{Topo} \quad (9)$$

Onde: Prof- profundidade (m);

N.A.- nível d'água (m);

Topo- topografia do terreno (m).

A Figura 5.5 apresenta em isosuperfícies, os resultados de profundidade do lago para o ano de 1975.

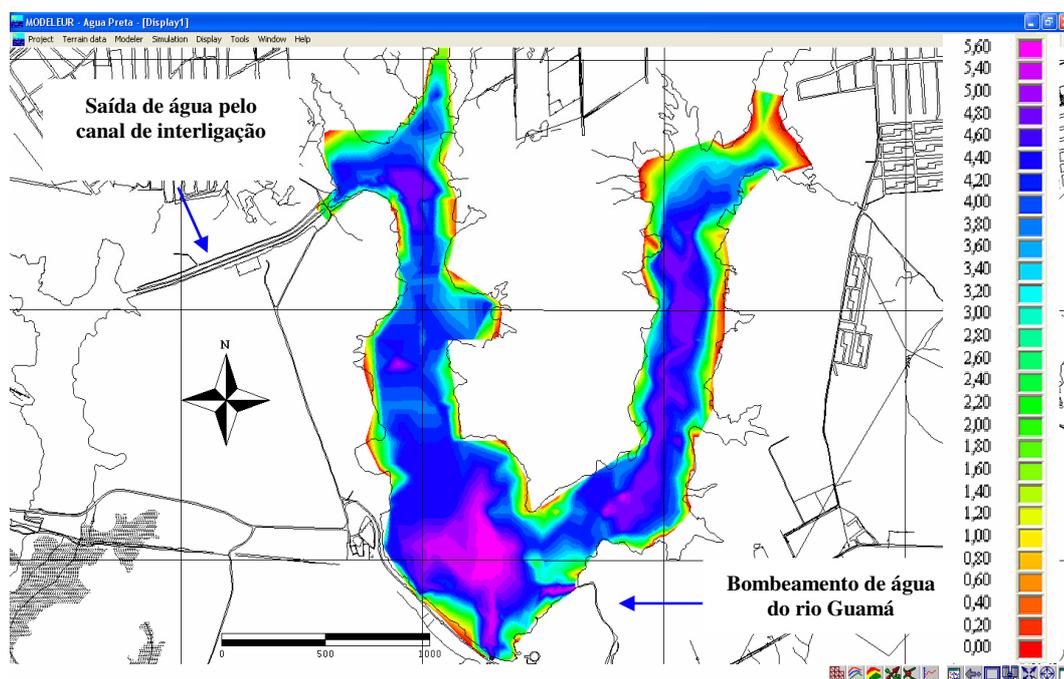


Figura 5.5 – Isosuperfícies de profundidade de 1975.

A isosuperfície apresentada pela Figura 5.5 foi simulada a partir das condições de contorno impostas ao modelo, ou seja, N.A. = 8,9 m e $Q = 6,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Neste caso, observa-se que a profundidade máxima do lago é de 5,60 m.

5.2.1. Validação da batimetria de 2009

Para comparações com as profundidades simuladas por SODRÉ (2007) (Figura 5.7), foram consideradas como condições de contorno $Q = 6,0 \text{ m}^3/\text{s}$ e N.A. = 7,9 m. A Figuras 5.6 apresenta em isosuperfícies, os resultados de profundidade do lago para a batimetria de 2009, com as condições de contorno anteriores.

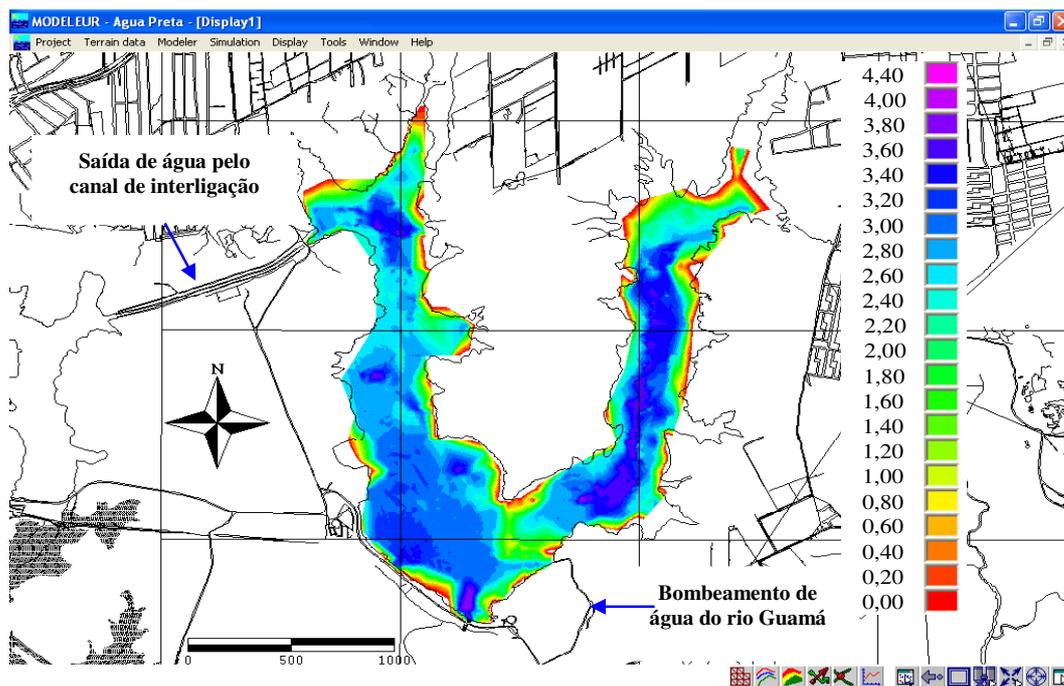


Figura 5.6 - Isosuperfícies de profundidade para a batimetria de 2009.

A partir da Figura 5.6 observou-se que a profundidade máxima encontrada no lago é de 4.40m, a qual encontra-se na porção mais ao sul. Nas extremidades nordeste e noroeste as profundidades variam de 2,4 a 3,8m. Às proximidades da adução do rio Guamá, as profundidades variam entre 0,80 a 1,60m. Essas pequenas profundidades estão associadas à sedimentação de partículas mais pesadas que se depositam próximas a esse local, pois as águas oriundas do rio Guamá são ricas em sedimentos.

As profundidades simuladas neste estudo, para fins de validação, são comparadas as profundidades simuladas por SODRÉ (2007). A autora elaborou uma carta batimétrica do lago Água Preta, utilizando um ecobatímetro Modelo 150SX_HUMMINBIRD Fishfinder Single Beam, e com um GPS portátil, que registrou as coordenadas geográficas para a definição da malha batimétrica realizada. A malha de perfilagem batimétrica foi construída de linhas verticais e horizontais, espaçadas aproximadamente em 100 metros.

A partir da imagem da área de estudo foi realizado o percurso por toda a borda do lago Água Preta, onde foram georeferenciados aproximadamente 600 pontos em toda a margem do lago. Esses pontos foram usados como pontos de referência, nos quais foram marcados transectos a serem percorridos fazendo-se a varredura das profundidades. A coleta de dados batimétricos foi realizada em outubro de 2006. A partir dos dados batimétricos pôde-se estudar a morfologia do fundo, bem como as variações das profundidades e possíveis assoreamentos ocorridos no lago Água Preta.

No trabalho de SODRÉ (2007), a profundidade máxima foi de 4,40 m na região mais ao sul e também na parte central do lago. Já na região de chegada das águas do Guamá, a Figura 5.7 revela profundidades de aproximadamente 0,80 m. Nas extremidades nordeste e noroeste, foram encontradas profundidades que variam entre 2,2 m e 3,2 m.

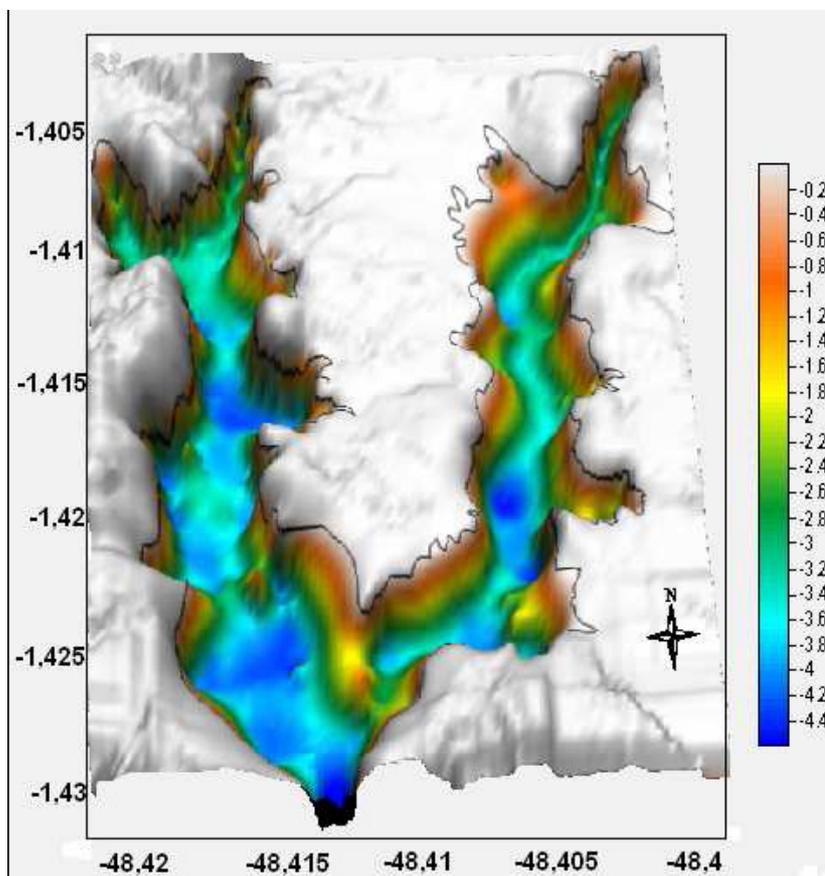


Figura 5.7 – Carta batimétrica do lago Água Preta.

Fonte: Sodré, 2007

Comparando os dados de profundidade encontrados em 2009, com os dados de SODRÉ (2007), constatou-se que houve pouca varia o nas profundidades dos respectivos estudos, validando a batimetria de 2009, pelo menos quando comparada aos dados disponíveis na literatura.

5.2.2. Profundidade de 2009

As isosuperfícies apresentadas pela Figura 5.8 foram simuladas a partir das condi es de contorno impostas ao modelo, ou seja, $N.A. = 8,9$ m e $Q = 6,0$ m³/s. Neste caso, observa-se que a profundidade máxima do lago   de 5,0 m.

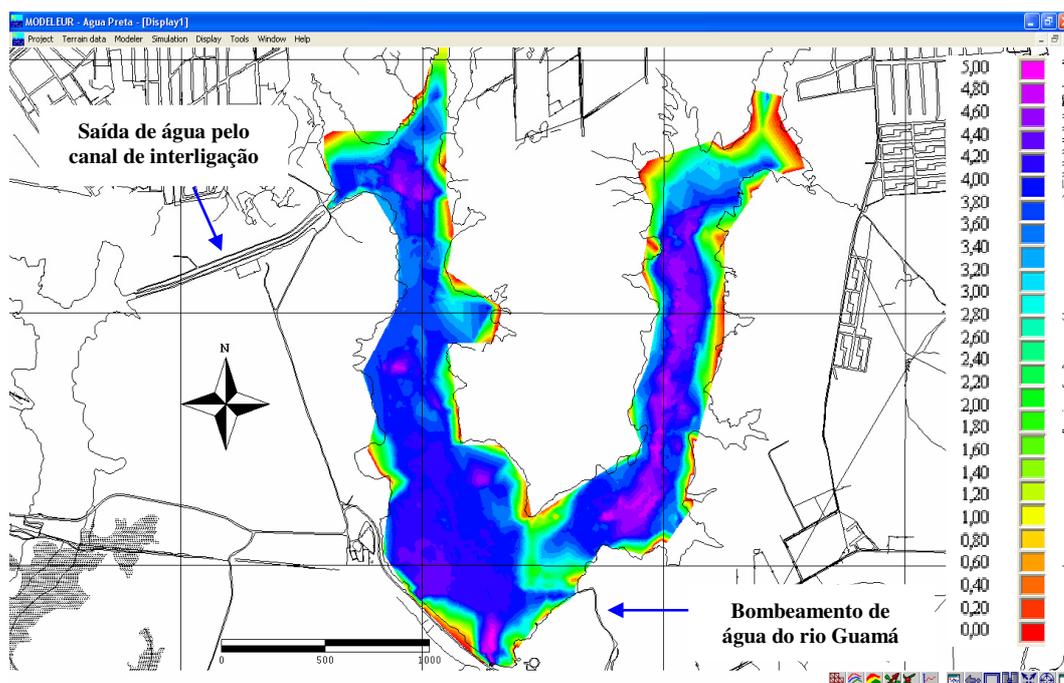


Figura 5.8 – Isosuperfícies de profundidade de 2009.

5.3. PERFIL DE VELOCIDADE

A Figura 5.9 demonstra o padrão de escoamento do lago Água Preta representado por isosuperfícies do módulo da velocidade. O resultado da simulação foi obtido a partir dos dados de topografia de 2009, nível d'água (8,9 m) e vazão ($6,0 \text{ m}^3/\text{s}$), que compõem as condições de contorno atribuídas ao modelo. Analisando-se a Figura 5.9, observa-se a pequena dinâmica do escoamento no lago, a qual era de se esperar, pois em lagos não há o escoamento natural observado em rios devido as diferenças topográficas entre as cabeceiras e a foz. A exceção faz-se as proximidades da adução de água do Guamá e na saída de água pelo canal de interligação dos lagos (Figura 5.10), onde surgem gradientes de velocidade importantes provocados pela mudança de seção do escoamento. Excetuando esses importantes gradientes, observa-se um sutil escoamento entre as fronteiras líquidas do domínio, ou seja, entre a adução do Rio Guamá e o canal de interligação.

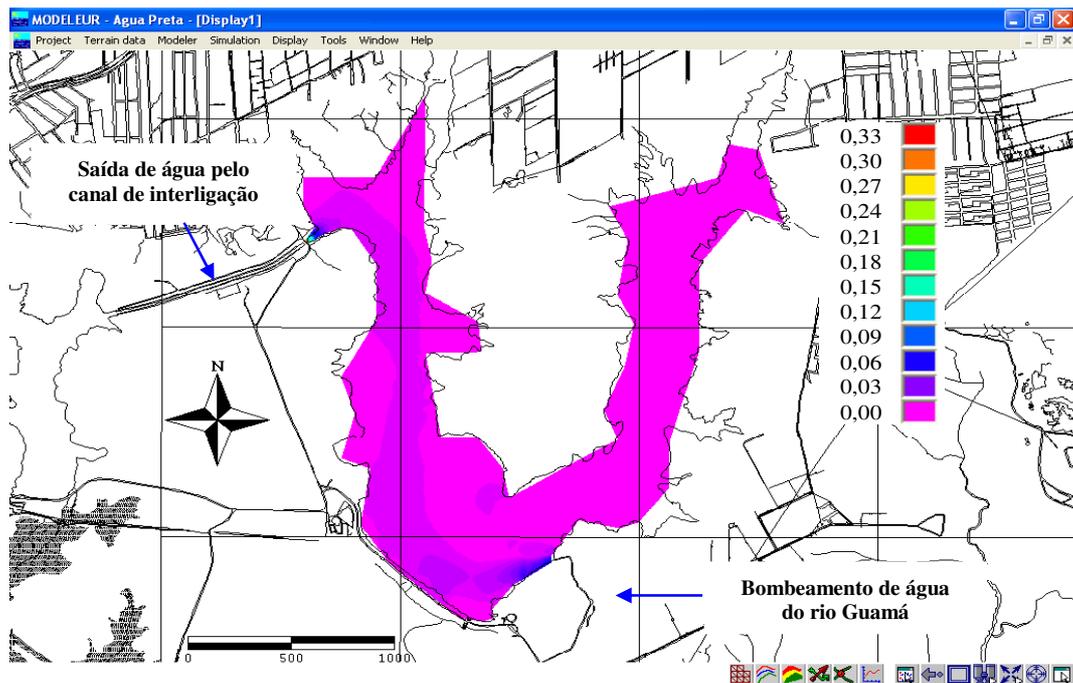


Figura 5.9 – Padrão de escoamento do lago Água Preta.

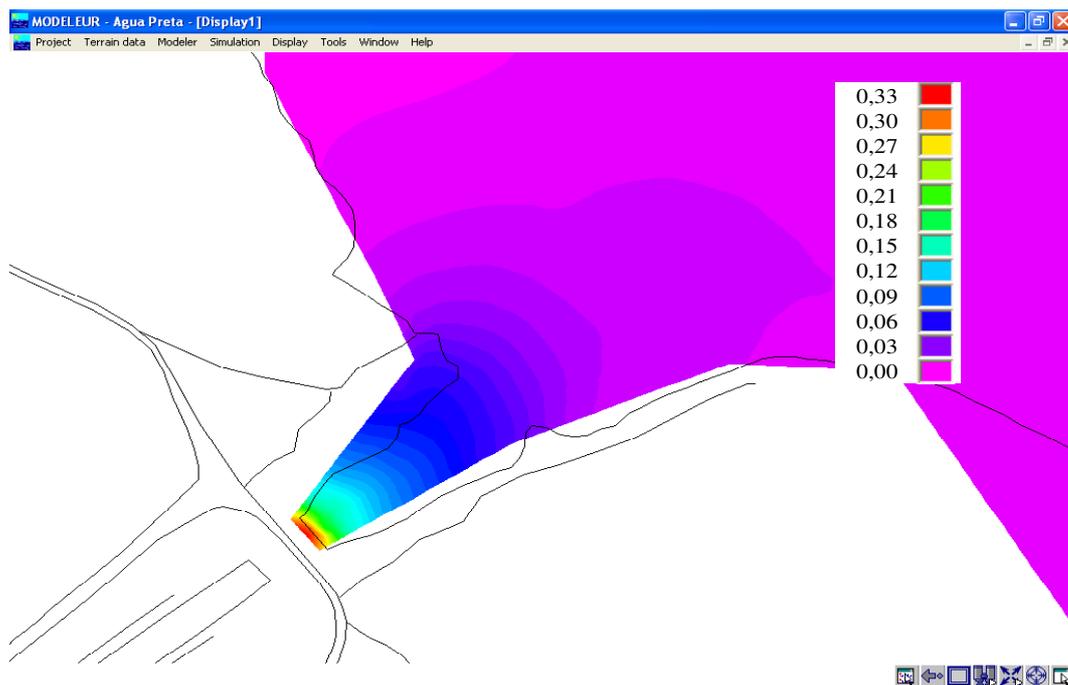


Figura 5.10 – Perfil de velocidade do lago Água Preta.

Conforme a Figura 5.10, a velocidade máxima simulada é de 0,33 m/s e ocorre na saída de água através do canal de interligação, enquanto que na maior parte do lago as velocidades guardam características de reservatórios com velocidades próximas a 0 (zero).

As direções preferenciais do escoamento podem ser observadas através da Figura 5.11, que mostra os vetores velocidades. Neste caso, os comprimentos dos vetores não são proporcionais as magnitudes das velocidades.

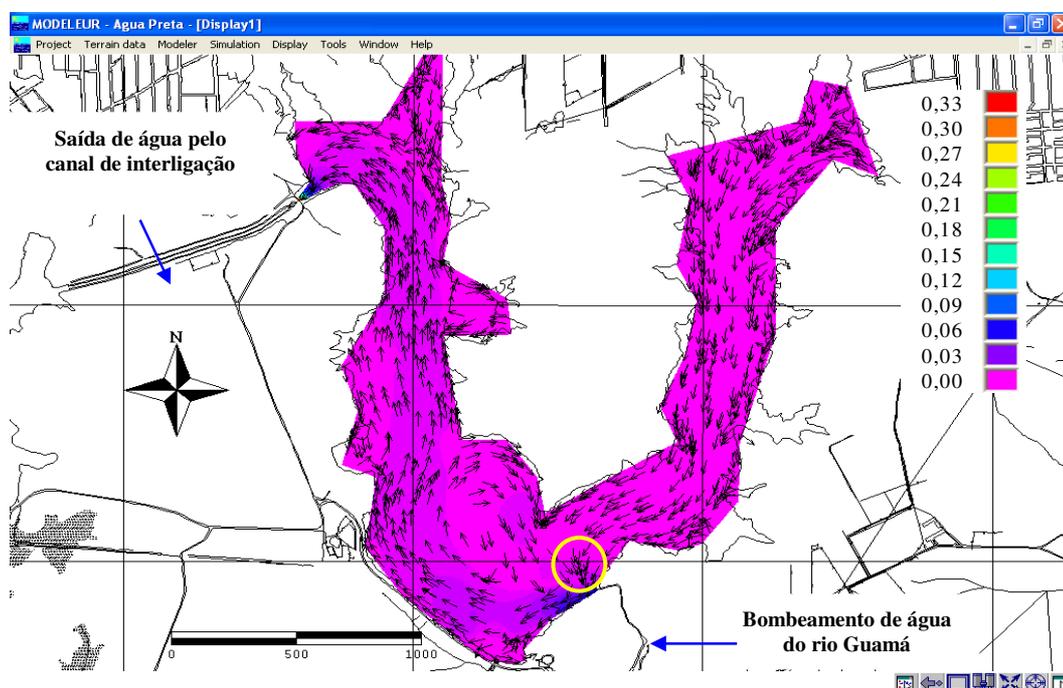


Figura 5.11 – Vetores velocidade do escoamento do lago Água Preta.

Analisando-se a Figura 5.11, observa-se próximo da adução (área circundada em amarelo) um desvio do escoamento devido a uma região de menores profundidades, como se pode observar na Figura 5.8. Nota-se também, uma zona de recirculação na porção central do lago. No mais, o escoamento segue a sutil correnteza analisada e apresentada na Figura 5.9, seguindo as cotas altimétricas mais baixas apresentadas na Figura 5.4, pelo menos após a chegada de água pela adução. E depois, ao longo do braço noroeste do lago, pela energia, da qual é dotado o escoamento, devido ao bombeamento das águas do rio Guamá.

5.4. ESTUDO MORFOLÓGICO DO LAGO ÁGUA PRETA

Os METs de 2009 e 1975 foram utilizados para se calcular a diferença entre os relevos subaquáticos do lago Água Preta. Tal diferença foi calculada através da calculadora do *Modeleur*. Assim, constatou-se um assoreamento do lago Água Preta, já que as diferenças entre os METs de 2009 e 1975 são positivas ou nulas (Figura 5.13). O assoreamento é explicado pelo carreamento de sedimentos através das vertentes da bacia do lago, e principalmente pelas águas proveniente do rio Guamá, as quais são ricas em sedimentos.

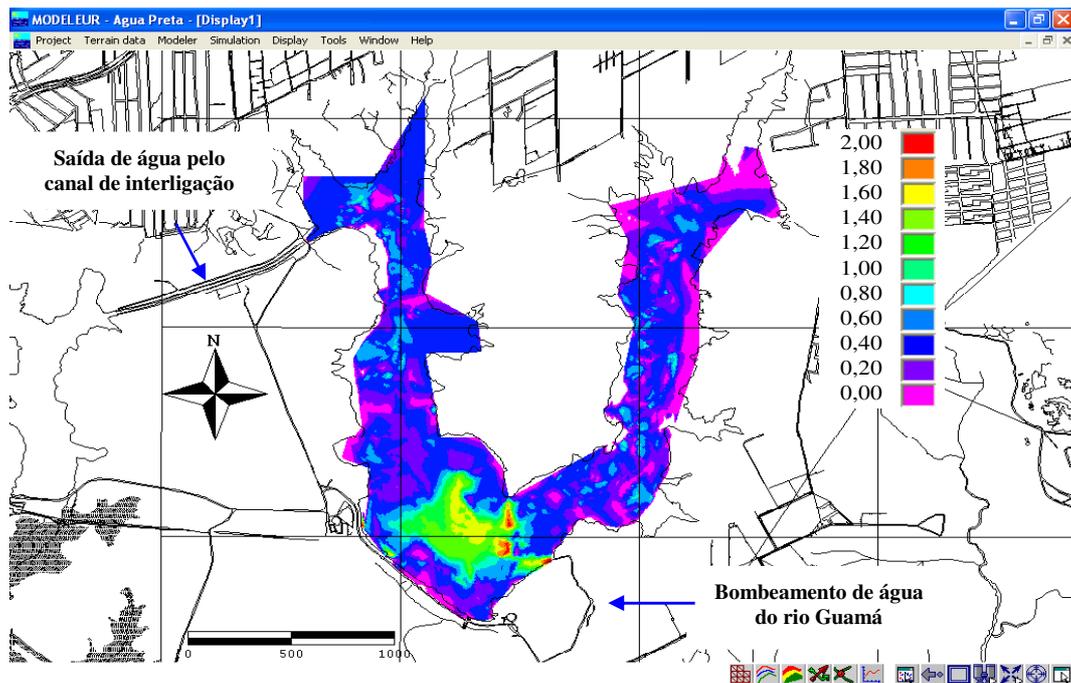


Figura 5.12- Isosuperfícies da diferença do relevo subaquático entre 2009 e 1975.

Analisando-se a Figura 5.13, observa-se um assoreamento importante na região central do lago Água Preta, o qual pode ser explicado pela recirculação do escoamento na mesma região (Figura 5.11). Outro assoreamento importante dá-se na chegada de água do rio Guamá, o qual pode ser explicado pela a expansão do escoamento e consequentemente a diminuição das velocidades, ocasionando a sedimentação de partículas mais pesadas que aquelas do assoreamento da região central. Sendo que, a hipótese de partículas mais pesadas ou não, só pode ser respondida por análises sedimentológicas.

O estudo morfológico revela também que o assoreamento máximo no lago, durante os 34 anos que separam as duas batimetrias, chega a 2m, o qual é ilustrado pela Figura 5.13, sendo esta um “zoom in” da Figura 5.14. Tal assoreamento já tinha sido apontado de forma qualitativa na Figura 5.6 e por SODRÉ (2007).

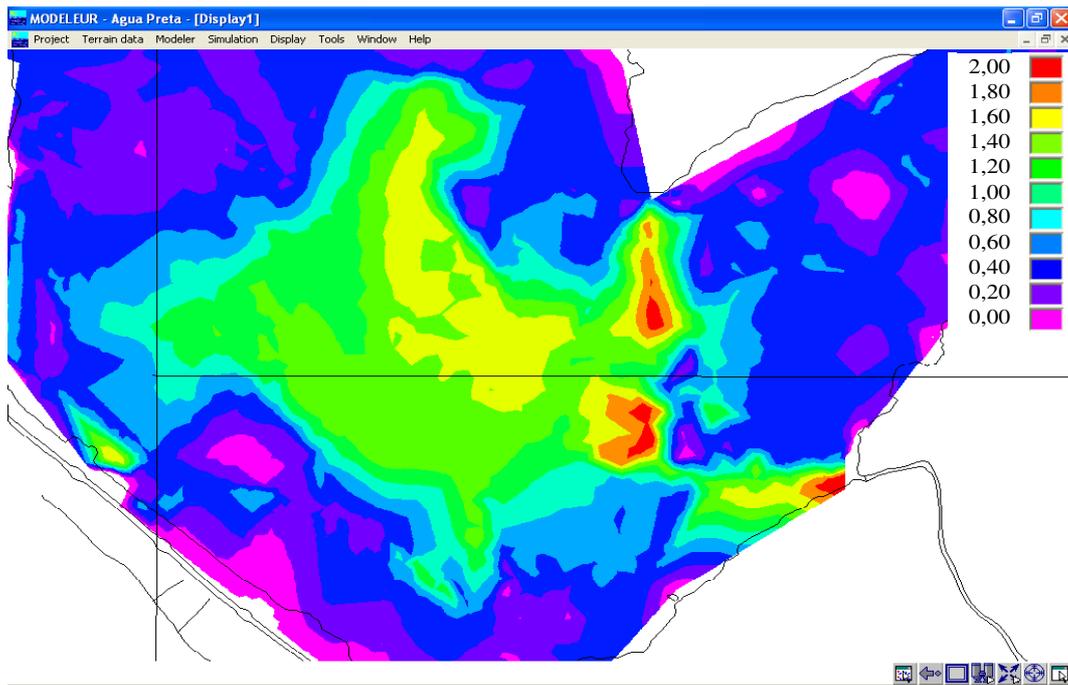


Figura 5.13 – Isosuperfícies da diferença do relevo subaquático (zoom in) .

A partir da altura de sedimentação máxima, $HS_{máx} = 2 \text{ m}$, pôde-se calcular a taxa de sedimentação máxima Equação (10) do lago Água Preta

$$\Delta S_{máx} = \frac{HS_{máx}}{\Delta t} \quad (10)$$

Onde, $\Delta S_{máx}$ (m/ano) é a taxa de sedimentação máxima, $HS_{máx}$ (m) é a altura máxima de sedimentação e Δt é o intervalo de tempo (anos). Utilizando-se os valores de $HS_{máx}$ e Δt (34 anos) na Equação (10), obteve-se um valor para a taxa de sedimentação máxima igual a 0,06 m/ano ou 6 cm/ano.

Além da taxa de sedimentação máxima, pode-se estimar a taxa de sedimentação média $\overline{\Delta S}$ (m), bem como o tempo de assoreamento do lago Água Preta para condições de bombeamento d'água e sedimentação constantes. Para isso, primeiramente, foi necessário calcular o valor médio das diferenças das cotas altimétricas ($\overline{\Delta h}$) entre os METs de 2009 e 1975, dado pelo quociente da integral da diferença de volume de topografia $\int dif$ - Equação (11) e área do lago.

$$\overline{\Delta h} = \frac{\int dif}{\text{área}} \quad (11)$$

Onde, $\int dif$ - é a integral da diferença do campo escalar de topografia entre 2009 e 1975; área (m²) – área do lago; $\overline{\Delta h}$ (m)- é o valor médio de diferença de topografia por unidade de área.

A Figura 5.15 apresenta o cálculo de determinação da integral da diferença do campo escalar de topografia entre 2009 e 1975. Nesse caso, o valor da $\int dif$ foi igual a 896.973 m^3 .

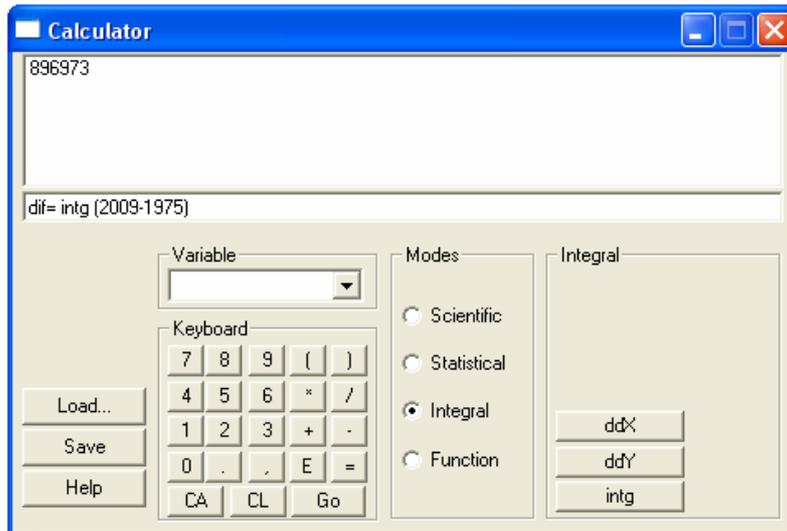


Figura 5.14 – Cálculo da integral da diferença do campo escalar de topografia entre 2009 e 1975

Neste caso, precisa-se calcular também, a área do lago, a qual foi considerada como sendo a área do lago em 2009. Tal cálculo foi efetuado via calculadora do *Modeleur*, que demanda a determinação de um campo escalar unitário sobre a malha hidrodinâmica a ser analisada, para posterior integração. A Figura 5.16 apresenta a operação de determinação do campo unitário na plataforma da calculadora do *Modeleur*.

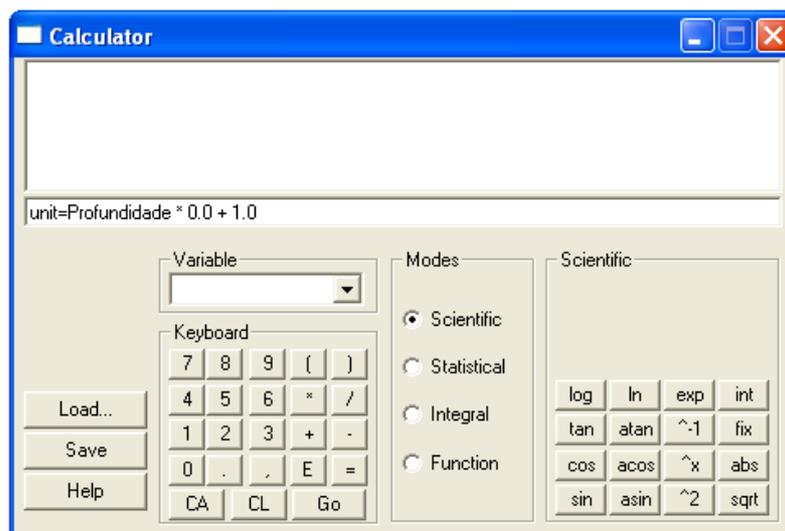


Figura 5.15 - Campo escalar unitário.

Na Figura 5.16 observa-se que, ao se operar um campo escalar pode-se multiplicá-lo por zero e somá-lo a unidade, sendo que o resultado unitário é um campo escalar sobre a malha que

suportava o campo escalar profundidade, ou seja, a operação apresenta pela Figura 5.16, transferiu os atributos de um campo escalar, gerando um outro campo escalar, mas nesse caso unitário.

A Figura 5.17 mostra o cálculo da área através da integral do campo escalar unitário via calculadora do *Modeleur*, resultando em uma área de 3.409.546 m².

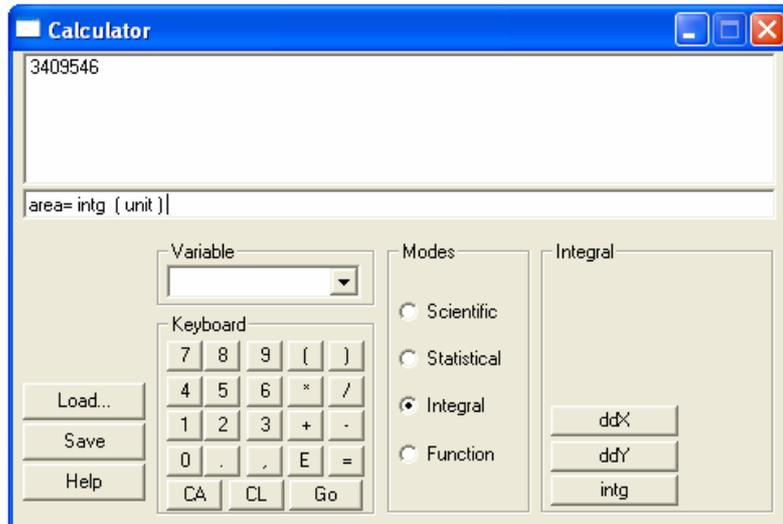


Figura 5.16 - Cálculo da área através da integral do campo escalar unitário.

Substituindo os valores, $\int dif$ e da área, na Equação (11) tem-se o $\overline{\Delta h}$.

$$\overline{\Delta h} = \frac{\int dif}{3.409.546} = 0,26 \text{ m}$$

O $\overline{\Delta h}$ foi calculado através da integração da diferença do campo escalar de topografia, dividido pela área, com a utilização da ferramenta Calculadora do *Modeleur*, conforme Figura 5.18.

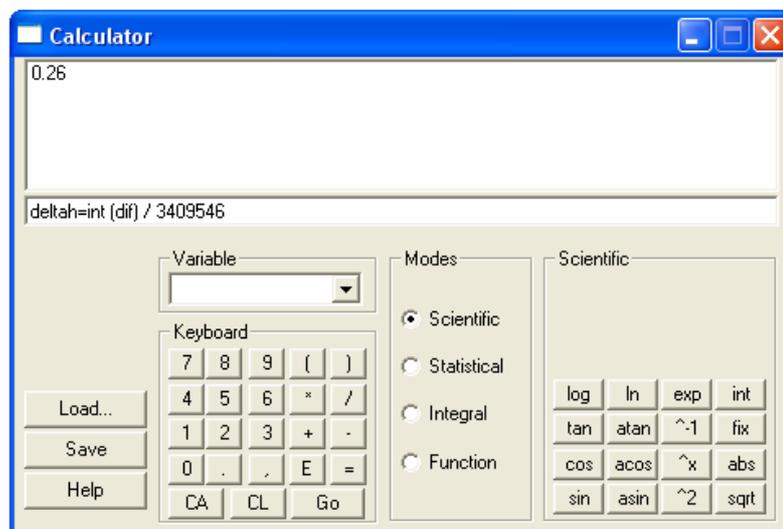


Figura 5.17 - Cálculo do $\overline{\Delta h}$ utilizando a calculadora do *Modeleur*.

Definido o $\overline{\Delta h}$, calculou-se a taxa média de sedimentação $\overline{\Delta S}$ (m/ano), como mostra a Equação (12).

$$\overline{\Delta S} = \frac{\overline{\Delta h}}{\Delta t} \quad (12)$$

Substituindo os valores de $\overline{\Delta h}$ e Δt na Equação (12) tem-se o $\overline{\Delta S}$.

$$\overline{\Delta S} = \frac{0,26}{34} = 0,008m / ano$$

O $\overline{\Delta S}$, é a taxa média de sedimentação anual, a qual, foi resolvida na calculadora do *Modeleur*, como mostra a Figura 5.19.

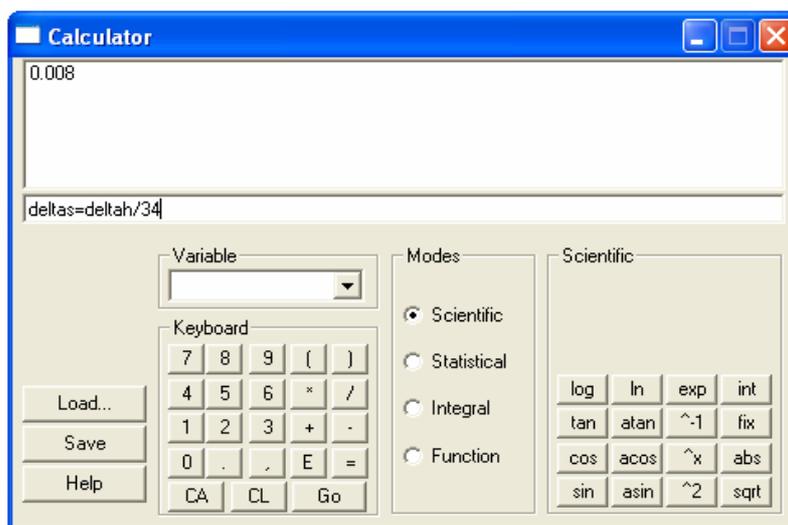


Figura 5.18 - Calculo da taxa de deposição média.

Portanto, a taxa de deposição média de sedimentos no lago Água Preta é de 0,008 m/ano ou 8 mm/ano.

O tempo de assoreamento do lago foi estimado a partir da profundidade média de 2009. Como mostra a Equação (13).

$$\overline{P} = \frac{\int (P_{2009})}{\text{área}} \quad (13)$$

Onde:

$\int (P_{2009})$ é a integral do campo escalar de profundidade de 2009; área- área do lago (m²);

\overline{P} - profundidade média (m);

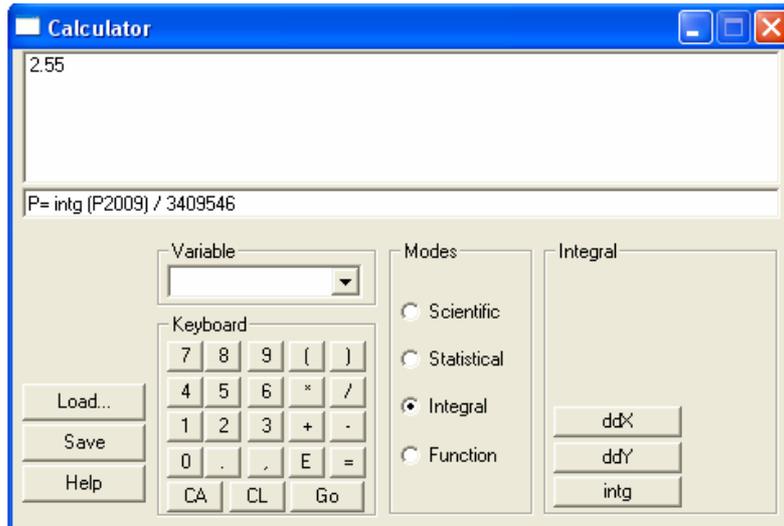


Figura 5.19 – Cálculo da profundidade média de 2009.

A Figura 5.20 mostra o cálculo da profundidade média de 2009, utilizando a calculadora do *Modeleur*.

Substituindo os valores de $\int (P2009)$ e área na (Equação 13) tem-se a \bar{P} .

$$\bar{P} = \frac{\int (P2009)}{3.409.546} = 2,55 \text{ m}$$

A partir da profundidade média, pôde-se calcular o tempo de assoreamento do lago Água Preta, como mostra a Equação (14). Neste estudo considerou-se uma vazão constante de 6,0 m³/s, um nível d'água de 8,90 m e também um consumo de água constante.

$$T_{al} = \frac{\bar{P}}{\bar{\Delta}_s} \quad (14)$$

Onde: \bar{P} - profundidade média (m); $\bar{\Delta}_s$ - é a taxa média de sedimentação anual (m/ano); T_{al} - é o tempo de assoreamento do lago (ano);

Substituindo os valores de \bar{P} e $\bar{\Delta}_s$ na Equação (14) tem-se que o tempo de assoreamento do lago Água Preta a partir de 2009, é de aproximadamente 318 anos.

$$T_{al} = \frac{2,55}{0,008} = 318 \text{ anos}$$

Outro valor importante no estudo morfológico é o volume do lago, o qual é calculado através da integral do campo escalar de profundidade de 2009 sobre a mesma malha e neste caso é igual a 8.683.962 m³. Isto é mostrado na Figura 5.21.

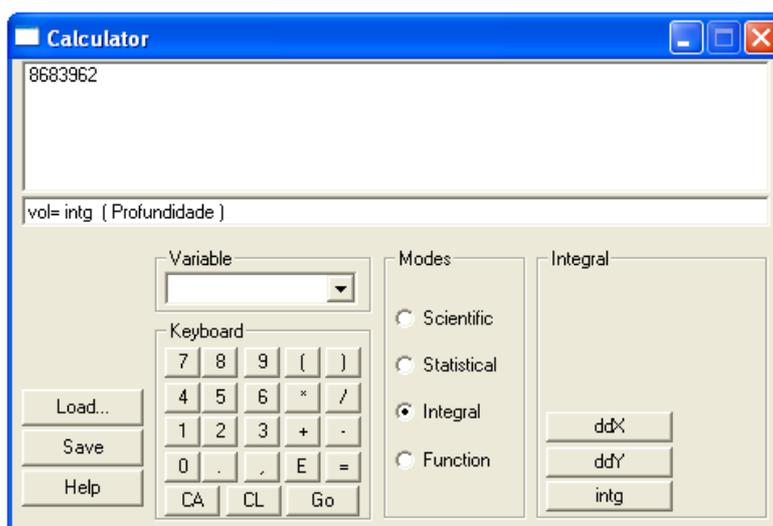


Figura 5.20 - Volume calculado através da Calculadora *Modeleur*.

O volume do lago calculado anteriormente, demonstra uma boa concordância com o valor apresentado por Sodré (2007), que foi de $8.847.061 \text{ m}^3$ para 2006. Além do volume do lago Água Preta de 2009, foi determinado também, o volume do lago em 1975, visando estabelecer a diminuição da capacidade do reservatório. Assim, assumindo-se para 1975 um N.A. máximo de 8,9 m, foi calculado, sobre a malha de elementos finitos, um volume de $9.580.935 \text{ m}^3$. Assim, observou-se uma diminuição de 896.973 m^3 ou 9,36 % no volume do lago Água Preta entre os anos de 1975 e 2009, confirmando o assoreamento do lago demonstrado pela Figura 5.14. Vale ressaltar, que não foi possível realizar uma validação do volume de 1975, pois não há na literatura, pelo menos na pesquisada, dados disponíveis.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E PESQUISAS FUTURAS

6.1. CONCLUSÕES

A água é um recurso natural insubstituível, pois constitui elemento imprescindível para o desenvolvimento de todas as formas de vida do planeta. Para a sociedade, a água está diretamente associada à saúde e ao conforto das populações. O uso irracional e a poluição de fontes importantes tais como rios e lagos, podem ocasionar a falta de água em breve.

No contexto amazônico, faz-se necessário desenvolver estudos que englobem todos os parâmetros envolvidos com a deterioração de rios e lagos, o que motiva a modelagem hidrodinâmica e o estudo morfológico do lago Água Preta, incentivando a gestão dos recursos hídricos deste manancial de abastecimento de Belém.

No que diz respeito à metodologia para a realização deste estudo, foi tomado como ponto de partida, o levantamento dos dados topobatimétricos de 1975 e 2009, o estudo da rugosidade do lago, a determinação das condições de contorno e a construção da malha hidrodinâmica, que serve de base a todos os resultados obtidos.

Comparando os modelos de elevação de terreno brutos de 1975 e 2009, com os interpolados na malha hidrodinâmica, constatou-se que os modelos interpolados representam bem os terrenos de 1975 e 2009.

O primeiro resultado de simulação hidrodinâmica diz respeito às profundidades encontradas no lago nos anos de 1975 e 2009. Em 1975, o modelo demonstrou que a profundidade máxima do lago era de 5,60 m. Enquanto que em 2009, o valor encontrado foi igual a 5,0 m. Isto demonstra um assoreamento do lago.

A simulação do padrão do escoamento do lago Água Preta revela uma sutil correnteza entre as fronteiras líquidas do modelo, ou seja, adução do rio Guamá e saída de água pelo canal de interligação dos lagos Água Preta e Bolonha. As velocidades variam entre 0,00 e 0,33 m/s entre a adução do rio Guamá e a saída pelo canal de interligação, enquanto que na maior parte do lago a velocidade é próxima a zero. A velocidade máxima foi de 0,33 m/s na entrada do canal de interligação, explicada pela mudança de seção, a qual passa de uma maior área para uma menor, explicando assim o perfil de velocidade encontrado nessa região.

No estudo morfológico, identificou-se que de 1975 até 2009, ocorreu uma taxa de sedimentação máxima anual de 0,06 m/ano ou 6 cm/ano, referente a região assoreada próxima a chegada de água do rio Guamá. Já para todo o lago Água Preta, determinou-se uma taxa de sedimentação média anual de 0,008 m/ano ou 8 mm/ano. Através desse resultado, pôde-se calcular

o tempo de assoreamento do lago Água Preta, a partir de 2009, o qual é de aproximadamente 318 anos, mantendo-se a mesma taxa de sedimentação, consumo e bombeamento de água.

A modelagem hidrodinâmica e o estudo morfológico apresentados no presente trabalho, podem ser usados, em primeiro plano, como ferramentas de engenharia hidráulica, subsidiando, assim, a gestão dos recursos hídricos do lago Água Preta.

6.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- ❖ Elaborar e calibrar um modelo de dispersão de poluentes para o lago Água Preta, já que a ocupação desordenada das cabeceiras ameaça a qualidade das águas do lago. O controle da qualidade da água, passa pela minimização da poluição do lago, sendo que o modelo de dispersão de poluentes é imprescindível para a análise global de conservação do lago e de suas águas.
- ❖ Novas campanhas batimétricas com frequências a serem determinadas, visando à atualização do modelo do lago. Tais atualizações e respectivas simulações hidrodinâmicas e do MET, poderão estabelecer tendências do sistema hídrico analisado, servindo para uma melhor gestão do lago Água Preta.

REFERÊNCIAS

Águas de Nova Friburgo. Disponível em: <http://www.aguasdenovafriburgo.com.br/>. Acesso em: 24 de Set. de 2009.

ARAÚJO, A.M., MELO, M.C. **Efeitos do Local e da Batimetria na Validação das Marés na Circulação (2 D-H): Caso do Estuário do Recife/Pe-Brasil**, 1999. Disponível em: <http://www.ufpe.br/gmfa/silusba.pdf>. Acesso em: 05 de Dez. de 2009

BARROS, M.L.C. **Modelagem Hidrodinâmica do Igarapé Tucunduba**, 2003. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária) - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

BARROS, M.L.C. **Calibração de um Modelo Hidrodinâmico da Baía do Guajará**, 2005. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.

BARROS, M. L. C., SENA, M. J. S., AMARANTE MESQUITA, A. L. **Estudo Computacional do Comportamento Hidrodinâmico: Caso da Baía do Guajará**. In: ANAIS OF XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20-24 nov., João Pessoa, 2005. 1 CD-ROM.

BLANCO, C. J. C; MESQUITA, A. L. A. ; SENA, M. J. S. ; SECRETAN, Y. . Applications of a 2D shallow water model to analyze the flow and the use of groins to protect an area of the Amazon river estuary. *Revista Ambiente & Água*, v. 4, p. 10-20, 2009.

BRAGA, A.C.M e CRUZ, E.S.B. **Modelagem Hidrodinâmica do Rio Guamá nas Imedições da Universidade Federal do Pará**. 2006. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária) - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

DIAS, S. F. et al. (coord.). **Estudo ambiental no Utinga: vida útil do sistema de abastecimento d'água de Belém**. Belém. Instituto do Desenvolvimento Econômico-Social do Pará, 1991.

FERNANDES, L. L. **A sustentabilidade do sistema de abastecimento de água potável em Belém.** 2005. 250 f. Tese. (Doutorado em Desenvolvimento Sócio-ambiental) Núcleo de Altos Estudos Amazônicos – NAEA, Universidade Federal do Pará – UFPA, 2005.

FERRARIN, C.; UMGIESSER, G.; CUCCO, A.; HSU, T.; ROLAND, A.; AMOS, C.L. *Development and validation of a finite element morphological model for shallow water basins, Coastal Engineering*, v. 55, p. 716–731.

FOX, R.W e MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** 3ª Ed. Guanabara S.A. Rio de Janeiro, 1988.

GOBBI, E. F.; RECKSIDLER, R.; GONCALVES, J. E.; GOBBI, M. F. **Implementação de um Modelo Hidrodinâmico e de Qualidade de Água no Reservatório do Irai.** In: Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003, Curitiba. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003.

GRE-EHN. **Grupo de Pesquisa e Estudos em Eco-hidráulica Numérica.** 2009 Disponível em: <http://www.gre-ehn.inrs-ete.quebec.ca/>. Acesso em: 17 mar. 2009.

HENICHE, M. A, SECRETAN, Y., BOUDREAU, P., LECLERC, M. (2000). **A two-dimensional finite element dryingwettingshallow water model for rivers and estuaries. Advances in Water Resources.** v. 23, p. 359-372.

JI, Y.; ZHANG, J.; YAO, Q.; ZHAO, D. (2007) *Analysis of water quality in shallow lakes with a two-dimensional flow-sediment model. Journal of Hydrodynamics*, ser. B, v.19, n. 4, p. 501-508.

LIMA, N. **Modelagem Hidrodinâmica e Análise Morfológica do lago Bolonha: um dos mananciais da grande Belém.** 2008. 90 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

LIMA, N. S.; BLANCO, C. J. C.; HOLANDA, P. S.; LOPES, D. F.; BARP, A. R. B.; SECRETAN, Y. Hydrodynamic Modeling and Morphologic Analysis of Lake Bolonha: one of the water sources of Belém, 2009. Artigo submetido à RESA- Revista Sanitária Ambiental.

MACHADO, M.B., FURLAN, L.T., FURLAN, M.T., TOMAZ, E., NUNHEZ, J.R. Software para modelagem de dispersão de efluentes em rios. **Artigo Técnico**. v.13,p.291-297,2008.

MAGALHÃES, L. P. C. **Modelo Integrado para Simulação de Sistemas Hídricos**. 2005. 122 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MARTINS, R. P. et al. *Hydrodynamic Numerical Modeling of Guanabara Bay, Rio de Janeiro Brasil* – a Preliminary calibration, Portugal, p. 329-335, 2002.

MATNI, A. dos S. **Análise biológica do Aguapé (Eichhornia crassipes Mart.), uma espécie bioindicadora de poluição presente nos lagos Bolonha e Água Preta do Parque ambiental de Belém/PA**. 2003. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária). Centro Tecnológico - Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

PAZ, A. R. **Análise dos principais fatores intervenientes no comportamento hidrodinâmico do Banhado do Taim (RS)**. 2003. 176 f. Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

PMB - PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM. **Legislação do município de Belém: limite Belém- Ananindeua**. CODEM. Belém, 2001.

RAJAR, R.; CETINA, M.; SIRCA, A. (1997) *Hydrodynamic and water quality modelling: case studies, Ecological Modelling*, v. 101, p. 209-228.

RIBEIRO, H. M. C. **Avaliação atual da qualidade das águas dos lagos Bolonha e Água Preta, situados na área fisiográfica do Utinga (Belém-Pa)**. 1992. 204 f. Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 1992.

RIGO, D. **Análise do Escoamento em Regiões Estuarinas com Manguezais - Medições e Modelagem na Baía de Vitória, ES**. 2004. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

ROCHA, C. B. M. **Implementação e uso do modelo Mike 21 na análise de cenários hidrodinâmicos na lagoa da Conceição, SC.** 2004. 93 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental Universidade de Santa Catarina UFSC, 2007.

RODI, W. (1993) *Turbulence models and their application in hydraulics: a state of the art review*. 3. ed. Balkema. Taylor & Francis, 104p.

ROSMAN, P.C.C., 2001, “Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental”. In: ROSMAN.P.C.C., MASCARENHAS, F.C.B., MIGUEZ, M.G. et al., Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5,1 ed., capítulo 1, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

ROSMAN, P. C. C. Caracterização da Circulação Hidrodinâmica Bidimensional da Baía de Sepetiba. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos HídricosV Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 2001, Aracaju - SE. XIV Simpósio Brasileiro de Recursos HídricosV Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 2001. v. 1

ROSMAN, P. C. C., ROSMAN, P. A., LIMA, L. S., PAULA, T. P. Estudos de hidrodinâmica para ligação da lagoa Rodrigo de Freitas ao mar via dutos afogados RJ. Relatório técnico PENO-11113. Programa COPPE- Engenharia Oceânica - Área Costeira & Oceanográfica. Disponível em: <http://www.lagoalimpa.com.br/.../projeto-niveis_batimetria_dragagens.pdf. Acesso em: 11 de maio de 2009.

SALDANHA, J.C.S. **Análise da Influência do rio Santa Maria da Vitória na baía de Vitória, através da modelagem computacional: uma contribuição ao processo de enquadramento.** 2007.137f.Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 2007.

SECRETAN, Y. and LECLERC, M. Modeleur: a 2D hydrodynamic GIS and simulation software. **In hydroinformatics-98**, Copenhagen, 1998, pp. 1-18.

SECRETAN, Y., ROY, Y. *et al.* **Modeleur: User's Guide 1.0a07.** 2000 - INRS-Eau, Québec, 2000.

SECRETAN, Y. et al. Une Méthodologie de Modélisation Numérique de Terrain pour la simulation Hydrodinâmique Bidimensionnelle. **Rev. Science. Eau**, p. 187-212, fév.2001.

SECRETAN, Y. **Modelagem Hidrodinâmica Ambiental. Canadá:** [s.n], 2001. Notas de aula.

SECTAM - SECRETÁRIA EXECUTIVA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE.
Parque Estadual do Utinga – Estudo Ambiental. Relatório Técnico SOF-REL-018/92, 1992.

SEMA – SECRETÁRIA DO ESTADO DE MEIO AMBIENTE. Disponível em:
<<http://www.sema.pa.gov.br>. Acesso em: 07 de jul de 2009.

SENA, M. J. S., BLANCO, C. J. C., MESQUITA, A. L .A., SECRETAN,Y. **A nova Orla da Cidade de Belém:** simulação computacional dos impactos ambientais. In : Semana Paraense de Informática- SEPAI 2006, Belém.

SODRÉ, S.S.V. **Hidroquímica dos Lagos Bolonha e Água Preta, Mananciais de Belém - Pará.** 2007. 114 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emilio Goeldi e Embrapa Amazônia Oriental, Belém, 2007.

TUCCI, C., E., M. et al. (organizador). **Hidrologia: Ciência e Aplicação** 2.ed. Porto Alegre : Editora da Universidade: ABRH, 2000.

VARGAS, B. M.; FREIRE, P. C. C.; ACCETTA, D.; UHRENHOLDT, T.; AMORIM, J. C. C. Estudos de Circulação d'Água e de Dispersão de Poluentes no Complexo Lagunar Sul de Santa Catarina. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001, Aracaju - SE. XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre - RS: ABRH, 2001.

ANEXOS

**ANEXO 1 – MAPA DE CURVAS DE NÍVEIS DO ANO DE 1975 DO LAGO
ÁGUA PRETA**

**ANEXO 2 – ARTIGO PUBLICADO NO 20TH INTERNATIONAL
CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING – COBEM 2009:
HYDRODYNAMIC MODELING OF THE LAKE ÁGUA PRETA: WATER
SOURCE OF THE BELÉM METROPOLITAN AREA**