

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE  
TROPICAL

**ARGEMIRO MIDONÊS BASTOS**

***Modelagem de Escoamento Ambiental como Subsídio à  
Gestão de Ecossistemas Aquáticos no Baixo Igarapé da  
Fortaleza - AP***

**Macapá-AP  
2010**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



**ARGEMIRO MIDONÊS BASTOS**

***Modelagem de Escoamento Ambiental como Subsídio à  
Gestão de Ecossistemas Aquáticos no Baixo Igarapé da  
Fortaleza - AP***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Biodiversidade Tropical da Universidade Federal do Amapá - UNIFAP, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Biodiversidade Tropical.

Orientador Prof. Dr. Alan Cavalcanti da Cunha.

**Macapá-AP  
2010**

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

### Biblioteca Central da Universidade Federal do Amapá

Bastos, Argemiro Midonês

Modelagem de escoamento ambiental como subsídio à gestão de ecossistemas aquáticos no Baixo Igarapé da Fortaleza / Argemiro Midonês Bastos; orientador Alan Cavalcanti da Cunha. Macapá, 2010.

133 f.

Dissertação (mestrado) – Fundação Universidade Federal do Amapá, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical.

1. Ecossistemas Aquáticos. 2. Biodiversidade tropical.  
3. Hidrodinâmica – Rios. 4. Igarapé da Fortaleza – Amapá.  
I. Cunha, Alan Cavalcanti da, orient.. II. Fundação Universidade Federal do Amapá. III. Título.

## **ARGEMIRO MIDONÊS BASTOS**

### ***Modelagem de Escoamento Ambiental como Subsídio à Gestão de Ecossistemas Aquáticos no Baixo Igarapé da Fortaleza - AP***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Biodiversidade Tropical da Universidade Federal do Amapá - UNIFAP, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Biodiversidade Tropical.  
Orientador Prof. Dr. Alan Cavalcanti da Cunha.

**Data 05/03/2010**

---

Dr. Alan Cavalcanti da Cunha (Orientador) – Presidente  
UNIFAP-AP

---

Dr. Antonio Cesar Brasil Junior – Membro Titular  
UNB-DF

---

Dr. Luis Roberto Takiyama – Membro Titular  
IEPA-AP

---

Dr. Marcos Tavares Dias – Membro Titular  
EMBRAPA

**Macapá-AP  
2010**



**O tempo leva muitas coisas, mas há coisas que só o tempo traz; como família e amigos. A vocês, meus amigos, eu dedico este trabalho.**



## AGRADECIMENTOS

A Deus por estar sempre presente na minha vida.

Ao orientador Alan Cavalcanti da Cunha pelas conversas amigáveis e profissionais.

Ao professor Paulo César Colonna Rosman pela ajuda na implementação do modelo.

Aos professores do PPGBio pela troca de experiências.

À Cecília, companheira e amiga de todas as horas, pelo nosso caminhar juntos.

Aos meus pais pelo ensinamento de vida.

Aos amigos do Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis (NHMET), do Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA), pelo fornecimento dos dados climatológicos.

Aos amigos do IBGE – Macapá pelo fornecimento dos dados demográficos.

À Coordenação de Geoprocessamento da SEMA pelos arquivos em formato shape da bacia do igarapé da Fortaleza.

À Viviane Amanajás pelas contribuições com o arcgis.

Ao amigo Aramis pela ajuda no trabalho de campo.

À secretária do PPGBio, Rejane Peixoto, pelo apoio acadêmico.

À Idomar Sá Gonçalves pela ajuda administrativa.

Aos meus irmãos pelo incentivo, carinho e paciência.



“Quem nunca viu o Amazonas  
Nunca irá entender a vida de um povo  
De alma e cor brasileiras  
Suas conquistas ribeiras, seu ritmo novo”

Val Milhomem e Joãozinho Gomes



## RESUMO

Os ecossistemas aquáticos amazônicos são influenciados por diversos parâmetros abióticos, sendo os mais relevantes, em regiões estuarinas como a bacia do igarapé da Fortaleza-AP, a precipitação de chuvas (clima tropical), a dinâmica do escoamento superficial de rios e afluentes (hidrologia e efeitos de marés) e as conseqüentes degradações ambientais causadas pelo uso e ocupação inadequados da terra (urbanização). O objetivo da pesquisa foi aplicar o sistema de modelagem computacional SisBAHIA (hidrodinâmico e Lagrangeano de transporte advectivo-difusivo) para avaliar cenários ambientais e obter informações sobre o meio abiótico do referido ecossistema aquático. A região de estudo compreendeu uma extensão de rio com aproximadamente 14 km a partir da foz do rio, cujos trechos encontram-se urbanizados por estarem inseridos nos municípios de Macapá e Santana. Nesses locais ocorrem problemas ambientais decorrentes de lançamento direto de resíduos sanitários sem tratamento adequado, causando perturbações no ambiente aquático. O método de análise numérica fundamentou-se em informações batimétricas (SILVA et al., 2003) e de qualidade da água (CUNHA e COUTO, 2002; TAKIYAMA et al., 2003). Usou-se o modelo Lagrangeano para avaliar o tempo de escoamento de agentes passivos genéricos ao longo do igarapé. Sendo propostos dois cenários: natural (com valores de maré genérica e média da série histórica 1969 – 2008 para precipitação) e 2002 (com valores de maré datada e valores de precipitação medidos em 2002). Esses cenários consideraram os efeitos da sazonalidade climática (cheia, transição e estiagem, resultando na elaboração de seis diferentes cenários ambientais. Os ciclos de marés classificaram-se como de característica semidiurna. A análise numérica do comportamento hidrodinâmico do igarapé da Fortaleza sugeriu uma taxa de renovação das águas da ordem de 1 dia para a estação chuvosa e de 3,5 dias no período de estiagem, sendo influenciada tanto pela dinâmica do rio Amazonas quanto pelos índices de precipitação. Como conclusão, o estudo apresentou uma abordagem holística que favorece uma melhor compreensão sobre a dinâmica fluvial desse ecossistema aquático pressionado pela urbanização local. Os resultados podem ser úteis na construção de planos de gestão da bacia hidrográfica visando sua sustentabilidade e potencializando mecanismos legais e gerenciais concernentes à conservação da biodiversidade e dos ecossistemas aquáticos. A modelagem computacional apresentou-se também como uma ferramenta de investigação que auxilia à tomada de decisão e a sistemática de monitoramento, sugerindo alternativas mais adequadas à gestão dos ecossistemas aquáticos sob investigação.

Palavras-chave: Hidrodinâmica, Biodiversidade, Rio, Ecossistemas aquáticos, Estuário amazônico, Urbanização, Modelo, SisBAHIA, Igarapé da Fortaleza, Amapá.



## ABSTRACT

The Amazonian ecosystems are influenced by several abiotic parameters, the most significant in the estuarine areas such as the basin Fortaleza River -AP, the rain precipitation (tropical climate), the dynamics of runoff from rivers and tributaries (hydrology and tides's effects) and the resulting environmental degradation caused by inappropriate use and land occupation (urbanization). The aim was to apply computer modeling system SisBAHIA (hydrodynamic and advective-diffusive Lagrangian transport) to assess the environmental scenarios and information about the abiotic ecosystem environment. The study area comprised a stretch of river with about 14 km from the mouth of the river, whose areas are urbanized because they involved Macapá and Santana cities. At these sites occur environmental problems arising by direct discharge waste without adequate treatment, causing disruption in the aquatic environment. Numerical analysis method was based on bathymetric information (Silva et al., 2003) and water quality (Cunha and Couto, 2002; Takiyama et al., 2003). The Lagrangian model was used to evaluate the flow time of generic passive agents along the stream. It was proposed two scenarios: natural (with values of generic tide and average series from 1969 to 2008 for precipitation) and 2002 (with values of dated tide and values of precipitation measured at 2002). These scenarios considered the seasonal climate effects (flood, transition and drought), resulting in the development of six different environmental scenarios. The tidal cycles were classified as semidiurnal characteristic. Numerical analysis of the Fortaleza River's hydrodynamic behavior suggested a rate of water replacement about 1 day to the rainy season and 3.5 days in the dry season, and it is influenced both by the dynamics of the Amazon River as by the rates of precipitation. In conclusion, the study presented a holistic approach that promotes a better understanding of the dynamics river's ecosystem under pressure from the local urbanization. The results can be useful in the construction plans for river basin management aimed at sustainability and leveraging legal mechanisms and management concerning the conservation of biodiversity and ecosystems. The computer modeling presented also as a research tool that helps decision making and systematic monitoring, suggesting alternatives for the management on aquatic ecosystems under investigation.

**Key words:** Hydrodynamic, Biodiversity, River, Aquatic ecosystems, Amazon estuary, Urbanization, Modeling, SisBAHIA, Fortaleza River, Amapá.



## SUMÁRIO

RESUMO.....	xiii
ABSTRACT .....	xv
LISTA DE FIGURAS.....	19
LISTA DE TABELAS .....	23
LISTA DE QUADROS .....	25
LISTA DE GRÁFICOS.....	25
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	27
1. INTRODUÇÃO .....	29
2. REVISÃO DA LITERATURA .....	43
2.1. Biodiversidade.....	43
2.2. Legislação ambiental.....	56
2.3. Modelagem Ambiental.....	62
2.1.1. Modelos Hidrodinâmicos.....	64
2.1.2. Modelos de transporte Lagrangeano .....	67
3. ÁREA DE ESTUDO.....	71
3.1. Introdução .....	71
3.2. A Bacia Hidrográfica do Igarapé da Fortaleza.....	75
Localização.....	77
3.2.1. Características fisiográficas .....	77
Área e Perímetro .....	78
Forma da Bacia .....	79
Ordem dos cursos de água.....	80
Densidade de drenagem (Dd).....	80
Hipsometria.....	82
Unidades ecológicas.....	83
Clima e Precipitação .....	83
Hidrografia e Marés .....	85
3.2.2. Aspectos Biológicos.....	89
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	95
4.1. Introdução .....	95

4.2. Sobre modelo SisBAHIA .....	96
4.3. Etapas da implementação do modelo SisBAHIA.....	99
Geração da Malha Numérica .....	99
Interpolação da Batimetria .....	102
Condições Iniciais e de Contorno .....	103
Condições de contorno para o modelo hidrodinâmico .....	104
Condições de contorno para o modelo Lagrangeano .....	108
4.4. Cenários simulados.....	109
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	110
Elevação de marés .....	110
Campos de velocidade .....	114
Campos de concentração de contaminante.....	121
6. Conclusões e recomendações .....	131
REFERÊNCIAS .....	135
ANEXO .....	145

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização da bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza, com destaque para a malha urbana de Macapá e Santana.....	34
Figura 2.1 - Áreas de ressacas distribuídas no perímetro urbano dos municípios de Macapá e Santana até o ano de 2003. ....	51
Figura 3.1 – Regiões hidrográficas do Estado do Amapá .....	72
Figura 3.2 – Bacias Hidrográficas do Estado do Amapá. ....	73
Figura 3.3 - Trecho do curso d'água do igarapé da Fortaleza (AP), cuja extensão é de 27,3 km.....	76
Figura 3.4 - Ancoradouro do igarapé da Fortaleza com embarcações de variados portes. ....	77
Figura 3.5 - Mapa hipsométrico da bacia do igarapé da Fortaleza com cotas entre 3 a 15 m. ....	82
Figura 3.6 - Normais climatológica da precipitação e temperatura média do ar para Macapá entre 1969 e 1990.....	84
Figura 3.7 - Imagem de satélite, com a delimitação da Bacia do igarapé da Fortaleza,destacando o trecho do canal principal em amarelo, entre a Foz e o Gruta, obtida em julho de 2008. ....	91
Figura 4.1 - Imagem do Google Earth do Igarapé da Fortaleza no trecho entre a Foz e o Gruta, obtida em julho de 2008. ....	100
Figura 4.2 - Mapa base da área de estudo em coordenadas UTM, contendo domínio da modelagem, contorno de terra e contorno de água.....	100
Figura 4.3 - Destaque da malha com elementos quadrangulares, confeccionada no Argus One versão 4.2.0q.....	102
Figura 4.4 - Visualização de um trecho da malha de elementos finitos no SisBAHIA, contendo isolinhas de profundidade e contornos.....	103
Figura 5.1 – Campo de velocidades simulado pelo modelo hidrodinâmico para o cenário 2002 – cheia, com destaque para o trecho compreendido entre a Foz e a ponte, no instante $t = 120000s$ da simulação e $t = 0$ para análise, em condição de vazante.....	115
Figura 5.2 - Campo de velocidades simulado pelo modelo hidrodinâmico para o cenário 2002 – cheia, com destaque para o trecho compreendido entre a Foz e a ponte, no instante $t = 127200s$ da simulação e $t = 2 h$ para análise, em condição de vazante.....	115

Figura 5.3 - Campo de velocidades simulado pelo modelo hidrodinâmico para o cenário 2002 – cheia, com destaque para o trecho compreendido entre a Foz e a ponte, no instante $t = 134400s$ da simulação e $t = 4$ h para análise, em condição de vazante.....	116
Figura 5.4 - Campo de velocidades simulado pelo modelo hidrodinâmico para o cenário 2002 – cheia, com destaque para o trecho compreendido entre a Foz e a ponte, no instante $t = 141600s$ da simulação e $t = 6$ h para análise, em condição de enchete.....	116
Figura 5.5 - Campo de velocidades simulado pelo modelo hidrodinâmico para o cenário 2002 – cheia, com destaque para o trecho compreendido entre a Foz e a ponte, no instante $t = 148800s$ da simulação e $t = 8$ h para análise, em condição de enchete.....	117
Figura 5.6 - Campo de velocidades simulado pelo modelo hidrodinâmico para o cenário 2002 – cheia, com destaque para o trecho compreendido entre a Foz e a ponte, no instante $t = 156000s$ da simulação e $t = 10$ h para análise, em condição de vazante.....	117
Figura 5.7 - Campo de velocidades simulado pelo modelo hidrodinâmico para o cenário 2002 – cheia, com destaque para o trecho compreendido entre a Foz e a ponte, no instante $t = 163200s$ da simulação e $t = 12$ h para análise, em condição de vazante.....	118
Figura 5.8 - Campo de velocidades simulado pelo modelo hidrodinâmico para o cenário 2002 – cheia, com destaque para o trecho compreendido entre a Foz e a ponte, no instante $t = 170400s$ da simulação e $t = 14$ h para análise, em condição de vazante.....	118
Figura 5.9 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Provedor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 1 h de simulação. ....	122
Figura 5.10 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Provedor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 2 h de simulação. ....	122
Figura 5.11 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Provedor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 3 h de simulação. ....	123
Figura 5.12 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Provedor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 4 h de simulação. ....	123

Figura 5.13 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Provedor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 5 h de simulação. .....	124
Figura 5.14 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Provedor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 6 h de simulação. .....	124
Figura 5.15- Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Provedor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 7 h de simulação. .....	125
Figura 5.16 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Provedor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 8 h de simulação. .....	125
Figura 5.17- Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Provedor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 9 h de simulação. .....	126
Figura 5.18 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Provedor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 10 h de simulação. .....	126
Figura 5.19 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Provedor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 11 h de simulação. .....	127
Figura 5.20 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Provedor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 12 h de simulação. .....	127
Figura 5.21 – Estimativa do tempo de residência para o cenário 2002 cheia no canal do igarapé da Fortaleza. ....	129



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Evolução do número de residentes nas ressacas de Macapá e Santana no período de 2003 a 2007.....	52
Tabela 2.2 – Perfil dos municípios de Macapá e Santana quanto ao saneamento básico, no ano de 2007.....	54
Tabela 2.3 - Evolução dos principais indicadores de saneamento básico para o estado do Amapá no período de 1995 a 2007 .....	55
Tabela 3.1 – Ranking parcial das cidades avaliadas quanto ao saneamento básico no período de 2003 - 2007 .....	74
Tabela 3.2- Índices físicos da Bacia Hidrográfica do igarapé da Fortaleza.....	81
Tabela 3.3 - Extensões das áreas das unidades fito-ecológicas na bacia hidrográfica do igarapé Fortaleza.....	83
Tabela 3.4 – Constantes harmônicas obtidas a partir dos dados da Estação Maregráfica de Santana (AP) no período de 01/01/2009 a 04/03/2009.....	88
Tabela 4.1 – Valores de vazão nodal ( $m^3/s$ ) utilizados nas simulações dos modelos hidrodinâmicos para os cenários Natural e 2002 para os nós 1, 2 e 4 (Gruta) e 1536, 1537 e 1539 (Provedor).....	106
Tabela 4.2 – Valores de precipitação mensal de normal climatológica e ano de 2002 para Macapá. ....	106
Tabela 4.3 - Dados utilizados no cálculo da vazão total e nodal para os nós 1, 2 e 4 (Gruta) e 1536, 1537 e 1539 (igarapé Provedor). ....	107
Tabela 4.4 – Resumo das principais características dos experimentos numéricos simulados pelo SisBAHIA.....	107
Tabela 4.5 - Identificação das estações distribuídas ao longo do domínio da modelagem.....	108
Tabela 4.6 – Propriedades das fontes emissoras de contaminante inseridas no domínio da modelagem.....	109



## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 2.1 – Relação de softwares utilizados em sistemas de modelagem hidrodinâmica.....	65
Quadro 3.1- Estudos publicados sobre o igarapé da Fortaleza e/ou áreas de ressacas.....	92
Quadro 3.2 - Zoneamento Ecológico e Econômico na bacia do igarapé da Fortaleza. ....	93

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 5.1 - Variação do nível de maré no domínio computacional, forçado pelas componentes harmônicas do porto de Santana, para os cenários simulados.....	111
Gráfico 5.2- Comparação entre o tempo de maré enchente e vazante após simulação de 5 dias para marés genérica e datadas no ano 2002. ....	112
Gráfico 5.3 – comparação entre valores de elevação em diferentes cenários (a) Natural – cheia, (b) Natural – transição, (c) Natural – estiagem, (d) 2002 – cheia, (e) 2002 – transição e (e) 2002 - estiagem para as estações Foz e Gruta.....	114



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA	Área de Proteção Ambiental
CAESA	Companhia de Água e Esgoto do Amapá
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
GRUTA	Grêmio Recreativo Universitário do Estado do Amapá
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IEPA	Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá.
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima
MMA	Ministério do Meio Ambiente, Recursos Hídricos e da Amazônia Legal.
MEF	Método dos Elementos Finitos
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONGs	Organizações Não Governamentais.
PGRHEA	Política de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado do Amapá
SISBAHIA	Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental
SEMA	Secretaria Estadual de Meio Ambiente.
UNIFAP	Universidade Federal do Amapá.



## 1. INTRODUÇÃO

A principal contribuição desta pesquisa é proporcionar uma compreensão mais geral sobre o funcionamento da hidrodinâmica do igarapé da Fortaleza e sua potencial influência sobre os ecossistemas aquáticos (em especial à vida aquática superior, como os peixes) e a temas relacionados à dispersão de constituintes físicos, químicos e biológicos da água e sua relação com a saúde pública.

Em sua estrutura é apresentada a sistematização de informações chaves e importantes necessárias à avaliação mais holística desses ambientes referentes à bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza. Ao mesmo passo, estas informações tornam-se extremamente úteis e necessárias à regulamentação da Lei nº 0686/2002 (Política de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Amapá) e se apresenta como mais um arcabouço legal em defesa dos ecossistemas aquáticos. Ou seja, essas informações, futuramente, podem ser utilizadas como subsídios norteadores de implementação de projetos que considerem, além dos aspectos ecológicos locais, a eficiência econômica, a sustentabilidade, a proteção à biodiversidade aquática e a melhoria da qualidade de vida dos cidadãos residentes na bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza.

O interesse da pesquisa em relação à área da bacia do igarapé da Fortaleza resultou da observação da intensa ocupação urbana (Macapá e Santana), num ritmo considerado preocupante, além da sensível diminuição da qualidade da água no canal principal e seus afluentes mais expressivos (CUNHA et al., 2004). Além disso, o igarapé da Fortaleza, nos locais próximos das capitais municipais, está com a qualidade da água sendo alterada de forma acelerada quando comparado a outros corpos de água no estado do Amapá (CUNHA, 2000; CUNHA, 2001; CUNHA & COUTO, 2002; CUNHA et al. 2003; TAKIYAMA, 2003; CUNHA et al., 2004; BÁRBARA, 2006; BRITO, 2008).

A bacia do igarapé da Fortaleza contém as áreas urbanas de dois municípios mais populosos do Estado<sup>1</sup>, além de áreas consideradas ambientalmente importantes como: as áreas de ressacas as quais são ecologicamente tombadas pela Lei Nº 0455 de 22 de Julho de 1999 (Lei das ressacas) que dispõe sobre a delimitação e tombamento dessas áreas (BASTOS, 2006) e a Área de Proteção Ambiental da Fazendinha, criada pela Lei nº 0873, em 31 de dezembro de 2004 (DRUMMOND et al., 2008).

A APA da Fazendinha seria também um dos trechos do igarapé da Fortaleza beneficiado pelos resultados desta pesquisa, pois segundo Bocato Jr, (2009) a problemática enfrentada naquele local (próximo da foz do rio) é diversa. Por exemplo, devido esta APA estar situada em área urbana entre Macapá e Santana, torna-se um ativo natural frágil, sujeito a risco ambiental, principalmente causado pela ocupação desordenada do solo e a pressão imobiliária, lançamento de esgotos, funcionamento de um porto de pequeno porte (mas com fortes impactos locais) e um porto de grande porte (Santana). Este último apresenta um agravante maior, que são as águas potencialmente poluidoras proveniente dos lastros dos navios que nele ancoram e causam também vazamento de combustíveis. De acordo com Cunha (2008) e Bocato Jr (2009) o Programa Global de Gestão das Águas de Lastro no Brasil (Globallast) visa minimizar a transferência de organismos não nativos e indesejáveis que têm como vetor a água de lastro de navios. Mas para tomadas de decisões sobre como proceder, o que monitorar, quando promover ações cabíveis, tanto de prevenção quanto de combate à poluição é necessário conhecer o funcionamento dos processos físicos envolvidos na zona estuarina de impacto (análise de risco).

Historicamente, o primeiro estudo referente ao monitoramento permanente da qualidade d'água na bacia realizou-se com Cunha et al. (2003) e colaboradores, e compreendeu o período de setembro de 1999 até setembro de 2002, totalizando três anos consecutivos de investigação em seis pontos de coleta

---

<sup>1</sup> Segundo a contagem da população realizada pelo IBGE, a população urbana no município de Macapá é de 344 153 habitantes e de Santana 92 098 habitantes, destes 3 481 no distrito do Igarapé da Fortaleza. (IBGE, 2007)

(1 – Igarapé Volta, 2 – Igarapé Jussara, 3 – Igarapé Pau Mulato, 4 – Igarapé Provedor, 5 – Ponte e 6 – Foz). Constava em seus resultados a análise de 12 parâmetros (número mais provável de coliformes fecais (NMP/100 ml), turbidez (FTU), condutividade elétrica (CE), sólidos dissolvidos totais (SDT), sólidos em suspensão (SS), sólidos totais (ST), temperatura do ar e da água, oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e potencial hidrogeniônico (pH).

Ao estudo de Cunha et al. (2003) seguiu-se o de Takiyama et al. (2003), os quais realizaram coletas apenas no período de estiagem (dezembro de 2001 e janeiro de 2002) e no período de transição das chuvas (junho de 2002) em 12 pontos (1 - Ponte Igarapé da Fortaleza, 2 - Igarapé Fortaleza a montante do Igarapé Provedor, 3 - Igarapé Provedor, 4 - Balneário do Abel, 5 - Igarapé Fortaleza a montante do Igarapé Davi, 6 - Igarapé Davi, 7 - Igarapé Fortaleza a montante do Igarapé Arco, 8 - Igarapé Arco, 9 – Gruta, 10 – Congós e 11 - Lagoa dos Índios) também com análise dos mesmos parâmetros. O período de abrangência da pesquisa refere-se à coleta de dados de pesquisas anteriores desenvolvidas entre os anos de 1999 a 2003. Tais dados foram utilizados como parâmetro para uso de um sistema de modelagem ambiental destinado ao estudo do comportamento hidrodinâmico e dispersivo de agentes passivos na água do canal principal da bacia do Igarapé da Fortaleza.

Ao mesmo passo, as pesquisas desenvolvidas se limitaram em elaborar um primeiro diagnóstico sobre a qualidade da água da bacia hidrográfica. Mas, ao se observar na literatura da área, na mesma bacia hidrográfica, não foram encontrados quaisquer outras informações ou estudos sistemáticos que tivessem uma proposição de cenários ambientais futuros com base em incremento de parâmetros matemáticos ou físicos, como o aumento de densidade populacional e degradação ecológica nas áreas de ressacas.

A interrupção do processo de monitoramento da qualidade da água iniciado por Cunha (2002) e as dificuldades e limitações de apoio logístico de entidades como o IEPA e Companhia de Água e Esgoto do Amapá (CAESA), para

a realização de campanhas de monitoramento de longo prazo, limitaram a abrangência do estudo ao canal principal do igarapé da Fortaleza. Sendo essas situações também limitantes às análises atuais e que não permitiram a calibração do modelo numérico ora proposto.

Portanto, dadas as limitações em geral, a proposição de cenários considerou apenas algumas condições de iniciais e de contorno com base nos dados obtidos dos monitoramentos anteriores de Cunha (2002) e Takiyama (2003), além de outras fontes obtidas de registros de um marégrafo (altura da lâmina d'água, determinação de constantes harmônicas maregráficas) da marinha, localizado próximo ao Porto de Santana e que serviram de referência fundamental para as previsões de curvas de marés.

Esses dados foram sistematicamente utilizados como ponto de partida do modelo numérico, imprescindíveis para identificar as variáveis e parâmetros relevantes nos aspectos físicos, químicos e biológicos, que pudessem ser potencialmente influenciados pela forçante hidrodinâmica e pela qualidade da água da bacia hidrográfica. A dinâmica das marés e a sua influência devem ser consideradas em qualquer análise de processos turbulentos autodepurativos na bacia hidrográfica. Isso porque, tais processos são considerados as forçantes físicas que mais provavelmente influenciam a dinâmica de escoamento ao longo do canal principal e seus afluentes, desde seu trecho mais a montante (GRUTA) até sua foz, ao desaguar no rio Amazonas.

Neste sentido, o presente estudo empreendeu uma análise “simplificada” de modelagem de circulação hidrodinâmica e de dispersão de agentes passivos no escoamento (esgoto doméstico, ou quaisquer outros agentes químicos, físicos e biológicos), destacando sua relação com os potenciais processos biogeoquímicos e hidrometeorológicos em um trecho da bacia.

Em capítulos posteriores serão detalhadas as principais informações acerca do funcionamento do sistema de modelagem utilizado, isto é, o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBAHIA) (ROSMAN, 2009). Além disso, foram utilizados como parâmetros físicos de entrada, especialmente para o

modelo hidrodinâmico, os dados batimétricos de parte expressiva do trecho do canal do igarapé da Fortaleza (SILVA et al., 2003). Para as condições de contorno e iniciais do modelo dispersivo (modelo de transporte Langrageano) foram utilizados os dados de coleta de amostras de água em campo, com base principalmente nos valores de concentrações de coliformes fecais (CUNHA, 2003).

Como recorte espacial, optou-se por restringir o objeto de estudo ao canal principal da bacia do igarapé da Fortaleza, especificamente no trecho compreendido entre a sua foz e um local a montante chamado Grêmio Recreativo Universitário do Território do Amapá (GRUTA). O seu prolongamento exigiria um conjunto de dados mais complexos e que, até o presente momento, demandaria estudos específicos de elevados custos, como por exemplo, a batimetria da região da Lagoa dos Índios e a zona urbana nela contida. Essas informações simplesmente não existem ou não estão disponíveis.

A visão geral da bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza pode ser visualizada na Figura 1.1. A área desta bacia é de aproximadamente 190,829 km<sup>2</sup>, com os seguintes limites geográficos: ao sul e ao leste o rio Amazonas; a oeste a cidade de Santana e; ao norte a bacia do rio Curiaú. Observa-se na referida figura em destaque vermelho o curso do canal principal do Igarapé da Fortaleza, cuja trajetória parte do Canal do Norte (Rio Amazonas) até a zona norte da cidade de Macapá. Observa-se também, logo no início do trecho do igarapé da Fortaleza, à esquerda, um trecho do igarapé Provedor, principal afluente daquele, cuja nascente está localizada na zona sudoeste de Santana.

Ao se visualizar a Figura 1.1, nota-se que tanto o Igarapé da Fortaleza quanto o Provedor, estão seriamente ameaçados pela urbanização, uso e ocupação do solo, zonas portuárias, etc, as quais são verdadeiras ameaças aos ecossistemas aquáticos e à biodiversidade em geral, sem considerar os problemas potenciais causados pela veiculação hídrica de doenças que ameaçam a saúde pública em geral. É nessa perspectiva complexa que o presente trabalho se desenvolve e pretende contribuir para o processo de desenvolvimento científico e de gestão integrada desta bacia hidrográfica.

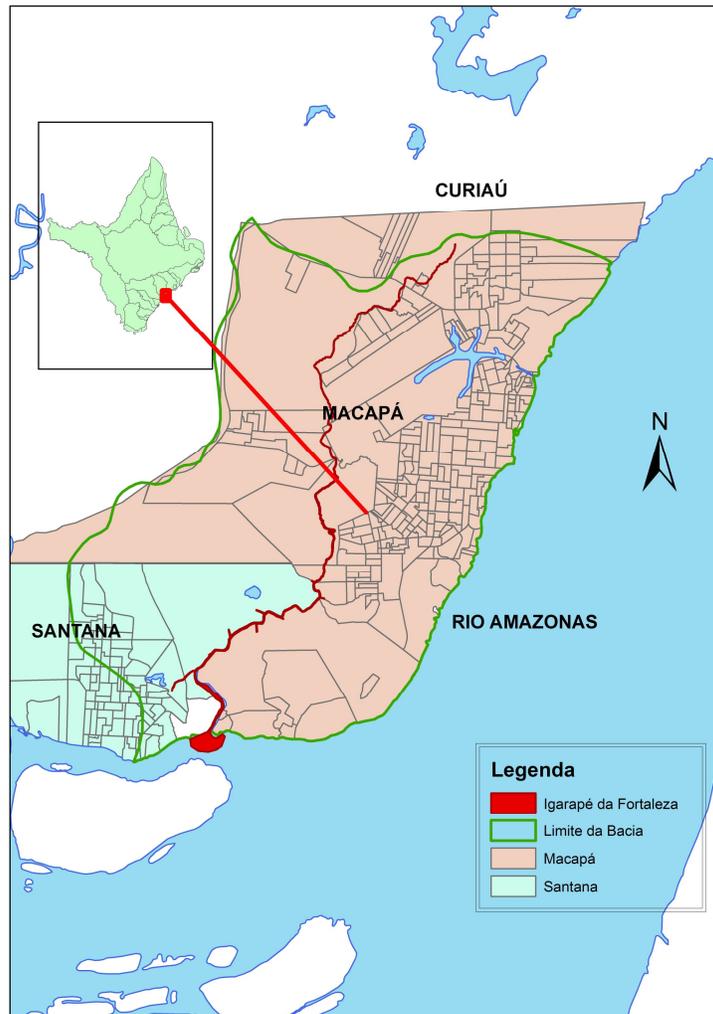


Figura 1.1 – Localização da bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza, com destaque para a malha urbana de Macapá e Santana.

Fonte: SEMA, 2003

A invasão urbana ilegal de certas áreas estudadas nesta pesquisa, como as áreas de ressacas, tem mobilizado o Ministério Público Estadual, através da Promotoria do Meio Ambiente, na tentativa de deter o avanço empresarial e imobiliário nesses espaços ambientais da cidade. Ainda que detentor da posse dessas terras, o poder público se mostra pouco eficiente quanto à fiscalização das invasões, principalmente em período de eleição.

O estabelecimento de moradias nessas áreas, normalmente inadequadas, depara-se com problemas de infra-estrutura básica como a falta de saneamento e abastecimento de água, além de coleta de lixo ineficiente. Acrescenta-se ainda a falta de uma rede coletora de esgoto e de drenagem superficial que obriga os moradores a utilizar fossas negras rasas para armazenamento do esgoto sanitário, as quais contaminam substancialmente os mananciais do igarapé da Fortaleza.

O que se observa em quase todo o Estado do Amapá é que há uma falsa dicotomia entre planejamento urbano e planejamento ambiental, a ponto de o setor de desenvolvimento urbano (desenvolvimento do habitat construído) e o de políticas ambientais (políticas relacionadas aos recursos naturais) exercerem comando, por vezes, conflitantes, resultando em políticas desarticuladas e ineficientes (BASTOS, 2006). É interessante ressaltar que nas cidades como Macapá e Santana, a expressão qualidade ambiental tem como sinônimos: qualidade do habitat, qualidade da infra-estrutura à disposição dos cidadãos; qualidade da cultura, qualidade do ar e das águas usadas e qualidade da paisagem (OLIVEIRA e HERMANN, 2005).

Para tanto, devemos considerar inicialmente alguns aspectos relevantes do processo de geração de conhecimento a partir de sistemas de modelagem em bacias hidrográficas e ecossistemas aquáticos, os quais serão detalhados a seguir.

### **Aspectos Relevantes da Modelagem de Ecossistemas Aquáticos**

De acordo com Fragoso Jr. et al (2009) a movimentação das águas em ecossistemas aquáticos continentais ocorre em resposta a diversas forçantes, fundamentalmente as correntes, as marés, a precipitação de chuvas e os ventos, os quais transferem energia para as águas dos rios. Tais movimentos rítmicos gerados na superfície da água (principalmente as marés na região do baixo rio Amazonas) intensificam ou amortecem a dispersão de compostos químicos e organismos aquáticos no sistema (SOUZA e CUNHA, 2010), causando

principalmente heterogeneidade espacial desses compostos e das comunidades biológicas, podendo também afetar a rede de interações tróficas em ecossistemas aquáticos.

Em tese, o movimento das águas em rios é bem entendido teoricamente. Contudo, a simulação do movimento do escoamento natural do mesmo em uma escala espacial mais detalhada e em uma escala temporal estendida é extremamente difícil de abordar (CHAPRA, 1997).

Por outro lado, para a compreensão do sistema, bem como a habilidade de simular e prever sua dinâmica, é necessário acoplar a dinâmica dos movimentos da água com os modelos de dispersão ou ecológicos (PINHEIRO et al, 2008; CUNHA, 2008; FRAGOSO Jr. et al, 2009; CUNHA, 2009; ROSMAN, 2009).

Em adição ao acoplamento dos sistemas dispersivos (escalar – poluente, microrganismos, por exemplo) necessita-se de uma série de dados disponíveis ou de campo para alimentar o modelo, com a finalidade de calibrar os parâmetros hidrodinâmicos.

Contudo, no presente caso, a calibração do modelo não foi possível. Os dados que deveriam ser coletados com uma resolução espacial fina e de acordo com a sazonalidade, para absorver as características salientes de ambos os modelos (hidrodinâmico e dispersivo) não puderam ser testados. Além de ser uma tarefa impraticável no presente estudo, a atual capacidade técnica e de recursos humanos destacada para o monitoramento da qualidade da água e hidrológico (incipiente ou inexistente) do governo do Estado não apresenta coletas sistemáticas na bacia hidrográfica. A realidade é que a solução de monitoramento qualitativo e quantitativo das águas da bacia hidrográfica do Igarapé da Fortaleza redonda também na quase completa ausência de dados hidrodinâmicos nas escalas desejadas.

Em consequência, esta tem sido a causa para se empreender apenas a abordagem “simplificada”, aproximada ou limitada, sobre o assunto, ou seja,

análise essencialmente numérica dos fenômenos mais gerais envolvidos na análise do ecossistema aquático em questão.

Ainda assim, foi possível superar algumas destas dificuldades iniciais impostas pela realidade local e realizar um estudo pioneiro que envolvesse análises mais elaboradas relacionadas à hidrodinâmica de escoamento de rios estuarinos sob influência de marés e sob impactos urbanos. O maior desafio seria incorporar as dimensões complexas (holísticas) hidrometeorológicas e ambientais que melhorassem a compreensão sobre o “funcionamento” de tais ecossistemas na região, pois essas informações podem auxiliar gestores nos processos de tomada de decisão.

Não só para determinar quais parâmetros deveriam ser estudados no futuro, mas também para melhor compreender com que frequência o monitoramento da qualidade da água deveria ser realizado e tornar mais eficiente a gestão desse ecossistema. A idéia central é que este estudo seja também útil em auxiliar o entendimento geral sobre o papel dos fatores abióticos preponderantes no ecossistema aquático, considerando a complexa gama de informação necessária à sua compreensão holística, e apenas com uma limitada quantidade de dados disponível sobre o clima, a hidrologia e do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica.

Apesar das limitações acima referidas, a inserção da modelagem ambiental na pauta das pesquisas científicas, pela sua importância e utilidade prática, tem atraído pesquisadores de diferentes áreas, tais como economia, sociologia, estatística, engenharia e ecologia, para reflexão e disseminação de conhecimento em torno da questão ambiental como estratégia para a conservação da biodiversidade local. Isso porque os modelos de gerenciamento hídrico e ambiental geralmente buscam descrever com detalhes o comportamento de um sistema. Ou seja, são utilizados para reproduzir um fenômeno de interesse sujeito a diferentes entradas. Por outro lado, podem ser utilizados para avaliar melhores soluções como aspectos econômicos, sociais ou ambientais (isto é, metas de qualidade da água, otimização de gestão de resíduos, estratégias de

monitoramento, etc), as quais estão presentes nas diferentes fases do gerenciamento de recursos hídricos, dependendo do propósito do estudo (FRAGOSO Jr et al, 2009).

Considerando a necessidade de pesquisas que utilizem como ferramenta a modelagem ambiental referentes à biodiversidade local, propõe-se o presente estudo da poluição (por esgoto doméstico) na bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza e a possibilidade de uso de um modelo hidrodinâmico e de transportes advectivo-difusivo. Tais ferramentas de análise são importantes para a projeção de cenários futuros na área que compreende os municípios de Macapá e Santana, no estado do Amapá e suas respectivas problemáticas ambientais atuais e futuras.

Dentre as etapas mais interessantes do uso de modelos para o gerenciamento hídrico são, de acordo com Fragoso Jr et al. (2009):

1. Identificação do estado atual da bacia hidrográfica (ocupação urbana, estimativa de geração de esgoto e de eventos climáticos críticos);
2. Quantificação de volumes e cargas geradas pela bacia (uso do solo);
3. Estado atual do ecossistema aquático (uso do monitoramento de níveis, velocidade, qualidade da água, etc);
4. Teste de alternativas (projeção dinâmica do crescimento populacional, uso do solo e cargas de nutrientes - previsão de cenários futuros otimistas e pessimistas, isto é, sem tratamento de esgoto, implantação de medidas mitigadoras, etc);
5. Seleção do cenário (melhor cenário que promova menores impactos e maximize benefícios);
6. Uso, monitoramento e manejo de bacia (monitoramento de variáveis ecológicas no ecossistema aquático e nas bacias de contribuição durante o uso da alternativa escolhida, emprego de medidas corretivas, visando reduzir a geração de cargas pontuais de nutrientes, bem como o reflexo dessas melhorias no ecossistema aquático).

Na busca de um equilíbrio entre complexidade e foco no problema, podemos aprender que o desenvolvimento de modelos exige um conhecimento amplo da funcionalidade do ecossistema. Além disso, um dos principais motivos para utilização de modelos é que eles também conferem flexibilidade às análises, visto que otimizam o tempo de análise possibilitando que muitos anos sejam analisados em tempos relativamente curtos; e ainda, diferentes alternativas podem ser analisadas diversas vezes mediante simples alterações de parâmetros (cenários).

Mas, apesar da expressiva experiência obtida com a modelagem ecológica (ambiental de modo geral), ainda existem muitos problemas no desenvolvimento de modelos matemáticos entre os quais: a) freqüentemente não se tem informação suficiente para desenvolver ou aplicar o modelo; b) a estimativa de valores dos parâmetros ainda requer muito esforço computacional, de campo e experimental; c) nem sempre os modelos refletem as reais propriedades dos ecossistemas, em particular suas adaptabilidades e habilidades de reconhecer uma mudança de estado do ecossistema quando submetido a fortes distúrbios (por exemplo, mudanças na composição das espécies pelo aumento de carga de nutrientes ou biomanipulação).

Segundo Fragoso Jr et al, (2009) o número de *feed backs* e processos envolvidos nos ecossistemas é tão elevado que torna possível um organismo, ou uma população, sobreviver e se reproduzir mesmo sob fortes mudanças das condições externas ou internas - também chamadas de condições prevaletentes do ecossistema).

Neste sentido, o presente estudo se insere na linha de pesquisa multidisciplinar da gestão e conservação da biodiversidade, utilizando ferramentas modernas de análise espacial. Utilizou-se o software SisBAHIA (Sistema de Base Hidrodinâmica e Ambiental, ROSMAN, 2009) com objetivo de melhorar a compreensão sobre esses ecossistemas, quantificar, avaliar e propor medidas de gerenciamento para minimizar impactos ambientais negativos causados por atividades humanas sobre a biodiversidade neles presente.

O estudo também contou com as bases de dados de pesquisas anteriores (TAKIYAMA, 2003; SILVA, 2003; CUNHA e COUTO, 2002; e NERI, 2004) de forma a aprofundar outros aspectos gerais da bacia hidrográfica e alguns dos mecanismos que auxiliassem a compreensão básica sobre a biodiversidade local.

A definição do problema da presente pesquisa partiu da situação real encontrada na bacia hidrográfica (poluição sistemática causada pela urbanização, uso e ocupação do solo). Isto é, como representar a condição hidro-ambiental de transporte de plumas de poluentes (ou agentes passivos na água) no espaço e no tempo na bacia hidrográfica, com uso de sistemas computacionais e um conjunto reduzido de informações e dados experimentais disponíveis sobre as condições batimétricas, hidrodinâmicas e da qualidade da água?

A principal hipótese (alternativa) da pesquisa é:

$H_1$  = o sistema computacional SISBAHIA representa com razoável realismo os movimentos de plumas de poluentes modeladas e simuladas no trecho da bacia hidrográfica, considerando-se a complexidade das forçantes (dados experimentais) das marés, fenômenos hidrometeorológicos e de efeitos causados pelo uso e ocupação do solo, ao longo de períodos previamente escolhidos para os ciclos de marés semidiurnas e das estações climáticas específicas para a elaboração de cenários ambientais;

De acordo com a proposta de pesquisa (problema e hipótese), o objetivo geral desta dissertação é aplicar o SisBAHIA para estudar o comportamento hidrodinâmico e o tempo de renovação das águas (recirculação) do igarapé da Fortaleza, tendo como referência informações atinentes ao volume estimado do esgoto doméstico despejados no seu canal principal, no trecho compreendido entre a sua Foz e o Gruta.

Os objetivos específicos são:

1. Modelar e simular a influência da precipitação e das marés (escalas espacial e temporal) sobre a qualidade da água da bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza.
2. Simular seis cenários ambientais para o comportamento hidrodinâmico do trecho estudado da bacia, considerando aspectos climáticos sazonais (chuvoso, transição e estiagem) e seus respectivos impactos sobre o ecossistema aquático.
3. Avaliar aspectos ambientais e ecológicos potencialmente correlacionados com as características da hidrodinâmica no trecho específico da bacia hidrográfica. Isto é, estimar o tempo de renovação da água na bacia e determinar as potenciais seções de amostragem da qualidade da água indicadas ao futuro monitoramento sistemático da qualidade da água no trecho.

Os objetivos descritos acima referem-se principalmente ao fato de que a poluição por esgoto doméstico lançado “in natura” (principal fonte de impactos ambientais) nos igarapés que formam a bacia do igarapé da Fortaleza não constitui somente uma preocupação ambiental. Tal comportamento da sociedade amapaense apresenta também desdobramentos ecológicos, econômicos e sociais que demandam, por parte do poder público, ações planejadas e contínuas que disciplinem a ocupação do solo e o uso dos recursos hídricos e da biodiversidade aquática.

Os usos diversos do solo e da água pelas comunidades urbanas e periurbanas dentro da bacia do igarapé da Fortaleza tem implicações ambientais e ecológicas graves, normalmente notabilizadas pela má condição da qualidade da água e que não se limitam somente à área da bacia.

Para dar conta das questões propostas pela pesquisa, a dissertação está organizada em seis capítulos da seguinte forma: o primeiro capítulo refere-se à introdução geral da dissertação. O segundo apresenta uma revisão da literatura, destacando alguns enfoques sobre a biodiversidade e a legislação ambiental

correlata. No mesmo capítulo analisou-se o avanço dos estudos sobre modelagem ambiental, com ênfase nos modelos hidrodinâmico e Lagrangeano (dispersivo de agentes passivos na água), destacando o processo de pré e pós-processamento dos modelos, suas aplicações e limitações, considerando-se a possibilidade de uso da modelagem ambiental como ferramenta importante para a projeção de cenários futuros. A área de estudo é apresentada no terceiro capítulo (materiais e métodos), onde se destacam as características física, biológicas e antrópicas da bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza. Neste capítulo foram utilizadas ferramentas de geoprocessamento para confeccionar mapas característicos da bacia em estudo, além de apresentar dados de pesquisas anteriores sobre batimetria, qualidade da água no igarapé da Fortaleza e relacioná-los aos índices de saneamento básico divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) e Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS). O quarto capítulo apresenta o uso do sistema de modelagem ambiental SisBAHiA aplicado ao igarapé da Fortaleza, destacando-se a simulação de cenários sazonais de estiagem, transição e de período chuvoso e suas implicações na hidrodinâmica do canal principal da bacia, no trecho compreendido entre a sua Foz e o local denominado de Gruta. Os resultados obtidos e a discussão dos mesmos, sob a ótica da conservação da biodiversidade, constituem o quinto capítulo. O sexto capítulo apresenta as conclusões do estudo e as principais recomendações para investigações futuras.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

Na revisão da literatura foram destacados alguns enfoques sobre a biodiversidade e a legislação ambiental correlata. Analisou-se também o avanço dos estudos sobre modelagem ambiental, com ênfase nos modelos hidrodinâmico e Langrangeano, destacando o processo de pré e pós-processamento dos modelos, suas aplicações e limitações como importante contexto no estudo da poluição por esgoto doméstico na bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza. Desta forma, considerou-se a possibilidade de uso da modelagem ambiental como ferramenta importante na projeção de cenários futuros na área da bacia hidrográfica que compreende os municípios de Macapá e Santana, no estado do Amapá.

### **2.1. Biodiversidade**

A biodiversidade ou diversidade biológica é importante para o equilíbrio e sobrevivência das espécies. Sua importância pode ser constatada por seus desdobramentos econômicos, sociais e ambientais. A biodiversidade tem se tornado a base de inúmeras atividades humanas. Possui, além de seu valor intrínseco, valor ecológico, genético, social, econômico, recreativo, educacional, cultural e estético (BOCATO Jr, 2009).

A humanidade tem se utilizado da diversidade biológica para promover seu sustento e, assim, sobreviver. Contudo, também tem realizado, de forma sistemática e constante, a destruição de ecossistemas, afetando a vida e promovendo a extinção de inúmeras espécies (EHRlich, 1997).

O critério da diversidade biológica estabelece as áreas a serem conservadas em diferentes países ou indica os meios necessários ao uso

sustentável de suas riquezas naturais, além de promover uma tomada de consciência mundial para a necessidade de se evitar a destruição e conseqüente alteração nos diferentes ecossistemas. Portanto, a sustentabilidade do planeta depende, em grande parte, das ações complexas de decisão humana. Essas decisões dependem da melhor interpretação da lógica das combinações de cada local vivido. E dadas às diferentes condições espaço-temporais e de complexidade que em cada um se encontra, deve-se ter o cuidado de não generalizar as respostas encontradas, pois o pensamento é global, mas a ação é local (JATOBÁ et al., 2002).

No caso específico do Brasil, pode-se afirmar que ele possui uma conhecida megadiversidade biológica. Contudo, apenas parte dela já foi catalogada. Por esse motivo é importante conhecer o potencial existente em diversidade biológica, sua concentração geográfica (fatores abióticos) e o valor ambiental desse recurso natural (SANTOS e SAMPAIO, 1998). Tais conhecimentos têm servido de subsídios para a elaboração de políticas de conservação e uso sustentável dos diversos recursos naturais brasileiros, além de orientar, dentre outras ações, as necessidades de investimentos em infraestrutura, criação e demarcação de reservas naturais, também elencar prioridades a serem dadas no campo da ciência e tecnologia e na gestão (ASSAD, 2000). Existe, portanto, um imenso trabalho de pesquisa a ser feito para a identificação e classificação de espécies, para o conhecimento dos diferentes ecossistemas e, principalmente, para indicar o melhor uso econômico dessa riqueza.

O Brasil possui aproximadamente 20% do número total de espécies do planeta, distribuídos por diferentes biomas: floresta amazônica, cerrados, mata atlântica, caatinga, mangue e pantanal, além de seus grandes *habitats* aquáticos. Além do Brasil, existem dezesseis países que detém, no conjunto de seus territórios, 70% das espécies animais e vegetais do planeta (RIBEIRO, 1997; GUERRA et al., 1998; Brasil/MMA, 1998).

Contudo, apesar do Brasil ser considerado um país megabiodiverso, alguns fatores são apontados como causadores de destruição da diversidade biológica. Dentre os mais relevantes o aumento da demanda por recursos biológicos, proveniente do crescimento populacional e do desenvolvimento econômico (TAKIYAMA et al., 2003; CUNHA et al., 2004); crescimento urbano acelerado e desenfreado; falta de conscientização por parte da população das conseqüências de suas ações sobre o ambiente a longo prazo; perda irreversível de inúmeras espécies devido à destruição acelerada dos *habitats*, resultante da expansão populacional e de suas atividades; incapacidade, em nível local, de conhecer e aplicar métodos de valoração da biodiversidade (BOCATO Jr, 2009); uso inadequado de tecnologias que afetam diretamente o ambiente; ausência de avaliações sistemáticas das conseqüências do uso de tecnologias e seus impactos no ambiente; falta de regulamentações rigorosas e de fiscalização quanto ao uso dos recursos biológicos, facilitando desmatamentos e destruições de áreas naturais, mudanças nos direitos de propriedade e alterações nas atitudes culturais; e falta de implantação de políticas governamentais claras para regulamentar o acesso e o uso dos recursos da biodiversidade (ASSAD, 2000).

Esses fatores afetam o ambiente de diversas formas, seja por meio da fragmentação e degradação dos ecossistemas, da utilização e exploração dos *habitats* naturais para outras finalidades, da poluição do solo, da água e da atmosfera (MILANO, 1999; Brasil/MMA, 1998).

Inclusive, esse conjunto de fatores tem contribuído para as mudanças climáticas de longo prazo. Para boa parte da população mundial, o resultado mais conhecido da meteorologia é a previsão do tempo divulgada nos telejornais. No entanto, esta área do conhecimento também produz informações importantes diante do quadro “apocalíptico” de mudanças climáticas observada no planeta. Conhecer a dinâmica das alterações climáticas, quantificá-las e propor

mecanismos para sua mitigação constituem o grande desafio das pesquisas meteorológicas (SOUZA e CUNHA, 2010).

O aumento da temperatura nos oceanos e na atmosfera tem proporcionado alterações nas correntes de vento, nos índices de precipitação e nos fenômenos meteorológicos extremos, como furacões e tempestades. A mudança climática observada no planeta já afeta milhares de pessoas e diversos ecossistemas. Impactos como a extinção em massa de espécies; escassez de água; secas mais severas; elevação do nível do mar; tempestades mais intensas; inundações e diminuição na produção de alimentos nas partes mais pobres do planeta parecem cada vez mais inevitáveis diante da falta de cumprimento das metas de diminuição nos índices de emissão de gases do efeito estufa propostas por diversos organismos científicos internacionais entre eles o Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC). O IPCC foi criado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pela United Nations Environment Programme (UNEP) em 1988, reúne cerca de três mil cientistas e especialistas de várias áreas com o objetivo de estudar e divulgar as informações técnicas e socioeconômicas e os impactos relevantes aos riscos à humanidade, visando criar mecanismos de adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas globais (ADGER et al., 2007).

Em abril de 2007 o IPCC divulgou, na cidade de Bruxelas, os resultados do seu Quarto Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas. Os resultados se baseiam em conjuntos de dados que cobrem o período desde 1970 e alertam para um aumento médio global de temperatura entre 1,8 °C e 4,0 °C até 2100. Segundo o relatório, esse aumento pode ser de até 6,4 °C se a população e a economia continuarem crescendo rapidamente e se for mantido o consumo intenso dos combustíveis fósseis. Diante de cenários otimistas e pessimistas, a estimativa mais confiável projeta um aumento de temperatura médio de 3 °C, considerando que os níveis de dióxido de carbono se estabilizem em 45% acima da taxa atual.

O Relatório concluiu que é muito provável (mais de 90% de confiabilidade) que a maior parte do aumento observado na temperatura global média desde meados do século XX deve-se ao aumento nas concentrações antrópicas de gases de efeito estufa. O mesmo relatório indica, também, que muitos ecossistemas têm sido afetados pelas mudanças climáticas em escala regional, diminuindo suas capacidades de estabilidade e resiliência e que os sistemas biológicos são mais vulneráveis às mudanças climáticas, sendo bastante provável que alguns sejam prejudicados irreversivelmente. Alerta que o impacto sobre os recursos hídricos estará diretamente afetado pelo aumento (10 a 40% nas altas latitudes e em algumas áreas tropicais úmidas) e diminuição (10 a 30% em algumas regiões secas nas latitudes médias e nos trópicos secos) da disponibilidade de água. Considera como provável que a exposição à mudança do clima afete a saúde de milhões de pessoas, em especial as com baixa capacidade de adaptação. Bons exemplos são as populações vulneráveis de baixa renda que vivem em locais de risco (OLIVEIRA e CUNHA, 2010).

Entretanto, o relatório também estabelece que, mesmo com a melhoria da qualidade de dados (mais pesquisas, evolução dos modelos de previsão, aumento no número de pontos de monitoramento, etc.) o desequilíbrio de dados e publicações observados principalmente nos países em desenvolvimento impede uma atribuição mais completa das causas das respostas dos sistemas ao aquecimento antrópico por insuficiência de informações sobre algumas áreas.

Para o Brasil, em especial para a Amazônia, projeta-se que o aumento de temperatura e as correspondentes reduções na disponibilidade da água no solo acarretem uma substituição gradual da floresta tropical por savana na parte leste (Amazônia Oriental). A vegetação semi-árida tenderá a ser substituída por vegetação de terras áridas. Uma vez que a Amazônia desempenha um papel importante no ciclo de carbono planetário, tais projeções nos levam a considerá-la como uma região de grande vulnerabilidade do ponto de vista das influências das mudanças climáticas (ADGER et al., 2007).

No contexto regional, a biodiversidade será afetada na medida em que as espécies terão que se adaptar a novos regimes climáticos, migrarão para outros locais disponíveis ou mais adequados, até para evitar uma possível extinção. Os regimes hídricos poderão sofrer modificações capazes de causar estresse hídrico (LUCAS et al., 2010) ou enchentes (OLIVEIRA e CUNHA, 2010), com evidentes prejuízos em todos os ecossistemas e sociedade em geral. Além de uma extensa rede hidrográfica, o Amapá também apresenta uma rica biodiversidade que começa a ser conhecida pela comunidade científica por intermédio de publicações científicas (monografias, dissertações e teses) intensificadas na última década. Os prejuízos advindos das mudanças climáticas podem não ser nunca obtidos, por falta de dados.

Em escala local, no Amapá, a maior preocupação com as mudanças climáticas poderá estar relacionada ao saneamento. Isso porque 80% da população urbana do estado residem em áreas alagadas denominadas localmente de “ressaca<sup>2</sup>”. Alterações nos níveis de precipitação e das temperaturas médias poderão propiciar um aumento da ocorrência de vetores responsáveis por transmissão de doenças tropicais como: a malária, dengue e febre amarela, além de outras doenças de veiculação hídrica como a diarreia, viroses, poliomielite, leptospirose, hepatite, etc. A qualidade da água distribuída à população será um dos fatores cruciais para o aumento de doenças e esta dependerá da qualidade ambiental dos mananciais de onde provêm essa água.

Ostentar o título de “estado mais preservado do Brasil” até hoje não trouxe nenhum ganho econômico e/ou social para o Amapá. Permanecemos com um IDH de 0,780 (um dos 16 piores do Brasil). Mesmo às margens do rio Amazonas, as cidades da região norte apresentam dados de saneamento básico inferior à média nacional (CUNHA et al, 2004; NERI, 2004; CUNHA, 2008, PINHEIRO et al., 2008). Qual a perspectiva para o futuro?

---

<sup>2</sup> O termo ressaca é utilizado regionalmente no Amapá para designar as bacias de acumulação de água influenciadas pelo regime das marés e das chuvas. As ressacas também são conhecidas como campos herbáceos inundáveis (COELHO, 2006).

Pode-se responder a esse questionamento afirmando, conforme alguns autores citados anteriormente, que o processo de uso e ocupação do solo, apropriação e organização econômica, expõem o espaço urbano aos resultados de profundas transformações antrópicas, principalmente, sobre os corpos hídricos (MONTE-MOR, 1994). Em consonância, com tais práticas humanas, têm-se os padrões de consumo que atuam intensamente na destruição e desperdício dos recursos e da biodiversidade.

No Amapá, como em outros estados da Amazônia, a busca pela melhoria de qualidade de vida é marcada pela ocupação de áreas menos valorizadas, localizadas, em geral, ao longo dos cursos d'água, configurando-se em bairros favelados com problemas diversos (LIMA, 1999). Em Macapá e Santana, municípios integrados à rede hídrica do igarapé da Fortaleza, a ocupação desordenada e acelerada, tem produzido crescente e rápida degradação do ecossistema das áreas inundáveis e das áreas de ressacas, bem como a diminuição da qualidade de vida da população (NERI, 2004).

O município de Macapá está localizado ao sudeste do estado do Amapá, sendo a única capital brasileira cortada pela linha do Equador<sup>3</sup>. Pela contagem da população realizada pelo IBGE em 2007, a cidade conta com uma população de 344 153 habitantes em uma área de 6 563 km<sup>2</sup> (4,6% da área do estado), resultando em uma densidade demográfica de 52,4 hab./km<sup>2</sup>. É a quinta cidade mais populosa do norte do Brasil, atrás apenas de Manaus (AM), Belém (PA), Ananindeua (PA) e Porto Velho (RO).

O município de Santana tornou-se município à época em que o Amapá ainda era Território Federal subordinado política e economicamente à esfera do Governo Federal. Está localizado na porção sudoeste do Estado, mais precisamente na micro-região 3, ocupando uma área de 1.564 km. Segundo a contagem da população realizada pelo IBGE, a população urbana nesse município é de 92.098 habitantes, sendo 3.481 no distrito do igarapé da Fortaleza (IBGE, 2007). Contando com apenas 1,1% da área do estado e uma densidade

---

<sup>3</sup> Macapá não possui interligação por rodovia a outras capitais.

demográfica de 58,9 hab/km<sup>2</sup>, Santana é um dos menores municípios amapaenses. Mas, apesar disso, é a segunda cidade em importância política, econômica e sociocultural, em nível populacional, atrás somente da capital do Estado, Macapá.

Os bairros ou assentamentos no entorno da bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza não possuem coleta de lixo e nem tratamento dos resíduos sólidos e líquidos. Assim, percebe-se que o esgoto proveniente das ocupações humanas é diretamente lançado *in natura* no solo ou dentro da bacia (CUNHA e COUTO, 2002).

Assim, é visível o descarte dos efluentes líquidos e dos detritos domésticos dentro dos corpos hídricos da bacia pela presença de atividades domésticas e comerciais nas habitações. Essa prática está relacionada à falta de monitoramento e fiscalização pelos órgãos ambientais, sobretudo, pela quase ausência de infra-estrutura urbana do município que não oferece serviços de saneamento ambiental à cidade e tampouco à área estudada.

Macapá e Santana são cidades drenadas por áreas de ressacas. Apesar de essas áreas serem protegidas legalmente - desde 1965, em nível federal, com a Lei nº 4.771 que estabelece as Áreas de Preservação Permanente (APP) e, em 2004, com a Lei estadual nº 0835, que as considera como Patrimônio Natural – ainda assim, as práticas urbanas configuradas nesses municípios vêm motivando situações ambientalmente conflituosas.

Estima-se que, só no município de Macapá, mais de 80 mil pessoas ocupem essas áreas. Um mapa da bacia do igarapé da Fortaleza contendo a distribuição das áreas de ressacas e canais de drenagem no perímetro urbano dos municípios de Macapá e Santana, até o ano de 2003, é apresentado na Figura 2.1. Nessa figura, é possível perceber a interligação entre as áreas de ressacas existentes nesses municípios e ponderar quanto às conseqüências ao meio ambiente que o aumento populacional e a falta de planejamento urbano podem produzir sobre as mesmas.

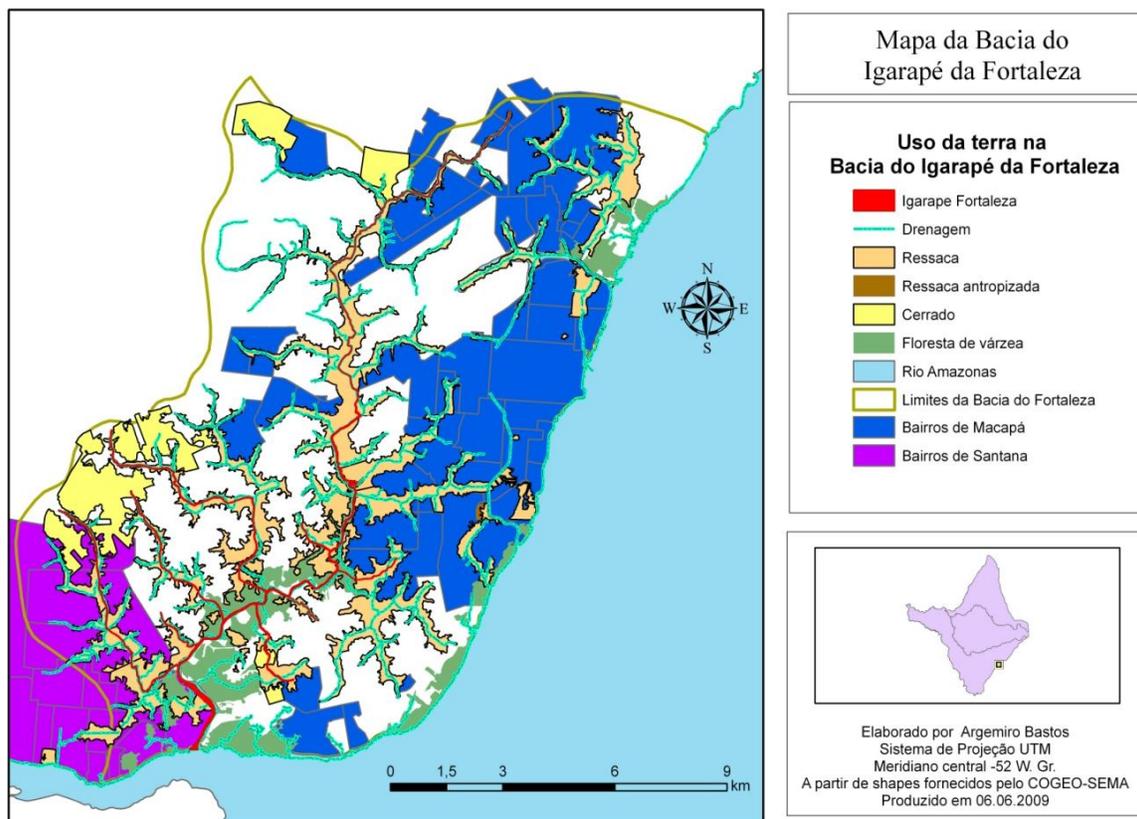


Figura 2.1 - Áreas de ressacas distribuídas no perímetro urbano dos municípios de Macapá e Santana até o ano de 2003.  
 Fonte: SEMA, 2003.

A conservação dos recursos naturais está diretamente relacionada à qualidade de vida da população. A crescente degradação desses recursos, sobretudo solo e água, têm alcançado níveis críticos e revela uma limitação nas condições de vida da população que vive nessas áreas. Os efeitos da deterioração do meio ambiente comprovam a falta de sensibilização da população local quanto às questões ambientais, pois algumas atitudes dos moradores, como o lançamento de esgoto in natura tem efeito perceptível na saúde da população (NERI, 2004) e na qualidade de água (TAKIYAMA et al., 2003; CUNHA et al., 2004).

Mesmo com o tombamento das áreas de ressacas houve um crescimento populacional (áreas em azul marinho e roxo) quando se compara o primeiro levantamento feito por AGUIAR (2003) e NERI (2004) com os dados da

contagem da população realizada pelo IBGE em 2007 (IBGE, 2007) como demonstrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Evolução do número de residentes nas ressacas de Macapá e Santana no período de 2003 a 2007.

Município	Ressaca	Area (km <sup>2</sup> )	Residentes 2003*	Densidade populacional	Residentes 2007**	Densidade populacional	Aumento populacional médio
Macapá	Açaí	2,07	805	388,89	945	456,5	4,35%
Macapá	Canal do Jandiá	3,57	3.903	1.093,28	4.115	1152,7	1,36%
Macapá	Chico Dias	1,23	5.584	4.539,84	6.204	5043,9	2,78%
Macapá	Congós	1,99	12.478	6.270,35	14.115	7093,0	3,28%
Macapá	Coração	2,35	190	80,85	243	103,4	6,97%
Santana	Fonte Nova	0,8	1.492	1.865,00	1.624	2030,0	2,21%
Santana	Funda	1,78	2.429	1.364,61	2.400	1348,3	-0,30%
Macapá	Infraero li	1,01	54	53,47	146	144,6	42,59%
Macapá	Lago Da Vaca	1,53	4.612	3.014,38	4.720	3085,0	0,59%
Macapá	Lagoa Dos Índios	15,54	1.714	110,30	1.802	116,0	1,28%
Macapá	Marabaixo	0,79	206	260,76	456	577,2	30,34%
Macapá	Mucajá Nova	0,06	1.416	23.600,00	1.300	21666,7	-2,05%
Macapá	Esperança	0,26	2.822	10.853,85	3.015	11596,2	1,71%
Macapá	Pacoval	1,71	3.590	2.099,42	3.678	2150,9	0,61%
Macapá	Paraíso Perpétuo	1,54	5.268	3.420,78	6.038	3920,8	3,65%
Macapá	Socorro	0,95	11.626	12.237,89	14.230	14978,9	5,60%
Santana	Provedor	0,94	6.491	6.905,32	6.819	7254,3	1,26%
Macapá	Ramal Do 9	1,42	32	22,54	45	31,7	10,16%
Macapá	Sá Comprido	1,15	443	385,22	745	647,8	17,04%
Macapá	Tacacá	4,3	3.948	918,14	4.190	974,4	1,53%
Santana	Vagalume	1,17	3.440	2.940,17	3.630	3102,6	1,38%
<b>Total</b>		<b>46,16</b>	<b>72.543</b>		<b>80.460</b>		

Fonte:\* NERI, 2004

\*\* IBGE, 2007

A análise da Tabela 2.1, evidencia que mesmo consideradas áreas ambientais protegidas, as ressacas de Macapá e Santana continuam sendo invadidas num ritmo preocupante. A redução em duas destas áreas (Funda e Mucajá) ainda está longe de ser um ganho ambiental, pois a cidade continua a crescer sobre as pontes.

Para o ecossistema aquático as áreas de ressacas são consideradas “purificadoras” de água, pois a vegetação e sedimento podem reter nutrientes (COSTA NETO et al. 2003). Além disso, essas áreas tendem a alimentar as águas subterrâneas dos lençóis freáticos e reservatórios de água ali presentes. Portanto, a poluição, mesmo que pontual, pode comprometer os recursos hídricos de toda a bacia e impactar os sistemas aquáticos.

Os dados dos indicadores de saneamento básico para os municípios de Macapá e Santana são oriundos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), disponibilizados pelo software “Série História 6”<sup>4</sup> (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2009). Outra fonte de dados disponibilizada é o Atlas de Desenvolvimento Humano do Brasil<sup>5</sup>.

Os resultados da utilização do software “Série História 6” foram agrupados em categorias e parâmetros apresentados nas Tabelas 2.2 e 2.3. A análise dos dados da tabela 2.2 permite observar que os Índices de atendimento com abastecimento de água e Índice de atendimento total com esgotamento sanitário são bastante inferiores à média nacional de 89% e 47%, respectivamente (BRASIL/ANA, 2009).

---

<sup>4</sup> O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) é um dos maiores sistemas de informações sobre o setor saneamento do Brasil e possui um grande acervo de dados e indicadores relevantes para todos os segmentos envolvidos com o setor de saneamento. (disponível em <http://www.pmss.gov.br/snis/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=29>).

<sup>5</sup> O Atlas do Desenvolvimento Humano do Brasil criado pelo IBGE e PNUD, é um atlas destinado a administradores públicos, pesquisadores, jornalistas e às pessoas que trabalham com planejamento e análise das realidades municipais, estaduais e brasileira, com tabelas, gráficos, mapas e relatórios a partir de 125 indicadores sociais e econômicos para os 5.507 municípios brasileiros e as 27 unidades da federação.

Tabela 2.2 – Perfil dos municípios de Macapá e Santana quanto ao saneamento básico, no ano de 2007.

<b>Informação</b>	<b>160030 – Macapá</b>		<b>160060 – Santana</b>	
População total do município segundo o IBGE (2007)	<b>344,153</b>	habitantes	<b>92,098</b>	Habitantes
População total atendida com abastecimento de água	<b>39,401</b>	habitantes	<b>10,934</b>	Habitantes
População total atendida com esgotamento sanitário	<b>25,610</b>	habitantes	<b>1,575</b>	Habitantes
IDH 2000	<b>0,772</b>	%	<b>0,742</b>	%
Produto interno bruto (PIB 2004)	<b>2,420,684,31</b>	R\$	<b>522,851,58</b>	R\$
Quantidade de ligações ativas de água	<b>39,401</b>	ligações	<b>10,934</b>	Ligações
Extensão da rede de água	<b>664,80</b>	Km	<b>127,7</b>	Km
<b>Índice de atendimento com abastecimento de água</b>	<b>11,45</b>	%	<b>11,87</b>	%
Consumo médio per capita de água	<b>281,51</b>	L/(hab/dia)	<b>233,43</b>	L/(hab/dia)
Índice de perdas de faturamento	<b>67,65</b>	%	<b>76,04</b>	%
Quantidade de ligações ativas de esgoto	<b>5,135</b>	ligações	<b>318</b>	Ligações
Extensão da rede de esgoto	<b>89,28</b>	Km	<b>9,42</b>	Km
<b>Índice de atendimento total com esgotamento sanitário</b>	<b>7,44</b>	%	<b>1,71</b>	%
Índice de coleta de esgoto	<b>15,87</b>	%	<b>2,48</b>	%
Índice de esgoto tratado referido à água consumida	<b>15,87</b>	%	<b>2,48</b>	%

Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, 2007.

Em 2000, o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal de Macapá era de 0,772. Segundo a classificação do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), o município está entre as regiões consideradas de médio desenvolvimento humano (IDH entre 0,5 e 0,8). Em relação aos outros municípios do Brasil, Macapá apresentava uma situação boa: ocupava a 1260ª posição, sendo que 1259 municípios (22,9%) estavam em situação melhor e 4247 municípios (77,1%) estavam em situação pior ou igual. Em relação aos outros municípios do Estado, Macapá ocupava a 1ª posição nos índices de IDH.

A Tabela 2.3 apresenta a evolução dos principais indicadores de saneamento básico para o estado do Amapá no período de 1995 a 2007. Observa-se que mesmo com o aumento da demanda por água potável os índices praticamente não evoluíram. A extensão da rede coletora de esgoto, por exemplo, praticamente não apresentou aumento nos últimos 9 anos.

Tabela 2.3 - Evolução dos principais indicadores de saneamento básico para o estado do Amapá no período de 1995 a 2007

Indicadores	Unidade	Ano												
		1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
<b>Abastecimento de água</b>														
Ligações existentes	1000 unid				48,1	51,9	59,6	61,4	64,7	68,0	71,5	73,7	76,7	77,6
População atendida	1000 hab							238,1	246,2	257,4	269,4	281,1	295,7	291,2
Nível de atendimento	%	90,2	59,6	65,1	60,5	57,2	57,2	56,2	51,8	54,4	55,6	53,5	54,0	55,3
Volume produzido	1000 m <sup>3</sup>	27,0	28,1	28,1	30,5	40,1	41,9	44,0	48,3	50,9	60,8	62,2	61,8	65,8
<b>Esgotamento sanitário</b>														
Ligações existentes	1000 unid	2,3	4,7	5,1	4,7	5,1	5,1	5,2	5,2	5,5	5,6	5,7	5,7	5,7
Extensão da rede	km	70,0	88,9	91,3	91,3	91,3	91,3	113,8	114,9	114,9	114,9	114,9	114,9	110,4
População atendida	1000 hab							27,1	25,8	26,3	27,3	27,8	27,9	28,3
Nível de cobertura	%	5,5	7,5	7,6	7,1	6,8	6,3	6,4	5,4	5,6	5,6	5,3	5,1	5,4

Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, 2007.

As pessoas tendem a ser mais saudáveis quando o ambiente também o é. Ambiente saudável é aquele que mantém as funções dos ecossistemas em equilíbrio, minimiza os impactos antrópicos negativos e conserva a biodiversidade. Quanto mais o meio ambiente se degrada, mais ecossistemas são afetados e mais dispendiosa é sua recuperação.

Atualmente, os estudos apontam as áreas urbanas e a biodiversidade aquática como os fatores que constituem o maior exemplo de degradação ambiental no mundo, que vêm colocando em risco a segurança e a qualidade de vida dos grupos sociais e tornando-se palco dos principais embates do campo ambiental (BASTOS, 2006).

Conforme a Agenda 21 (BRASIL, 1996), quase a metade do espaço construído nas cidades está na esfera do irregular e do informal, o que envolve questões que variam desde a insegurança às formas de ocupação. A crise referente à forma como o espaço construído têm sido organizado revela a ineficácia "social" e "ambiental" do modelo de gestão até agora adotado pelas

políticas públicas, desenhando o cenário dos conflitos em torno da perda da biodiversidade e dos sistemas aquáticos.

Neste sentido, o debate sobre a gestão e conservação da biodiversidade no Brasil tem incorporado várias discussões, a exemplo da necessidade de uma teoria para analisar os processos ambientais para a realização de estudos sobre a perda da biodiversidade e da formulação de políticas públicas que integrem as dimensões físicas, políticos-sociais, socioculturais e espaciais (COELHO, 2005).

Portanto, no estudo da gestão e conservação da biodiversidade, não é possível separar a sociedade de seu ambiente físico e biótico, vez que as três dimensões constituem um mundo material socializado e dotado de significados. No entanto, devido à falsa dicotomia entre o ambiente urbano e o ambiente físico gera-se certa incompatibilidade entre planejamento urbano e planejamento ambiental, a ponto de o setor de desenvolvimento urbano (desenvolvimento do habitat construído) e o de políticas ambientais (políticas relacionadas aos recursos naturais) exercerem comando, por vezes, conflitante no interior do próprio aparelho de Estado brasileiro. Isso resulta em políticas desarticuladas e ineficientes. Contudo, é interessante ressaltar que a expressão qualidade ambiental tem como sinônimos: qualidade do habitat, qualidade da infra-estrutura à disposição dos cidadãos; qualidade da cultura, qualidade do ar e das águas usadas e qualidade da paisagem (OLIVEIRA e HERMANN, 2005).

## **2.2 Legislação ambiental**

O Brasil possui entre 16% e 18% da água do planeta Terra, mas sua distribuição não é homogênea e está ameaçada por fatores socioeconômicos diversos. Na região norte, por exemplo, detentora de 75% da oferta de água no país, vive apenas 5% da população. Por outro lado, a região nordeste que responde por 1/3 da população brasileira possui apenas 3,3% da disponibilidade

hídrica. Mesmo com uma disponibilidade hídrica confortável, a região norte apresenta problemas de saneamento básico, controle de atividades de pesca e manutenção da biodiversidade terrestre e aquática (CLARKE e KING, 2005; PINHEIRO et al., 2008; FRAGOSO Jr, 2009).

No Brasil, a degradação da qualidade da água e suas conseqüências têm motivado a proposição de leis e políticas públicas que visam resguardar esse bem coletivo e garantir o equilíbrio entre disponibilidade e função ecológica, bem como o uso pela população atual e pelas gerações futuras.

O Código de Água, estabelecido pelo Decreto Federal n.º 24.643, de 10 de julho de 1934 (BRASIL, 1934), constitui um marco na legislação brasileira de águas. Seqüencialmente, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída através da Lei Federal n.º 9.433, de 08 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), traz uma mudança de paradigma importante ao conferir à água o caráter de um bem de domínio público, limitado e de valor econômico, cujo uso prioritário é o consumo humano e que deve, sempre que possível, ter uso múltiplo. E, finalmente, a criação, pela Lei n.º 9.984, de 17 de julho de 2000, da Agência Nacional de Águas (ANA) a qual além de regular o uso de recursos hídricos de domínio federal, deve garantir e encaminhar mecanismos que assegurem sua missão como agente de regulação.

Convém destacar também, a portaria 518 de 2004 do Ministério da Saúde que estabelece procedimentos e responsabilidades ao controle e vigilância da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e a resolução n.º 357 de 17 de maio de 2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que estabelece nove classes da qualidade da água, de acordo com os minerais e substâncias presentes e suas respectivas concentrações.

A Lei n.º 9.433 (Política Nacional de Recursos Hídricos) ao considerar a água como um bem permanente de propriedade comum, tem proporcionado reflexões em diversas esferas, visando implementar ações para a proteção dos recursos hídricos. Entretanto, a poluição que afeta os mananciais na Amazônia, seja pela ocupação inadequada ou pelo lançamento de esgotos domésticos e

industriais sem tratamento, têm dificultado ou inviabilizado a qualidade do fornecimento de forma eficiente e contínua para consumo humano (ARAGON et al., 2003)

A referência à legislação visa demonstrar não só o avanço na visão referente aos recursos hídricos, considerando seu valor econômico e, por conseguinte, novas formas de conservá-lo, mas vem ainda reforçar a legalidade do uso da bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos sendo um dos fundamentos da lei 9.433.

A gestão dos recursos hídricos tendo a bacia hidrográfica como unidade de planejamento, funciona como um sistema ecológico, onde os recursos naturais estão interligados e são dependentes (TUNDISI, 2005). Sob o ponto de vista da conservação da biodiversidade (flora, fauna e paisagem) e manejo de bacias hidrográficas (quantidade e qualidade da água), a proteção dessas áreas é estratégica e prioritária, tanto à manutenção dos ecossistemas quanto ao aproveitamento dos serviços ambientais por elas prestados à comunidade que nela habita.

Durante a Eco 92, realizada no Rio de Janeiro, o Brasil foi signatário da Agenda 21 - documento assinado por 170 países, que representa o esforço conjunto desses governos e povos para identificar ações que aliem desenvolvimento a proteção ambiental (BRASIL, 1996). O capítulo 23 desse documento destaca que “a participação dos cidadãos é pré-requisito fundamental para alcançar o desenvolvimento sustentável”.

Para Agostinho et al. (2007) a proteção e o aprimoramento de técnicas de manejo de corredores fluviais e planícies de inundação associadas, bem como a manutenção de sua integridade hidrológica são fundamentais para preservar a biodiversidade dos ecossistemas aquáticos continentais brasileiros. A vida no meio aquático depende da quantidade de oxigênio dissolvido, de modo que o excesso de dejetos orgânicos e tóxicos na água reduz o nível de oxigênio e impossibilita o ciclo biológico normal.

Tundisi (2007) afirma que o avanço na última década do conhecimento científico sobre processos ecológicos, da biodiversidade e da interação sistemas aquáticos/sistemas terrestres tem contribuído para proposição de projetos que respeitem a biodiversidade desses sistemas. Na Amazônia, segundo Silva (2005), há pelo menos 40.000 espécies de plantas, 427 de mamíferos, 1.294 de aves, 378 de répteis, 427 de anfíbios e cerca de 3.000 espécies de peixes. Esta rica diversidade de espécies encontra-se ameaçada principalmente pelo avanço do desmatamento e ocupação das margens dos rios.

Restringir o uso e a ocupação de áreas de grande biodiversidade local requer não só medidas legais, mas, sobretudo, respeito às gerações futuras. No Amapá, a Lei N.º 0388, de 10 de dezembro de 1997 (AMAPÁ, 1997), de acesso à biodiversidade, estabelece em seu capítulo 5 inciso I que o poder público deve “elaborar as diretrizes técnicas e científicas para o estabelecimento de prioridades para a conservação de ecossistemas, espécies e gens, baseadas em fatores como o endemismo, a riqueza e o inter-relacionamento de espécies e seu valor ecológico e, ainda, nas possibilidades de gestão sustentável”. Esse artigo tem sido negligenciado quando o poder público permite a ação de invasão populacional urbana, principalmente em anos eleitorais, e áreas tombadas pela legislação local; como é o caso das leis estadual 0835 (AMAPÁ, 2004), que protegem não só as áreas de ressaca, mas todas as áreas úmidas (várzea e ressaca) e a lei municipal 0948, de 17 de janeiro de 1999 (MACAPÁ, 1999), que dispõe sobre a proteção, controle, conservação e melhoria do meio ambiente no município de Macapá.

A utilização da água nas diversas atividades humanas ao longo do igarapé da Fortaleza tem trazido conseqüências sobre esse corpo de água. Takiyama et al., (2003) alertam que a intensa extração mineral, executada pelas olarias que retiram argila das áreas de várzea tem contribuído para a degradação da qualidade de água. Mesmo com a utilização da área de onde foram retirada argila para a prática da piscicultura o impacto provocado não é minimizado.

O Amapá é o estado mais preservado do Brasil no que se refere a sua cobertura vegetal, mas em termos de biodiversidade o conhecimento e manutenção precisam de melhor atenção dos gestores. A biodiversidade dos ecossistemas aquáticos é fortemente influenciada pela ação antrópica como o lançamento de esgoto nos corpos de água (GAMA et al., 2003) e que necessita de uma seqüência sistemática nas pesquisas. A Lei estadual de acesso à biodiversidade precisa ser efetivada e fiscalizada para que a o “título” de estado mais preservado do Brasil seja real.

Depois de doze anos de criação da PNRH, em alguns estados como o Amapá, a efetivação desse instrumento político, de fato, ainda não aconteceu. A regulamentação da Lei estadual nº 0686, de 07 de junho de 2002, que dispõe sobre a Política de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado do Amapá (PGRHEA), necessita de dados técnicos, como vazão e disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas; enquadramento dos corpos de água em classes definidas pela resolução CONAMA 357/05, segundo os usos preponderantes; criação e operação de um Sistema Integrado de Monitoramento Permanente de Recursos Hídricos, visando o gerenciamento e a implementação de futuros projetos; além da ausência dos Planos de Bacias Hidrográficas que deveriam ser elaborados pelas respectivas Agências de Bacias Hidrográficas, com atualizações periódicas de no máximo quatro anos e aprovados pelo respectivo Comitê de Bacia Hidrográfica.

Os recursos hídricos disponíveis atualmente no Amapá poderiam ser mais bem utilizados com a efetiva consolidação da PGRHEA. O uso de uma ferramenta numérica aplicada à bacia hidrográfica pode fornecer novas informações estratégicas à elaboração dos Planos de Bacia, além de reduzir não só os custos operacionais como temporais de monitoramento e fiscalização de forma mais eficaz.

A legislação Estadual também possui leis que tratam da preservação de ambientes naturais com importantes funções ecológicas, dentre os quais se

incluem os recursos hídricos e as áreas de ressacas. Em 1999 houve a promulgação da Lei Estadual nº 0455 (AMAPÁ, 1999) que trata especificamente dos ambientes de ressacas, impondo uma série de ações proibitivas ao processo de uso e ocupação. Sendo, no entanto, revogada em 27 de maio de 2004, pois deixava de fora as áreas de várzeas, que possuem funções ecológicas não menos importantes que as ressacas, passando a vigorar a Lei nº 0835 (AMAPÁ, 2004), protegendo não só essas áreas, mas todas as áreas úmidas (várzea e ressaca).

No âmbito municipal, há ainda a lei 0948, de 17 de janeiro de 1999 (MACAPÁ, 1999), que dispõe sobre a proteção, controle, conservação e melhoria do meio ambiente no município de Macapá.

Estas leis são a constatação de que as exigências em termos de quantidade e qualidade da água obrigam um conhecimento mais detalhado, pontual e instantâneo das alterações sofridas pelas fontes hídricas.

A esse fato impõe-se estudar as tendências ao longo termo, ou seja, verificar as condições presentes, projetando situações futuras. Porém, a promulgação dessas leis e a aplicabilidade de políticas públicas socioambientais delas derivadas **não** respondem aos problemas provocados pela intensa dinâmica populacional do espaço urbano de Macapá (RIBEIRO, 2008). Nem tampouco às bases que constituem os instrumentos legais propostos pela lei 0686/02 (Política de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado do Amapá). Observa-se, principalmente quanto aos recursos hídricos do núcleo urbano da cidade, uma concentração desordenada de moradores, de construções e de atividades socioeconômicas desfavoráveis tanto para a qualidade de vida como para a proteção da biodiversidade (BECKER, 2004; COELHO, 2006;).

A superfície das ressacas é coberta por plantas aquáticas como macrófitas e algas (COSTA NETO et al. 2003). O importante papel ecológico das macrófitas aquáticas como fonte de alimento, local de refúgio para diversas espécies de vertebrados e invertebrados e na ciclagem de nutrientes tem sido enfatizado em vários ecossistemas aquáticos continentais (ESTEVES, 1998). Esses organismos assumem papel ainda mais importante em ecossistemas rasos,

como as planícies de inundação, onde colonizam extensas áreas e apresentam elevadas taxas de produção primária (NEIFF, 1986; COSTA NETO et al. 2003).

### **2.3 Modelagem Ambiental**

Os problemas ambientais são, em geral, complexos e envolvem fenômenos não lineares para os quais nossos conhecimentos de matemática não são suficientes para a descoberta de uma solução. Contudo, o recurso usualmente utilizado para tais problemas ainda é a utilização de “modelos” matemáticos. A modelagem matemática tornou-se uma ferramenta rotineira no auxílio à solução de problemas ambientais, sendo usada com frequência em projetos que necessitem de prévia avaliação dos futuros impactos, como os de previsão e simulação de alterações das águas em cursos d’água, permitindo assim, otimizar o número de campanhas de amostragem necessárias ao estudo do comportamento dispersivo de um meio hídrico, revelando-se uma ferramenta útil na minimização de custos (CHRISTOFOLETTI, 2007).

Modelar é aplicar matemática à solução de problemas. É transformar um problema prático em um modelo matemático e buscar uma solução que possa ser aplicada na situação original. O objetivo de todo modelo é explicar o funcionamento de determinado sistema. A premissa básica de todo modelo, por mais complexo que possa ser, é que se trata de um método limitado de representar a natureza. Assim, todo modelo precisa ser testado, calibrado e depois validado (SMITH e SMITH, 2007).

Mesmo com a diversidade de aplicações, a modelagem de ecossistemas vem ganhando mais espaço, devido principalmente à crescente necessidade de respostas imediatas face a problemas globais que não podem ser analisados, explicados ou preditos sem uma ferramenta holística, que seja hábil para o trabalho com fenômenos ambientais complexos. Quanto aos recursos hídricos, Rosman (2009) reafirma a necessidade do uso dessa ferramenta.

A necessidade da aplicação de modelos para estudos, projetos e auxílio à gestão de recursos hídricos é inquestionável, face à complexidade do ambiente em corpos de água naturais, especialmente em lagos, reservatórios, estuários e zona costeira adjacente das bacias hidrográficas. Modelos são ferramentas integradoras, sem as quais dificilmente se consegue uma visão dinâmica de processos nestes complexos sistemas ambientais. (ROSMAN, 2009, p. 8)

A proposição e utilização de modelos estimulam a reflexão crítica sobre a criação, escolha, validação e uso desses modelos; desperta para o raciocínio e a pesquisa, levando à formulação de hipóteses e realização de observações. Assim, no campo da modelagem, não há um modelo absoluto e definitivo, mas sim uma aproximação contínua do problema real estudado. Há de se destacar também que existem várias formas de se produzir representações da realidade, vários tipos de representações, não só de objetos diferentes, mas também do mesmo objeto; é a partir de um modelo que se obtém uma imagem simplificada dos fatos; que um modelo pode ser aprimorado ou ser substituído por outro mais geral.

Os modelos matemáticos e computacionais compreendem inúmeras ferramentas que podem ser aplicadas no sentido de auxiliar na solução de problemas relacionados aos recursos hídricos, prevendo situações extremas de forma a serem obtidos avisos de sua ocorrência, magnitude e permanência. Modelos computacionais do tipo Elementos Finitos vêm sendo utilizados há muitos anos para a modelagem de estuários e regiões costeiras (CUNHA et al., 2008; PINHEIRO et al., 2008). O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original (PINHEIRO et al., 2008). Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para que sejam obtidos os resultados desejados (KOLDITZ, 2002).

Fragoso et al., (2009) apontam para o fato de que as equações diferenciais derivadas na formulação de modelos são simplificações matemáticas

de comportamentos reais. Elas expressam os mais importantes processos, com a finalidade de representar um determinado fenômeno. Em modelos ecológicos, geralmente estas equações estão em função do espaço e do tempo (variáveis independentes). Nesses casos, há dois métodos para resolver uma equação diferencial: analíticos e numéricos. Quando as equações em um modelo podem ser resolvidas algebricamente, o modelo é classificado como analítico. Mas como os problemas ecológicos são, geralmente, extremamente não-lineares, uma solução analítica nem sempre é possível (por exemplo, as equações de Navier-Stokes), tornando esse método um pouco limitado em problemas complexos. Nesses casos, são utilizados os métodos numéricos, os quais fornecem uma aproximação da solução verdadeira (dependendo dos critérios de convergência, consistência e estabilidade) (ROSMAN, 2009).

A seguir, será descrito, de forma sintética, os fundamentos dos modelos hidrodinâmicos.

### **2.1.1. Modelos Hidrodinâmicos**

Os modelos hidrodinâmicos são utilizados na hidráulica fluvial, ou na circulação da água em estuários, lagoas, baías, etc. São freqüentemente utilizados no intuito de fornecer dados sobre a variação do campo velocidades ao longo do tempo para os modelos de qualidade de água ou transporte de sedimentos, uma vez que esses fenômenos dependem de características hidrodinâmicas dos corpos d'água.

As equações que governam os processos de escoamentos em corpos d'água são deduzidas a partir da aplicação dos princípios básicos de leis de conservação da Mecânica dos meios contínuos: energia, massa e quantidade de movimento (TUCCI, 2005).

Dada a enorme dificuldade em incluir num mesmo ambiente todos os modelos disponíveis adequados ao estudo de diversos processos, é conveniente que, na escolha do modelo a ser utilizado, haja uma preocupação de tornar a seqüência do estudo a mais modular possível, de forma a possibilitar a integração de novos modelos com um mínimo de esforço. O Quadro 1 enumera os principais modelos atualmente utilizados na modelagem hidrodinâmica e suas características.

Quadro 2.1 – Relação de softwares utilizados em sistemas de modelagem hidrodinâmica.

Modelo	Características
<p>MOHID Water Modelling System.</p> <p><a href="http://www.mohid.com/">http://www.mohid.com/</a></p>	<p>MOHID é um sistema de modelagem tridimensional desenvolvido pelo MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center) no Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade Técnica de Lisboa.</p> <p>O sistema de modelagem MOHID permite a adoção de uma filosofia integrada de modelagem, não só de processos (físicos e biogeoquímicos), mas também de diferentes escalas (permitindo a utilização de modelos aninhados) e sistemas (estuários e das bacias hidrográficas), devido à adoção de uma filosofia de programação orientada a objeto. A integração de diferentes ferramentas MOHID (MOHID water, MOHID land e MOHID soil) pode ser usado para estudar o ciclo da água em uma abordagem integrada. Uma vez que estas ferramentas são baseadas no mesmo quadro, o acoplamento delas é facilmente alcançado. Também permite simular o escoamento resultante da interação entre ondas e marés e o transporte de sedimentos que lhe está associado.</p>
<p>Mike 21</p> <p><a href="http://www.dhigroup.com/Software/Marine/MIKE21.aspx">http://www.dhigroup.com/Software/Marine/MIKE21.aspx</a></p>	<p>MIKE 21 é um software profissional de engenharia para simulação de fluxos, ondas, sedimentos em rios, lagos, estuários, baías, zonas costeiras e mares. É um modelo 2D-H escrito pelo método de volumes finitos que permite a utilização de uma malha não estruturada, que se ajusta a diferentes escalas.</p>
<p>Aquasea</p> <p><a href="http://www.scientificsoftwaregroup.com/">http://www.scientificsoftwaregroup.com/</a></p>	<p>AQUASEA é um software para Windows, que usa o programa de elementos finitos para resolver problemas de fluxo em rios, estuários, zonas costeiras e lago, e problemas envolvendo transporte de calor e massa de sedimentos em suspensão. Desenvolvido em 1985, tem sido continuamente atualizado.</p> <p>O sistema possui interface gráfica que permite a construção de mapas em coordenadas longitudinais e latitudinais de distribuição dos parâmetros. Além de conter acoplado um modelo de fluxo hidrodinâmico e transporte de um modelo de dispersão. O modelo de fluxo AQUASEA pode simular as variações do nível da água e</p> <p style="text-align: right;">continua</p>

continuação

flui em resposta a várias funções forçando em lagos, estuários, baías e zonas costeiras. O modelo de transporte simula a propagação de uma substância no ambiente, sob a influência do fluxo de fluido e os processos de dispersão existente. A substância pode ser um poluente de qualquer espécie, conservativo ou não conservador.

Modelo MGB-IPH

O MGB-IPH é um modelo hidrológico distribuído desenvolvido para ser aplicado em grandes bacias, tendo sido elaborado durante tese de doutorado de Walter Collischonn no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS) e aperfeiçoado em sucessivos trabalhos e teses posteriores. O modelo é composto dos seguintes módulos: balanço de água no solo; evapotranspiração; escoamentos: superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula; escoamento na rede de drenagem.

QUESTS1D model

O modelo combina QUESTS1D um modelo hidrodinâmico ea qualidade da água para prever as concentrações de substâncias ao longo do tempo e do espaço. O modelo hidrodinâmico resolve equações de conservação de massa e força, e fornece previsões do nível de água e velocidade. O modelo de qualidade de água é baseado em equações de conservação de massa, incorporando os processos de advecção, difusão, decaimento e as interações entre os parâmetros. O modelo é unidimensional,

SisBAHIA – Sistema Base de  
Hidrodinâmica Ambiental

<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>

O SisBaHiA® é um sistema profissional de modelos computacionais desenvolvido pelo Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Os diferentes modelos que o compõem vêm sendo continuamente aperfeiçoados na COPPE/UFRJ. O uso e desenvolvimento contínuo do modelo já produziram desde 1987, 15 teses de Doutorado e 56 dissertações de Mestrado, além da participação em 110 projetos ambientais. É um sistema para modelagem de circulação hidrodinâmica e de transporte de escalares passivos em corpos de águas naturais. Oferece recursos para modelamentos de corpos de água com superfície livre sem estratificação vertical significativa, como rios, canais, lagos, lagoas, reservatórios, estuários, baías e águas costeiras. O sistema pode realizar os seguintes modelamentos:

- Circulação hidrodinâmica tridimensional (3D);
- Circulação hidrodinâmica promediada na vertical (2DH);
- Transporte Lagrangeano de contaminantes em qualquer faixa da coluna de água, inclusive flutuantes ou dissolvidos na coluna de água.

Esse modelo permite simular, por meio de animações, o percurso de poluentes e agentes passivos presentes na água, como oxigênio dissolvido, amônia e nitrato. O software da UFRJ realiza uma série de simulações que podem indicar quais os caminhos percorridos pela poluição, a partir de análises laboratoriais de amostras de água coletadas no campo. Todas as ações têm o objetivo de auxiliar o planejamento de estratégias de prevenção em regiões contaminadas por esgoto sanitário.

### **2.1.2. Modelos de transporte Lagrangeano**

A descrição Lagrangeana consiste em identificar certas partículas do fluido e a partir daí observar variações de propriedades tais como temperatura; velocidade; pressão; etc. ao longo do tempo, ou seja, necessita-se conhecer as propriedades das partículas à medida que estas se deslocam no espaço com o passar do tempo. Isto dificulta consideravelmente o estudo do escoamento. A outra forma, a Euleriana, apresenta vantagens por oferecer maior simplicidade com precisão satisfatória. (No método de Lagrange a medida deve acompanhar o escoamento – ex. balão de sondagem atmosférica) (ROSMAN, 2009).

Um modelo de transporte Lagrangeano advectivo-difusivo com reações cinéticas é útil para simular o transporte de escalares, tais como substâncias dissolvidas ou em suspensão, ou parâmetros de qualidade da água, e que possam estar bem misturados, ocupando apenas uma camada, ou flutuando na coluna d'água. Esse tipo de modelo é, na maioria das vezes, utilizado no estudo do transporte, relativamente local, de plumas ou nuvens de contaminantes originados a partir de fontes de pequena escala em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico (ROSMAN, 2009). O Modelo Lagrangeano permite a utilização de praticamente qualquer tipo de reação cinética de decaimento ou produção do contaminante sendo modelado, inclusive processos de sedimentação e curvas de decaimento fornecidas através de tabelas e valores.

O Modelo de Transporte Lagrangeano Probabilístico permite obtenção de resultados probabilísticos computados a partir de N eventos ou de resultados ao longo de um período de tempo "t". Alguns exemplos de resultados são a probabilidade de contato de plumas no litoral, probabilidade de passagem (ou de visita) de manchas ou plumas contaminantes, probabilidade de passagem de manchas ou plumas com concentração acima de um valor limite, probabilidade de passagem com tempo de vida inferior a um limite dado, etc. (ROSMAN, 2009).

Os problemas ambientais são, em geral, complexos e envolvem fenômenos para os quais a demanda de tempo e recursos, sejam humanos ou materiais não são suficientes ou não estão disponíveis (BONGANHA, 2005). O desenvolvimento cada vez mais célere de programas de computadores tem contribuído para propor e usar modelos matemáticos no estudo da degradação dos diversos ecossistemas (ARAÚJO, 2005). Infelizmente o ritmo de desenvolvimento de modelos não tem acompanhado a intensidade e abrangência da degradação ambiental.

As diferentes tipologias e classificações dos modelos ambientais permitem um amplo cenário de uso nos problemas ambientais decorrentes da degradação dos recursos naturais, contribuindo desta forma para proposição de novas leis e normas para seu uso e controle de sua qualidade; busca de novos instrumentos econômicos para controle de sua utilização e degradação; além da implementação de novas dinâmicas de gestão e novas formas de desenvolvimento, mas sem prejuízo aos sistemas ambientais (CHRISTOFOLETTI, 2007).

A complexidade dos ecossistemas exige a aquisição e monitoramento de inúmeros parâmetros que nem sempre são acessíveis ou demandam um intervalo de tempo muito grande para que possam constituir uma base de dados confiável, em termos de uma série histórica (BRAVO DE LA PARRA e POGGIALE, 2005). Como conseqüência, o desenvolvimento de modelos e uma melhor compreensão dos processos que regem a dinâmica dos sistemas podem ser úteis no desenvolvimento de cenários, apoio à gestão e suporte aos planos de manejo.

O uso de modelos ambientais aplicados a bacias hidrográficas confirmam a importância dessa ferramenta como subsídio à gestão da quantidade e qualidade da água afetada por desastres ecológicos, transportes, urbanização, conflitos ambientais e má utilização dos recursos hídricos (SANSONOWSKI, 2003; AMARAL, 2003; ROCHA, 2007).

Segundo Fragoso Jr, et al (2009) as etapas da modelagem utilizada para construir um modelo quantitativo tem uma orientação metodológica a ser seguida. Existem inúmeros métodos com diferentes números de etapas; contudo, o importante é que cada método contemple os objetivos específicos do problema. Diferentes objetivos necessitam de diferentes escalas espaciais e temporais. Segundo os autores acima citados, podemos resumir oito importantes etapas das quais algumas são bastante genéricas e podem ser tratadas particularmente por cada modelo: definição do problema (seleção da complexidade); associação do problema no tempo e no espaço e subsistemas; aquisição de dados; simplificação e formulação de hipóteses (conceitual); dedução do modelo matemático (equações); resolução do problema matemático; uso, e calibração e validação do modelo. Esta compreensão tem reflexos, por exemplo, quando da elaboração do Plano Diretor do Município que deverá orientar os diferentes atores sociais quanto às mudanças de atitudes gerenciais objetivando o desenvolvimento sem, contudo, degradar os bens naturais (MACAPÁ, 2004).



### **3. ÁREA DE ESTUDO**

#### **3.1. Introdução**

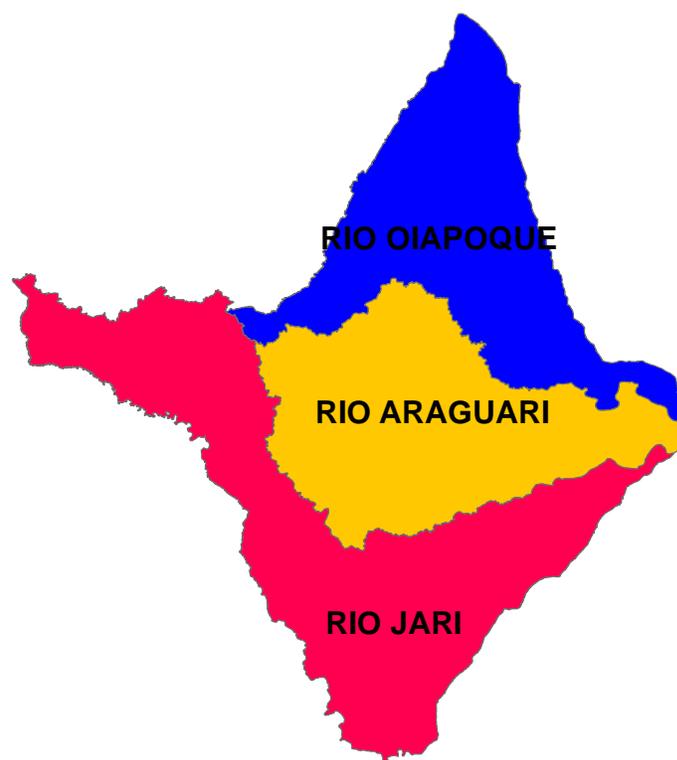
Este capítulo apresenta aspectos relevantes da bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza. A dinâmica ambiental atuante sobre esse ecossistema é dependente de vários processos químicos, físicos e biológicos que atuam simultaneamente sobre toda sua extensão, com conseqüências nas áreas de entorno. No entanto, em razão da disponibilidade de dados e do tamanho da escala dos fenômenos observados, a área de estudo está limitada ao canal principal do igarapé da Fortaleza no trecho compreendido entre a foz e o Gruta.

A bacia hidrográfica é considerada a unidade espacial de planejamento mais apropriada para o presente estudo. Primeiro por está previsto em Lei (AMAPÁ, 2002) e também por permitir a integração natural de informações sobre a bacia como um todo. Na bacia é onde ocorrem as práticas de uso e ocupação do solo e da água (balanço hídrico) e a organização das comunidades residentes nestas áreas (AGUIAR e SILVA, 2003; CUNHA e COUTO, 2002).

No entanto, para usar esta área geográfica como unidade de planejamento é necessário dar atenção especial à escala da análise envolvida. Assim, para facilitar o entendimento do processo dinâmico de uso e ocupação das bacias hidrográficas é comum utilizar-se de bacias hidrográficas de tamanho menor, conhecidas como microbacias (KOBAYAMA e MOTA, 2008).

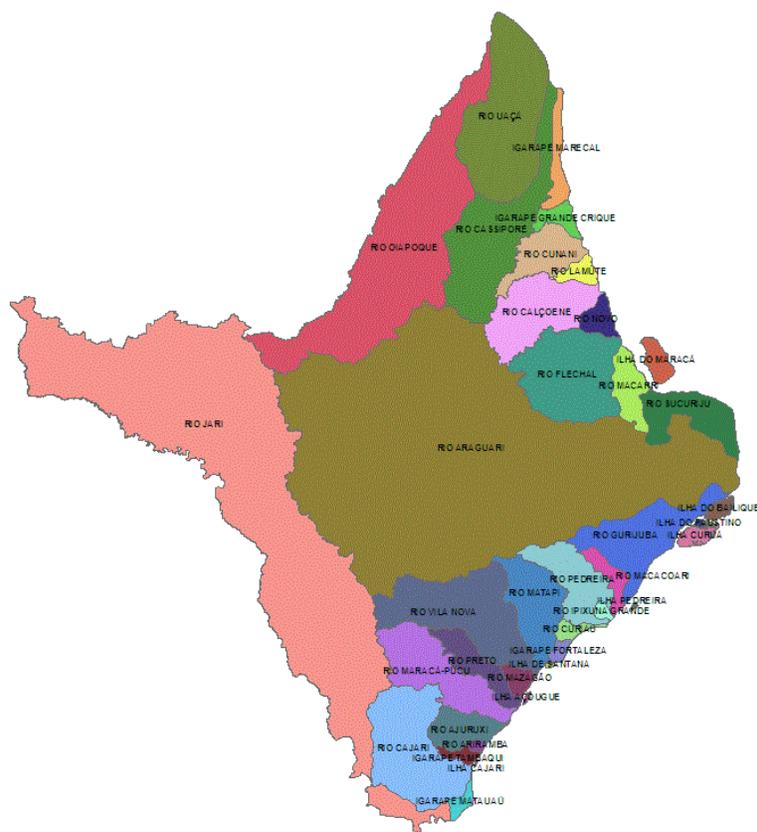
O Estado do Amapá apresenta uma rica rede de drenagem e bacias hidrográficas. Seus rios mais extensos são o Jari, o Oiapoque e o Araguari, que correm diretamente para o oceano Atlântico. O Jari é principal tributário do rio Amazonas e o Oiapoque corre na fronteira com a Guiana Francesa. Segundo a classificação da Agência Nacional de Águas (BRASIL, 2009), o Amapá pertence à

região hidrográfica Amazônica, e apresenta três regiões hidrográficas: rio Jarí, rio Oiapoque e rio Araguari (Figura 3.1).



**Figura 3.1 – Regiões hidrográficas do Estado do Amapá**

De acordo com o Macrodiagnóstico do Estado do Amapá (2008), o estado é constituído por 34 bacias das quais 28 são continentais e 6 insulares. A bacia hidrográfica do rio Araguari é a maior e mais importante do Estado, devido o seu potencial hidro-energético, No entanto, outras bacias menores também se destacam em razão da sua localização e função. A bacia do igarapé da Fortaleza ocupa uma área de 190,829 km<sup>2</sup> que corresponde a 0,14% da área do estado (Figura 3.2).



Legenda	
IGARAPÉ FORTALEZA, 190,829	RIO CUNANI, 1749,809
IGARAPÉ GRANDE CRIQUE, 521,618	RIO CURIAÚ, 300,977
IGARAPÉ MARECAL, 810,802	RIO FLECHAL, 4618,863
IGARAPÉ MATAUAÚ, 283,027	RIO GURIJUBA, 3367,719
IGARAPÉ TAMBAQUI, 253,89	RIO IPIXUNA GRANDE, 139,858
ILHA AÇOUGUE, 25,116	RIO JARI, 30471,659
ILHA BRIGUE, 23,979	RIO LAMUTE, 442,56
ILHA CAJARI, 7,796	RIO MACACOARI, 629,893
ILHA CURUÁ, 345,449	RIO MACARRI, 1164,734
ILHA DE SANTANA, 20,288	RIO MARACÁ-PUCU, 3394,879
ILHA DO BAILIQUE, 231,46	RIO MATAPI, 2540,356
ILHA DO FAUSTINO, 35,411	RIO MAZAGÃO, 399,756
ILHA DO MARACÁ, 521,01	RIO NOVO, 586,936
ILHA PEDREIRA, 16,537	RIO OIAPOQUE, 12489,816
RIO AJURUXI, 1256,364	RIO PEDREIRA, 2217,371
RIO ARAGUARI, 41922,055	RIO PRETO, 1384,855
RIO ARIRAMBA, 101,699	RIO SUCURIJU, 2163,756
RIO CAJARI, 4921,916	RIO UAÇÁ, 6490,846
RIO CALÇOENE, 3465,54	RIO VILA NOVA, 5063,839
RIO CASSIPORÉ, 5464,414	

Figura 3.2 – Bacias Hidrográficas do Estado do Amapá.

Para Guerra et al. (2005), o levantamento dos dados ambientais referentes a uma bacia hidrográfica ser estudada deve contemplar diferentes variáveis ambientais, tais como a topografia, rede de drenagem e vegetação. Estas características devem estar integradas a outros fatores como condições de uso e ocupação do solo, permitindo assim a realização do planejamento ambiental mais eficiente.

Em Macapá, o saneamento básico é precário e não atinge a maioria da população. Segundo estudo realizado pela ONG (Organização Não-Governamental) Trata Brasil em cooperação com a Fundação Getúlio Vargas, o município de Macapá, no período de 2003 a 2007, ocupou a 70ª posição, dentre as 79 maiores cidades do país estudadas (TRATA BRASIL, 2008) (Tabela 3.1). Esse dado é preocupante se considerarmos que em função da localização privilegiada – às margens do rio Amazonas – os custos com a oferta e distribuição de água e tratamento de esgoto é menor que em outras cidades. Um dos entraves que concorre para a baixa oferta de esgoto sanitário em Macapá é o fato de que quase 20% da população urbana residir em áreas de ressacas (NERI, 2004; TAKIYAMA, 2003), onde pela própria característica do solo inviabiliza qualquer tentativa de construção de uma rede de esgoto.

Tabela 3.1 – Ranking parcial das cidades avaliadas quanto ao saneamento básico no período de 2003 - 2007

Município	População	Operador	2003	2004	2005	2006	2007	Posição
Franca - SP	319 094	SABESP	25	4	3	3	1	<b>1</b>
Uberlândia - MG	608 369	MUNICIPIO	51	1	1	1	2	<b>2</b>
Sorocaba - SP	559 157	MUNICIPIO	46	18	6	4	3	<b>3</b>
Santos - SP	418 288	SABESP	34	40	11	5	4	<b>4</b>
Jundiaí - SP	342 983	MUNICIPIO	50	3	2	2	5	<b>5</b>
São Luís - MA	957 515	CAEMA	17	51	49	61	48	<b>48</b>
Teresina - PI	779 939	AGESPISA	37	54	54	68	66	<b>66</b>
Ananindeua - PA	484 278	COSANPA	62	75	73	75	67	<b>67</b>
Manaus - AM	1 646 602	PRIVADO	68	73	72	69	68	<b>68</b>
<b>Macapá - AP</b>	<b>344 153</b>	<b>CAESA</b>	<b>47</b>	<b>78</b>	<b>71</b>	<b>70</b>	<b>70</b>	<b>70</b>
Belém - PA	1 408 847	COSANPA	38	70	68	66	74	<b>74</b>
São Gonçalo - RJ	960 631	CEDAE	48	61	60	79	79	<b>79</b>

Fonte: TRATA BRASIL: Saneamento, Saúde e o Bolso do Consumidor, 2008 (adaptado)

Mesmo não apresentando o “ranking” completo do estudo realizado pelo Instituto Trata Brasil, a Tabela 3.1 indica que Macapá praticamente não teve sua posição alterada nos últimos três anos do estudo. Mostra, também, que as cidades da região norte (região com maior disponibilidade de água) ocupam as últimas posições quanto à qualidade sanitária.

### **3.2. A Bacia Hidrográfica do Igarapé da Fortaleza**

De acordo com a Carta Ambiental (SILVA, 2005) da bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza, o igarapé que nomeia a localidade é também o curso d'água principal que denomina sua bacia hidrográfica. Possui uma extensão de 27,3 km com a nascente localizada às proximidades do bairro/loteamento Sol Nascente, ao norte da capital, Macapá. Por toda a sua extensão, o igarapé da Fortaleza (Figura 3.3) atravessa áreas de ressacas e florestas de várzea desembocando no rio Amazonas (SANTANA, 2006).

O bairro do Buritizal, na porção sudoeste de Macapá é uma espécie de corredor de acesso do conjunto de áreas de ressacas que iniciam um curso que parte do Canal do Jandiá, na zona norte da capital, atravessa a cidade de norte a sudoeste, alcançando até o município de Santana, mais precisamente o próprio igarapé da Fortaleza, desembocando no Canal do Norte do Rio Amazonas.



Figura 3.3 - Trecho do curso d'água do igarapé da Fortaleza (AP), cuja extensão é de 27,3 km.

Até as proximidades do bairro Congós (distante 12 km da Foz), o igarapé tem, em seu baixo curso, um leito relativamente bem definido em meio a uma floresta de várzea que, de forma gradativa, é substituído por um conjunto de buritizeiros (*Mauritia flexuosa*). No decorrer de sua extensão, o igarapé atravessa uma área onde predomina um tipo de vegetação herbácea característica das áreas de ressacas que dificulta a identificação do seu leito principal.

As nascentes das drenagens apresentam um grande número de buritizeiros em solos hidromórficos, sendo que no seu entorno predomina a floresta de terra firme com uma diversidade de árvores de aproximadamente 20 metros de altura. A Figura 3.4 mostra a vista da ponte sobre o igarapé em direção à Foz. A partir da visão da Figura, observa-se o ancoradouro do igarapé (pequeno porto) onde ocorre uma intensa movimentação de pequenas embarcações trazendo produtos como o açaí e camarão para serem comercializados nos municípios de Macapá e Santana (CUNHA e COUTO, 2002).



Figura 3.4 - Ancoradouro do igarapé da Fortaleza com embarcações de variados portes.

## **Localização**

A Bacia Hidrográfica está situada entre as latitudes 479556 e 498102 e longitude 9993196 e 10011749. Limita-se ao norte pela zona de ressacas denominada Ilha Mirim, Ilha Redonda e Comunidade Casa Grande, estendendo-se até o bairro Infraero e rodovia Duca Serra (AP 070). Ao sul, pelo Rio Amazonas, ao leste pelo município de Macapá e a oeste pelo município de Santana.

### **3.2.1. Características fisiográficas**

As características físicas de uma bacia hidrográfica são elementos que dão noção do comportamento hidrológico da mesma. Utilizou-se o software ARCGIS 9.2 (ESRI, 2007) para calcular os valores fisiográficos da bacia

hidrográfica do igarapé da Fortaleza, como área, perímetro, coeficiente de compacidade, fator de forma, índice de circularidade, densidade de drenagem, ordenamento dos canais e também para confecção dos mapas de declividade e hipsométrico.

Os dados para confecção dos mapas contidos no estudo foram fornecidos pelo Coordenação de Geoprocessamento (COGEO) da Secretaria de Meio Ambiente do estado do Amapá (SEMA) (<http://www.sema.ap.gov.br>). As bases cartográficas digitais estão no formato vetorial shapefile (.shp) e matricial raster (.GRID/.TIN). A Base de Dados Geográficos dessa fonte apresenta, geralmente, dados cartográficos temáticos na escala 1:100.000 e sistema de projeção UTM (Universal Transversa de Mercator), zona 22 S. As imagens utilizadas no trabalho foram as imagens Landsat 5 disponibilizadas e georeferenciadas pela SEMA, com o tamanho do grão de 30 m x 30 m.

Foram utilizadas as cartas cartográficas NA-22-Y-D e SA-22-V-B na escala 1:250.000 (MIRANDA, 2005) para confecção do mapa hipsométrico. No georeferenciamento adotou-se como sistema de projeção, o Universal Transversa de Mercator - UTM, tendo como datum horizontal o SAD 69, zona 22 sul, meridiano central 51°.

### **Área e Perímetro**

Segundo Tucci (1997), a área da bacia é fundamental para definir a sua potencialidade hídrica. Apresenta grande importância na sua resposta hidrológica, pois, se desconsiderarmos os outros fatores, quanto maior a área, menos pronunciados serão os picos de enchentes, pois maior será o tempo para que toda a bacia contribua de uma só vez. Os limites da bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza foram obtidos a partir do arquivo "bacia\_hidrográfica.shp". Os valores geométricos encontrados foram: área (A) de 190,829 km<sup>2</sup> e perímetro (P) de 66,053 km.

Quanto à classificação das áreas das bacias hidrográficas, segundo Wisler e Brater (1964), pequenas bacias são as que possuem área inferior a 26

km<sup>2</sup> e grandes bacias com área superior a esse valor. Cunha (2003) refere-se à bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza como uma micro-bacia ao considerar sua área de abrangência segundo um critério eminentemente político e administrativo regional (onde ocorrem grandes bacias).

### Forma da Bacia

A forma da bacia é uma característica importante devido ao tempo de concentração, ou seja, o tempo a partir do início da precipitação, necessário para que toda a bacia contribua na seção em estudo. Alguns coeficientes relacionados ao tempo de concentração podem ser elencados:

- *Coefficiente de Compacidade (Kc)*: é a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia. A tendência à enchente de uma bacia será tanto maior quanto mais próximo da unidade for esse coeficiente. Um coeficiente igual à unidade corresponderia a uma bacia circular, pois maior será a possibilidade de toda a área estar contribuindo de uma só vez (VILELLA e MATTOS, 1975) (Equação 1).

$$Kc = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} = 0,28 \cdot \frac{66,053}{\sqrt{190,823}} = 1,34 \quad (1)$$

- *Fator de Forma (Kf)*: É a relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia. Mede-se o comprimento da bacia (L) quando se segue o curso d'água mais longo desde a desembocadura até a cabeceira mais distante na bacia. A largura média (Lm) é obtida quando se divide a área pelo comprimento da bacia (Equação 2).

$$Kf = \frac{A}{L^2} = \frac{190,823}{64^2} = 0,046 \quad (2)$$

Segundo Villela e Mattos (1975), uma bacia com um fator de forma baixo é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho, porém com fator de forma maior.

### **Ordem dos cursos de água**

A ordem dos cursos d'água reflete o grau de ramificação ou bifurcação dentro de uma bacia. A ordem dos cursos de água pode ser determinada seguindo os critérios introduzidos por Horton (1945) e Strahler (1957).

Utilizou-se neste trabalho a classificação apresentada por Strahler, em que os canais sem tributários são designados como de primeira ordem. Os canais de segunda ordem são os que se originam da confluência de dois canais de primeira ordem, podendo ter afluentes também de primeira ordem. Os canais de terceira ordem originam-se da confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber afluentes de segunda e primeira ordens, e assim sucessivamente (SILVEIRA, 2001). A junção de um canal de dada ordem a um canal de ordem superior não altera a ordem deste. Em razão dos “poucos” tributários observados na análise da bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza, esta se apresenta como uma bacia de 2ª ordem, sendo o igarapé da Fortaleza seu principal curso d'água.

### **Densidade de drenagem (Dd)**

O sistema de drenagem é formado pelo rio principal e seus tributários. Seu estudo indica a maior ou menor velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica, Assim, o índice que indica o grau de desenvolvimento do sistema de drenagem, fornece uma indicação da eficiência da drenagem da bacia, sendo expressa pela relação entre o somatório dos comprimentos de todos os canais da rede – sejam eles perenes, intermitentes ou temporários – e a área total da bacia.

Varia de 0,5 Km/Km<sup>2</sup> para as bacias de drenagem pobre, a 3.5 ou mais, para bacias excepcionalmente bem drenadas.

Determinou-se o índice de drenagem da bacia utilizando a Equação 3:

$$Dd = \frac{\sum l}{A} = \frac{158,06}{190,823} = 0,828 \quad (3)$$

Em resumo, a bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza apresenta uma forma alongada, com coeficiente de compacidade de 1,34, fator de forma de 0,046. A forma mais alongada da bacia indica que ela é pouco sujeita a enchentes, pois a precipitação pluviométrica sobre ela se concentra em diferentes pontos, concorrendo para amenizar a influência da intensidade de chuvas, as quais poderiam causar maiores variações da vazão do curso d'água.

A densidade de drenagem é da ordem de 0,828 km/km<sup>2</sup>. De acordo com Villela e Mattos (1975), são classificadas como uma bacia de drenagem pobre. Por ser uma bacia de 2<sup>a</sup> ordem, apresenta-se “pouco ramificada”. Seus cursos de água são perenes com canais bem definidos, predominando a forma dendrítica. Na Tabela 6 são apresentados os valores dos principais índices físicos da Bacia.

Tabela 3.2- Índices físicos da Bacia Hidrográfica do igarapé da Fortaleza

Área (Km <sup>2</sup> )	190,823
Perímetro (km)	66,063
Coeficiente de compacidade	1,34
Fator de Forma	0,046
Comprimento do Rio Principal (km)	27,52
Comprimento total de rios (Km)	158,06
Densidade de drenagem (Km/Km <sup>2</sup> )	0,828

## Hipsometria

Em geral a bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza apresenta baixas altitudes que não ultrapassam os 50 metros. A precipitação varia de 1.600 mm anuais a 800 mm, de leste para oeste, e as temperaturas variam em torno de 26°C espacialmente. A Figura 3.5, mostra as pequenas variações do relevo em toda a extensão da bacia hidrográfica.

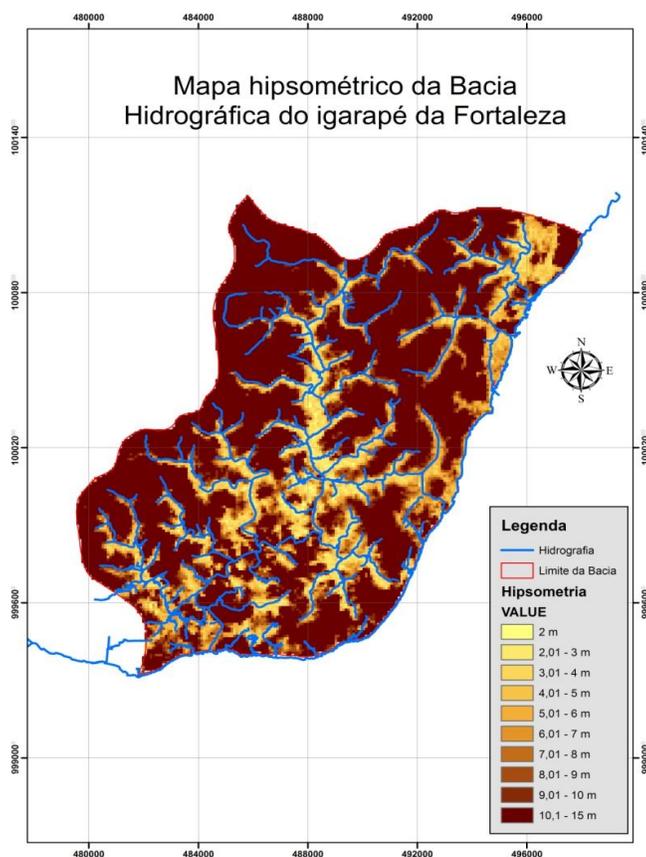


Figura 3.5 - Mapa hipsométrico da bacia do igarapé da Fortaleza com cotas entre 3 a 15 m.

Fonte: Adaptado de MIRANDA, 2009.

O mapa hipsométrico é bastante usual, pois suas cores representam as classes de altitude tornando de fácil leitura e interpretação para qualquer tipo de usuário. Assim, optou-se por confeccionar um mapa que representasse a divisão do relevo da bacia em apenas 10 classes, divididas de 1 em 1 metro.

O uso de informações do Modelo Digital de Elevação (MDE) para a bacia do igarapé Fortaleza e seu mapa hipsométrico fornecem informações importantes quanto a declividade do terreno e a suscetibilidade a enchentes, tornando-se uma ferramenta de visualização simples e decisiva na avaliação do comportamento da bacia quanto à hidrografia e escoamento da precipitação (SANTOS, 2001).

### **Unidades ecológicas**

Em termos de unidades ecológicas, além das ressacas, ocorrem também, florestas de várzea, matas de terra firme e cerrado (CUNHA e COUTO, 2002). A Tabela 3.3 mostra a distribuição dessas unidades expressas em km<sup>2</sup> e em percentual considerando a área total da bacia hidrográfica.

Tabela 3.3 - Extensões das áreas das unidades fito-ecológicas na bacia hidrográfica do igarapé Fortaleza

<b>Unidade Ecológica</b>	<b>Extensão (em km<sup>2</sup>)</b>	<b>% em relação a área da bacia</b>
Ressaca	36,6	18,9
Mata de terra firme	21,8	11,4
Floresta de várzea	12,1	6,3
Cerrado	9,2	4,7

Fonte: SILVA et al. 2005

### **Clima e Precipitação**

O estudo hidrológico de uma bacia deve conter a análise das suas características térmicas, sobre as quais se deverão obter observações de trocas de calor entre solo e atmosfera, superfície da água e atmosfera, etc. A localização geográfica da bacia hidrográfica é determinante das suas características térmicas. Devido à baixa latitude e altitude a bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza

apresenta uma temperatura média de 26,6 °C, com variação média de apenas 2,2 °C.

Devido sua localização próxima à linha do equador, o clima na bacia hidrográfica do igarapé da Fortaleza é quente e úmido. Os totais pluviométricos, superiores a 2.500 mm, distribuem-se em dois períodos distintos: um chuvoso, de janeiro a junho, com uma máxima de 403 mm em março e outro menos chuvoso, nos meses restantes, quando ocorre um mínimo de 26 mm em outubro (SOUZA et al, 2009, SOUZA e CUNHA, 2010). Em média, no período chuvoso incidem mais de 85% das precipitações registradas anualmente. A variação anual da temperatura é muito pequena (+/- 2 °C). A Figura 3.6 apresenta as normais climatológicas para o município de Macapá, onde está localizada a Bacia.

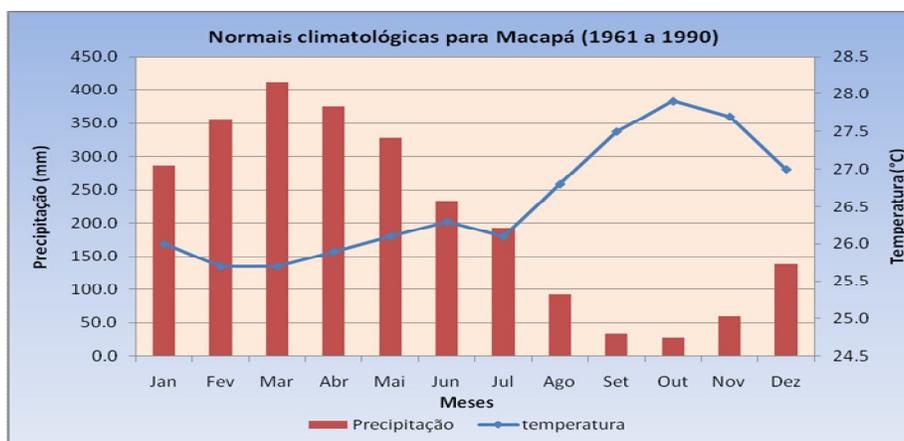


Figura 3.6 - Normais climatológica da precipitação e temperatura média do ar para Macapá entre 1969 e 1990.

Fonte IHMET - IEPA

Segundo Souza et al (2009), a característica intrínseca do clima da Amazônia é a presença de um ampla espectro de variações no tempo e no espaço da atividade convectiva tropical e da precipitação, as quais se tornam as variáveis climáticas mais importantes da região.

De acordo com Souza e Cunha (2010), alguns dos mecanismos climáticos moduladores de chuva acima ou abaixo do normal no Amapá é a composição das anomalias da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nos

Oceanos Pacífico e Atlântico e as fases do Dipolo de Temperatura no Atlântico Tropical (positivo e negativo), correspondentes aos eventos de chuva acima do normal associadas ao fenômeno El Niño (aquecimento com anomalias negativas de precipitação) /La Niña (anomalias positivas de precipitação). Os referidos autores, por meio de uma análise estatístico-observacional e usando bases de dados com séries históricas dos últimos 32 anos, discutem em detalhes os aspectos climatológicos do regime espaço-temporal da precipitação em todo o Estado do Amapá. Também acrescentam uma análise dos termos sazonais, onde o período mais seco (chuva trimestral abaixo de 200 mm) ocorre na primavera (setembro a novembro) e o mais chuvoso (chuva trimestral acima de 1.000 mm) ocorre no outono (março a maio).

### **Hidrografia e Marés**

A rede hidrográfica é formada: i) pela Lagoa dos Índios, ii) por áreas de ressacas, sendo as maiores a do Beírol e Chico Dias e iii) pelo igarapé da Fortaleza, curso principal entre a Lagoa e o Rio Amazonas e para o qual convergem todas as ressacas que ocorrem entre Macapá e Santana. São afluentes do igarapé da Fortaleza, pela margem direita, os igarapés: Cajueiro, Baisca Grande, Biscuga, Zacarinho, Seringueira, Zacaria, Funil, Tabatinga, Arco, Limão, Davi, Mucajá, Provedor, Abacate e Tracuá. Pela margem esquerda: Castaninho, Braço Grande, Urubu, Igarapé da Volta, Almeirim, Juçara, Sororoca, Taboca, Bati Bota, Cacau, Gafanhoto, Pau-mulato e Aracu (CUNHA e COUTO, 2002).

Segundo Silva (2003), o igarapé da Fortaleza possui profundidades variando de 1 m até 6 m, apresentando condições de navegabilidade para pequenas embarcações durante todo o ano em seu trecho compreendido entre a Foz e o Gruta. Neste trecho o canal apresenta margens com declividade suave e pouca variação em sua largura. No trecho compreendido à jusante do igarapé do

Provedor o canal principal quase não apresenta variação em sua profundidade, que em média é de 3 m. No restante de seu percurso até à montante, o igarapé da Fortaleza é caracterizado por profundidade que não superam 1 m, sendo que a partir da localidade conhecida como Lagoa dos Índios até chegar ao Infraero não há dados sobre o seu comportamento, mas aparentemente não ultrapassa 0,5 m de profundidade em média.

A amplitude de maré média anual, no ano de 2001, para o Porto de Santana, foi de 2,71 m (baixa-mar média de 0,50 m e preamar média de 3,10 m) (OLIVEIRA, 2001). A propagação da maré em estuários envolve um processo advectivo intenso numa região de topografia muitas vezes bastante complexa, cujas características são importantes para obter as relações e diferenças de fase entre a propagação da onda, a corrente de maré e a variação das características da qualidade da água (normalmente a salinidade) e, como subproduto, a distância de penetração da maré (excursão da maré) (MIRANDA et al., 2002).

Segundo Miranda et al (2002), a teoria mais elaborada sobre a propagação da maré num canal, considerando-se a maioria dos fatores importantes, foi desenvolvida por Poincaré em 1910. Nestes termos, estudou-se a dinâmica das correntes de maré levando-se em conta o efeito do atrito interno. Como a profundidade dos estuários é muito pequena, quando comparada ao comprimento de onda da co-oscilação da maré, a natureza desse movimento oscilatório é o de uma onda de gravidade longa ou de águas rasas, cujo comportamento dinâmico é diferente daquele de uma onda curta.

Algumas equações clássicas que descrevem a deformação da superfície livre e a velocidade são representadas pelas classicamente como de uma onda progressiva (perfil da onda movimenta-se horizontalmente) no canal de seção transversal, com velocidade de propagação de fase (celeridade), dada pela Equação 4:

$$C_o = \sqrt{g.H_o} \quad (4)$$

Onde  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m^2/s$ ) e  $H_o$  (m) é a altura nas respectivas fases (inclusive sizígia e/ou quadratura). As possíveis soluções para as equações clássicas de uma onda progressiva são as funções harmônicas:

$$\eta(x, t) = \eta_o \cos(kx - \omega t + \Phi) \quad (5)$$

Onde  $\Phi$  é um arco da primeira determinação positiva,  $0 \leq \Phi \leq 2\pi$ , que pode ser determinado a partir das condições iniciais e de contorno.  $\eta$  é a elevação da superfície livre da água. Como o problema é linear, a solução para a velocidade, também é representada analiticamente pela mesma de dependência harmônica, como na Equação 6:

$$u(x, t) = U_o \cos(kx - \omega t + \Phi) \quad (6)$$

$$u(x, t) = \frac{\eta_o C_o}{H_o} \cos(kx - \omega t + \Phi) \quad (6a)$$

$$u(x, t) = \frac{\eta_o C_o}{H_o} \eta(x, t) \quad (6b)$$

Onde  $U_o$  é a amplitude de velocidade a ser determinada calculando-se as derivadas primeiras em relação às variáveis  $t$  e  $x$ , respectivamente, e combinando-se o resultado com a equação da continuidade (conservação da massa nos volumes de controle).

A Tabela 3.4 mostra o período, a amplitude e a fase das 35 constantes harmônicas de maré, obtidas a partir da análise de séries temporais da Estação Maregráfica de Santana (EMSAN). Este conjunto de constituintes harmônicos será utilizado como condição no contorno aberta do modelo hidrodinâmico do SisBAHIA.

Tabela 3.4 – Constantes harmônicas obtidas a partir dos dados da Estação Maregráfica de Santana (AP) no período de 01/01/2009 a 04/03/2009.

Constante	Período (s)	Amplitude (m)	Fase (rad)
Mm	238.071.336.488.837	0.0385	0.376
MSf	127.572.142.312.253	0.2177	1.085
alpha1	10.466.159.882.995	0.0185	2.769
2Q1	10.082.240.076.133	0.0033	4.735
Q1	9.672.608.376.243	0.0112	5.769
O1	9.294.963.009.972	0.0198	5.563
M1	8.939.969.357.361	0.1266	0.447
K1	8.616.409.057.816	0.0241	4.225
J1	8.315.451.628.312	0.0205	5.048
OO1	8.030.186.721.024	0.0256	2.460
KQ1	7.768.165.186.442	0.0113	5.908
MNS2	4.725.816.272.228	0.0129	2.720
mu2	4.633.832.735.217	0.0979	3.069
N2	4.557.005.357.246	0.3177	0.271
M2	4.471.416.431.338	0.1869	6.147
L2	4.388.983.274.042	0.5306	5.223
S2	4.320.000.001.728	0.2445	2.994
KJ2	4.231.627.820.368	0.1007	0.758
MO3	3.019.069.066.682	0.0147	1.307
M3	2.980.944.288.793	0.0085	1.661
MK3	2.943.770.382.038	0.0206	5.397
SK3	2.877.374.002.598	0.0318	5.339
MN4	2.256.902.602.606	0.0532	2.504
M4	2.235.708.217.057	0.0969	1.601
SN4	2.217.669.400.332	0.0786	5.387
MS4	2.197.202.138.947	0.0635	1.404
S4	2.159.999.999.568	0.0056	4.250
2MK5	1.775.116.877.578	0.0064	0.820
2SK5	1.727.054.296.292	0.0099	1.422
2MN6	1.499.862.199.535	0.0133	1.292
M6	1.490.472.144.396	0.0035	0.152
2MS6	1.473.259.512.973	0.0121	5.433
2SM6	1.456.439.901.535	0.0093	0.747
3MK7	1.270.670.687.471	0.0059	5.452
M8	1.117.854.108.182	0.0061	0.836

Segundo Miranda et al., (2002), a superfície dos estuários oscila verticalmente forçada por um grande número de processos distintos. Nas escalas temporais compreendidas entre segundos e um ano, as principais forçantes são as ondas de gravidade superficiais, a co-oscilação das marés, a tensão de cisalhamento do vento, variações temporais na descarga dos rios e na pressão atmosférica, bem como a co-oscilação com o levantamento pelo vento que ocorre na plataforma continental adjacente ao estuário. Os instrumentos que medem as variações temporais no nível do mar no domínio de alta frequência são denominados de marégrafos. Tais instrumentos são instalados em estações costeiras, situadas nas margens, ou fundeados, rigidamente presos ao fundo do estuário (bóias ou acústico).

### **3.2.2. Aspectos Biológicos**

As ressacas são bacias de acumulação de águas influenciadas pelo regime de marés, de rios e drenagens pluviais. As águas do Rio Amazonas penetram primeiro nos igarapés e através destes chegam às ressacas. São alagadas na época de chuvas e quando sofrem influência das marés de sizígias. No período de estiagem, quase secam ou mesmo secam em certos trechos, tomando-se bastante susceptíveis a focos de queimadas nas áreas planas.

Em inventário apresentado por Costa Neto et al. (2003) identificou-se 45 famílias, 88 gêneros e 129 espécies florísticas. Sendo a Cyperaceae a família de maior riqueza, com 9 gêneros e 20 espécies, seguida da família Poaceae, com 9 gêneros e 16 espécies; Fabaceae, com 9 gêneros e 10 espécies; Rubiaceae, com 5 gêneros e 7 espécies; Lentibulariaceae e Onagraceae, com 1 gênero e 5 espécies. As espécies dominantes foram: *Eleocharis intexticta* (Vahl) Roem. e Schult (piripiri), *Thalia geniculata* L. (sororoca), *Sagittaria rhombifolia* Cham. (chapéu-de-couro), *Montrichardia arborescens* Schott. (aninga) e *Mauritia flexuosa* L. f. (buriti), sendo que as duas últimas espécies formam populações isoladas no

entorno das ressacas. As aningas são formadoras de ilhas aluviais e furos de canais que são responsáveis pela filtração das águas do estuário amazônico.

As macrófitas aquáticas somam 4% epífitas, 6% flutuantes, 11% emergentes ou anfíbias, 12% submersas, 18% somente emergentes e 49% somente anfíbias, sendo que estas últimas se localizam em ecótonos e, portanto têm adaptações tanto para o meio ambiente aquático quanto para o terrestre.

As espécies flutuantes e submersas normalmente estão localizadas nos canais ou em suas margens, onde a profundidade é maior e nunca secam no período de seco (de setembro a novembro). E, dentre estas, podemos citar as Utricularias, Pontederias e Cabombas. As emergentes localizam-se em áreas mais altas, em solos alagáveis ou raramente seco, assim como as anfíbias. Estas últimas, muitas vezes são espécies de transição do cerrado (tais como *Polygala variabilis*, *Piriqueta cistoides*, *Rhynchantera serrulata* e *Chamaecrista diphylla*), da várzea (tais como *Macrolobium multijugum*, *Heliconia bihai* e *Inga* sp), e da terra firme (tais como *Ficus catappaefolia* e *Ouratea* sp). (COSTA NETO et al., 2003)

Quanto à ictiofauna da bacia, Gama e Halboth (2003) realizaram coletas na bacia e encontrou um total de 33 morfoespécies de peixes, com uma forte dominância qualitativa da espécie *Hyphessobrycon* sp2. As outras espécies encontradas, em sua maioria, apresentam abundância muito menor o que também faz com que os valores de equitabilidade sejam baixos, mostrando que grande parte das espécies se distribui homogeneamente, em pequeno número, e poucas espécies dominam, com grandes freqüências. Este padrão pode também indicar características de ambientes alterados, com predominância de uma ou poucas espécies em relação às demais.

A bacia hidrográfica do igarapé Fortaleza (Figura 3.7), uma das menores do estado do Amapá, com 193 km<sup>2</sup> de superfície, abriga a maior parte das duas principais cidades do estado – Macapá, a capital, e Santana. A população, projetada pelo IBGE para 2003, vivendo nessa bacia é de 408 mil ([www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)), o que equivale a uma densidade populacional de 2114 hab/km<sup>2</sup>, bastante divergente da realidade do estado que apresenta uma

densidade de 3,7 hab/km<sup>2</sup>. Isso faz dessa bacia uma das mais pressionadas no aspecto ambiental, com problemas relacionados principalmente à ocupação habitacional de áreas úmidas que são de grande fragilidade natural, além de degradação da qualidade dos recursos hídricos, desmatamentos de matas ciliares, perda de recursos da biodiversidade, entre outros (SILVA et al., 2005)



Figura 3.7 - Imagem de satélite, com a delimitação da Bacia do igarapé da Fortaleza, destacando o trecho do canal principal em amarelo, entre a Foz e o Gruta, obtida em julho de 2008.

A primeira etapa dos trabalhos previstos para o desenvolvimento do estudo iniciou-se com a elaboração de uma lista de dados e informações de interesse a serem levantados, analisados e selecionados quanto à consistência e utilidade para o projeto. Dentre os estudos existentes sobre o tema, citamos a

seguir os pesquisados e obtidos junto às instituições de ensino superior, com um breve relato dos seus conteúdos (Quadro 3.1).

Quadro 3.1- Estudos publicados sobre o igarapé da Fortaleza e/ou áreas de ressacas.

Fonte	Ano	Área de estudo	Características	Principais resultados
Oliveira et al.	2001	Pedrinhas	TCC – discute o saneamento básico e suas conseqüências no bairro das pedrinhas	Indica grande deteriorização da qualidade da água, principalmente devido às palafitas construídas ao longo do canal.
Costa et al.	2002	Bairros Universidade e Zerão.	TCC – discute o processo de ocupação das ressacas dos referidos bairros	O levantamento sócio-econômico ratifica que a região é ocupada por pessoas de baixa renda.
Júnior et al.	2005	Igarapé da Fortaleza	TCC – discute a dinâmica pesqueira no igarapé.	Após aplicação de formulário aos pescadores, conclui que a variabilidade de espécies capturadas diminuiu no período de 2003 a 2004.
Ferreira et al.	2005	Pedrinhas	TCC – apresenta uma avaliação microbiológica e físico-química da água na região	O diagnóstico reforça estudos anteriores e propõe medidas de mitigação dos efeitos negativos sobre a qualidade da água no canal da pedrinhas.

A bacia do igarapé da Fortaleza possui elevado grau de ocupação, conflitos de uso da água e setores com elevado grau de degradação ambiental. A água do igarapé é utilizada pela população para as atividades diárias, uma vez que a CAESA disponibiliza um sistema isolado de abastecimento. No entanto, não é raro observar tubulações imersas no leito do igarapé para captação de água para todos os fins, inclusive para beber.

A qualidade de suas águas é afetada, principalmente, pelas atividades agrícolas e pela expansão urbana. O Quadro 3.2 apresenta de forma simplificada o zoneamento ecológico e econômico realizado por Cunha e Couto (2002) na região. Destaque para as áreas protegidas e a característica de sua ocupação.

Quadro 3.2 - Zoneamento Ecológico e Econômico na bacia do igarapé da Fortaleza.

Zona	Características sócio econômicas	Características ambientais
Provedor - Ponte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior concentração populacional e atividades urbanas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Área ocupada e urbanizada desordenadamente.</li> <li>• Trecho de mata de terra-firme atrás do Colégio da Fortaleza.</li> <li>• Altos níveis de poluição do Igarapé Provedor</li> <li>• Pequena criação de búfalos.</li> </ul>
REBIO da Fazendinha	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extração de madeira e coleta de açaí</li> <li>• Porto 24 horas</li> <li>• Maior parte das atividades rurais da população (pesca, extração de madeira e palmito e coleta de açaí) é realizada fora da reserva</li> <li>• A ocupação se dá pela atração dos benefícios dos equipamentos e serviços urbanos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Floresta de várzea.</li> <li>• Área protegida legalmente.</li> </ul>
Calha do igarapé Fortaleza e afluentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pecuária</li> <li>• Pequena pesca artesanal de camarão e peixe</li> <li>• Manejo de açazal</li> <li>• Presença de produtores rurais dedicados a roça de cana, milho, macaxeira e sistemas agroflorestais com açaí, cupuaçu, goiaba...</li> <li>• balneários</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presença de várzea e mata de terra-firme.</li> <li>• Nas cabeceiras de braços do igarapé da Fortaleza ocorrem pequenos igapós que servem como berçários de peixes.</li> <li>• Na terra firme são feitas construções.</li> <li>• A mata ciliar tem sido afetada 'para implantação de pastos e balneários e extração predatória de palmito de açaí.</li> <li>• Marcado pela lagoa e ressacas.</li> <li>• Alta concentração de infraestrutura urbana, com residenciais de classe média na lagoa e construções irregulares pela classe baixa nas ressacas.</li> </ul>
Lagoa dos Índios e Ressacas de Cima (Congos, Zerão, Buritizal e Infraero)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lago utilizado como área de lazer, pesca artesanal e banho</li> <li>• Concentração de comércios e grande número de funcionários públicos</li> <li>• Existência de uma comunidade remanescente de quilombo com aproximadamente 50 famílias, organizadas em 2 associações</li> <li>• Produção de farinha, milho e feijão, para comercialização.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resquícios de mata de terra firme no entorno das ressacas.</li> <li>• Altos níveis de poluição.</li> <li>• Ausência de fiscalização ambiental.</li> </ul>

Fonte: CUNHA e COUTO (2002)

Em relação às potenciais perdas de biodiversidade dos ecossistemas aquáticos, quando sob pressões antropogênicas que causam alterações nos ecossistemas aquáticos (principalmente na cadeia alimentar), pode ocorrer perda

de riqueza de certas espécies de peixes (FRAGOSO Jr., 2009). Estas normalmente são referentes aos grandes grupos, tais como os peixes onívoros (alimentam-se de plâncton, zoobentos e peixes de pequeno porte), planctívoros (alimentam-se de plâncton e zoobentos) e piscívoros (alimentam-se de outros peixes). Por exemplo, ao aplicar o Modelo IPH-ECO em uma análise de 10 anos em um ecossistema de lagos rasos (Modelagem Ecológica), o referido autor analisou um ciclo sazonal desta característica bem definida, após o efeito das condições iniciais (2 anos). Verificou também que a produção primária acompanha as condições climáticas subtropicais, com dois picos por ano: um na primavera e outro no verão, nas condições de contorno impostas.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Introdução

Este estudo utilizou o sistema de modelagem SisBaHiA versão 8.0 como ferramenta de modelagem do canal principal da Bacia Hidrográfica do Igarapé da Fortaleza, no trecho compreendido entre a Foz e o Gruta. Como base de dados para uso do modelo hidrodinâmico, obteve-se uma imagem da área, usando o software Google Earth 5.0.1<sup>6</sup> (GOOGLE EARTH, 2008). Os dados de batimetria foram elaborados por Silva e colaboradores (2003) e os dados de vazão foram coletados em campanha realizada em 13 de setembro de 2008.

A interface do SisBaHiA® produz todos os mapas direta e automaticamente usando o software Surfer. Similarmente, todos os gráficos são produzidos através do software Grapher. Ambos os softwares são sistemas computacionais e programas comerciais bem conhecidos, os quais adotam o padrão OLE. Por isso, na prática, são tratados como sub-rotinas pela interface do SisBaHiA®.

No SisBaHiA® há um módulo “Gerente de Animações” através do qual o usuário tem acesso direto e controlado a todas as animações geradas. Através do Gerente de Animações o usuário pode visualizar os “filmes” (imagens pós-processadas das saídas do modelo) quadro a quadro, ou em qualquer velocidade que deseje. Todas as animações podem ser diretamente inseridas em apresentações Power Point como se fossem uma simples figura. Ao se colocar em modo de apresentação a figura surge animada na tela do computador.

---

<sup>6</sup> Disponível gratuitamente em <http://earth.google.com>.

## 4.2. Sobre modelo SisBAHIA

Este sistema de modelagem utiliza uma malha de elementos finitos do domínio da modelagem. O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para que sejam obtidos os resultados desejados (ROSMAN, 2005).

O SisBAHIA encontra-se em processo contínuo de sendo ampliação e aperfeiçoamento na COPPE/UFRJ desde 1987. O sistema tem sido adotado em dezenas de estudos e projetos contratados à Fundação Coppetec envolvendo modelagem de corpos de água naturais. Maiores detalhes sobre o SisBAHIA® podem ser obtidos em consulta à referência Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental – Capítulo 1 (pp 1-161) do livro Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5, publicado em Novembro de 2001 pela Associação Brasileira de Recursos Hídricos <[www.abrh.org.br](http://www.abrh.org.br)>.

O sistema possui um modelo hidrodinâmico acoplado para simular a circulação hidrodinâmica em corpos de água rasos sob diferentes cenários. Tal modelo é otimizado para aplicações em corpos de água naturais com pouca estratificação como é o caso do igarapé da Fortaleza. Dispõe também de um modelo de transporte Lagrangeano advectivo-difusivo com reações cinéticas.

Desta forma, simula o transporte de escalares, tais como substâncias dissolvidas ou em suspensão, ou parâmetros de qualidade da água, que possam estar bem misturados, ocupando apenas uma camada, ou flutuando na coluna d'água. Esse tipo de modelo é, na maioria das vezes, utilizado no estudo do transporte de plumas ou plumas de contaminantes originados a partir de fontes de pequena escala em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico.

No cálculo da circulação hidrodinâmica num escoamento bidimensional as três incógnitas a serem resolvidas: as velocidades médias na vertical (U e V nas direções x e y, respectivamente) e o nível da superfície livre ( $\zeta$ ). As três equações utilizadas no modelo são (ROSMAN, 2009):

Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção x:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - 2\Phi \sin \theta V = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S - \tau_x^B) \quad (7)$$

Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção y:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - 2\Phi \sin \theta U = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^S - \tau_y^B) \quad (8)$$

Equação da continuidade (do volume) integrada ao longo da vertical:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

onde: g é aceleração da gravidade;  $\rho_0$  é uma massa específica de referência constante; H é a profundidade total instantânea;  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yy}$  são as tensões turbulentas promediadas na vertical;  $\tau_x^B$  e  $\tau_y^B$ , são as tensões de atrito no

fundo nas direções x e y;  $\tau_x^S$  e  $\tau_y^S$ , são as tensões de atrito na superfície nas direções x e y;  $\Phi$  é a velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local e  $\theta$  é o ângulo de latitude.

Para situações onde não seja possível a calibração adequada do modelo, o SisBAHIA possui atributos para minimizar esse processo e maximizar a confiabilidade dos resultados.

A modelagem da turbulência é baseada em técnicas de filtragem que levam à simulação de grandes vórtices, ou vórtices resolvíveis. Tal técnica é conhecida na literatura internacional como LES, sigla de Large Eddy Simulation, e é considerada como o estado da arte para modelagem de turbulência em escoamentos geofísicos.

O modelo hidrodinâmico admite especificação pontual do tipo de material de fundo, e usa interpolação biquadrática para valores de profundidade e rugosidade equivalente do fundo, permitindo ótima acurácia na representação física do leito.

Além disso, permite que a ação do vento na superfície livre e o atrito no fundo sejam variáveis no tempo e no espaço. Tal realismo é extremamente relevante para simulações de escoamentos em regiões costeiras, baías, estuários, rios e lagoas. Com a fidelidade conseguida no mapeamento da batimetria e contornos, bem como das tensões de vento e atrito no fundo, a coerência entre resultados medidos e modelados é naturalmente maximizada, minimizando a necessidade e o processo de calibração (ROSMAN, 2009). Mesmo sem qualquer calibração, os resultados obtidos (ROSMAN, 2009, CEARÁ, 2007) pelos modelos apresentam coerências entre valores reais e valores computados de níveis de água, em geral, melhores que 90%. E, após calibração, é usual que sejam superiores a 95%. Contudo, é necessário que a geometria do corpo de água implementada no sistema de modelos esteja correta, e seja condizente com a existente na época de medição de níveis e correntes.

Como os modelos de transporte de contaminantes recebem como dados de entradas os resultados de níveis e correntes dos modelos hidrodinâmicos, a confiabilidade dos modelos de transporte é intrinsecamente uma função da qualidade dos resultados hidrodinâmicos.

### **4.3. Etapas da implementação do modelo SisBAHIA**

#### **Geração da Malha Numérica**

O SisBAHIA é um modelo numérico que permite a utilização de grades numéricas que acompanham o contorno físico da região modelada.

Usando o software Google Earth 5.0.1 (<http://earth.google.com/>) obteve-se uma imagem da área de estudo (Figura 4.1). A imagem digitalizada do canal principal do igarapé da Fortaleza, no trecho da Foz até o Gruta, foi exportada na extensão .bln (bloco de notas) e utilizada para confecção do mapa base (Figura 4.2) utilizando o software Surfer versão 9.0 da Golden Software Corporation.

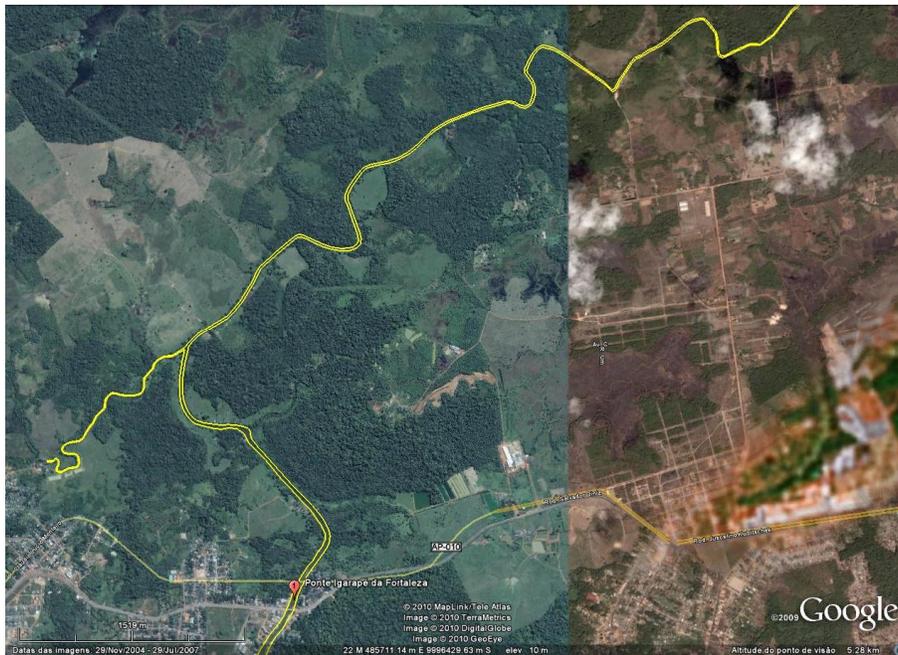


Figura 4.1 - Imagem do Google Earth do Igarapé da Fortaleza no trecho entre a Foz e o Gruta, obtida em julho de 2008.

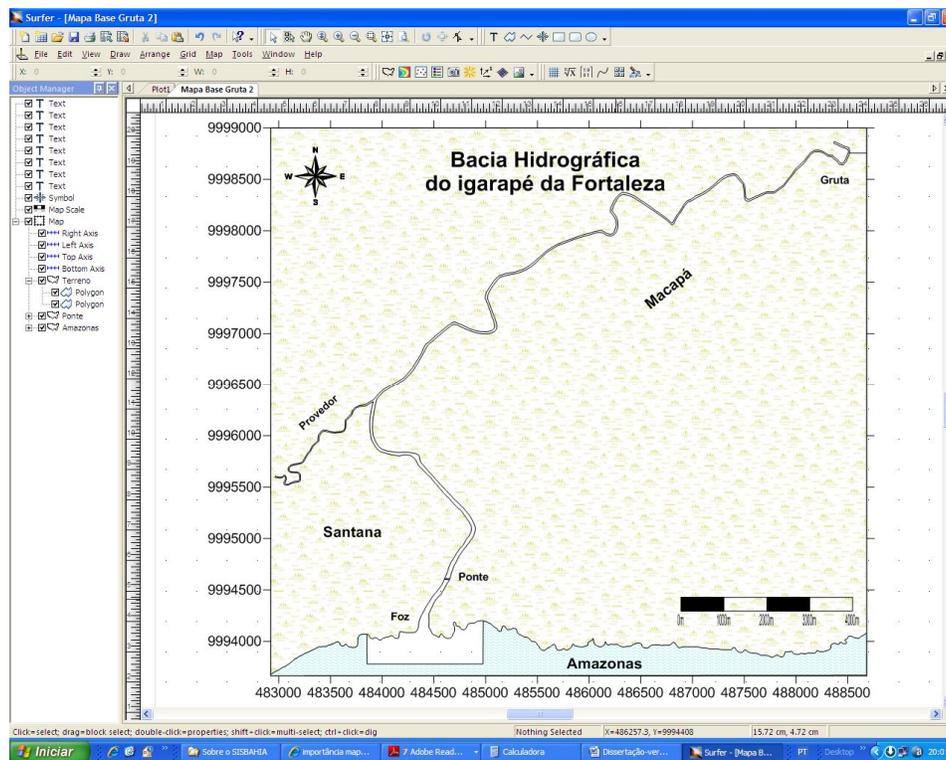


Figura 4.2 - Mapa base da área de estudo em coordenadas UTM, contendo domínio da modelagem, contorno de terra e contorno de água.

A construção desse tipo de grade é uma tarefa que exige grande esforço e paciência do pesquisador e, no presente caso de modelagem de rios, é sugerido que a confecção dos elementos ocorra no sentido longitudinal do fluxo. Isto é, os elementos devem ser mais longos que largos. Devido à falta de dados de toda a extensão do igarapé da Fortaleza, modelou-se apenas o trecho desde a Foz até a localidade conhecida como Gruta compreendendo uma extensão de 14 km (52% da extensão total).

Construiu-se computacionalmente a malha de elementos finitos utilizando o software Argus ONE<sup>7</sup> versão 4.2.0q (student) da Argus Holding Ltda, disponível para download em <http://www.argusint.com/ArgusNumericalEnv.html>. A malha obtida (Figura 4.3) é constituída por 274 elementos quadráticos de tamanho variável e 497 nós, que após serem exportados para SisBAHIA totalizaram 1541.

O contorno externo foi discretizado por elementos de aproximadamente 180 m x 90 m. No canal principal do igarapé do Fortaleza o tamanho médio dos elementos varia de 40 m X 15 m (próximo à Foz) a 12 m x 2 m (no igarapé Provedor).

---

<sup>7</sup> A versão Student apresenta limitação quanto ao número de elementos constituintes da malha e possui um custo de \$ 100.00

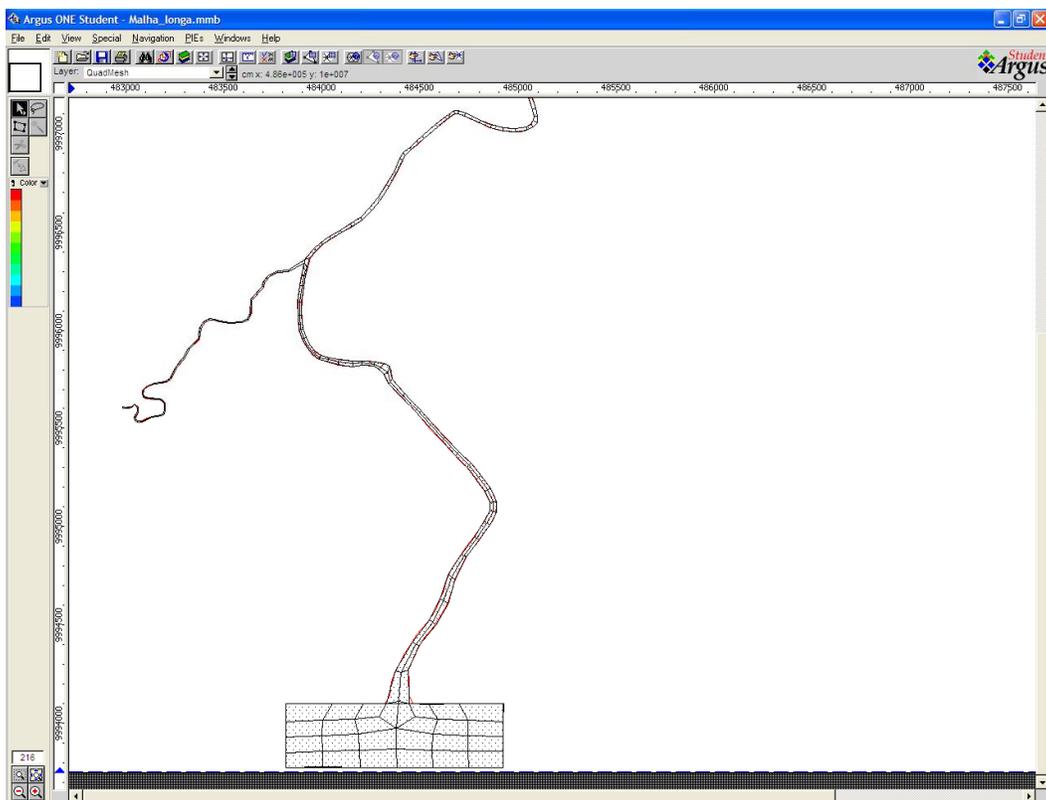


Figura 4.3 - Destaque da malha com elementos quadrangulares, confeccionada no Argus One versão 4.2.0q.

## Interpolação da Batimetria

Os dados batimétricos que foram utilizados para modelagem computacional foram obtidos de Silva et al (2003). Como não foi possível identificar a cota zero a que se referem às medidas obtidas por Silva (2003), utilizou-se a informação batimétrica sem correção ideal.

A confecção de uma planilha com os dados de batimetria permitiu, por interpolação e usando a técnica de kriging (ROSMAN, 2009), o cálculo das profundidades nodais. Para evitar possíveis locais que ficassem secos durante as simulações adotou-se uma profundidade mínima de 0.2 m. Na Figura 4.4 apresentam-se as isolinhas de profundidade calculadas a partir das profundidades nodais.

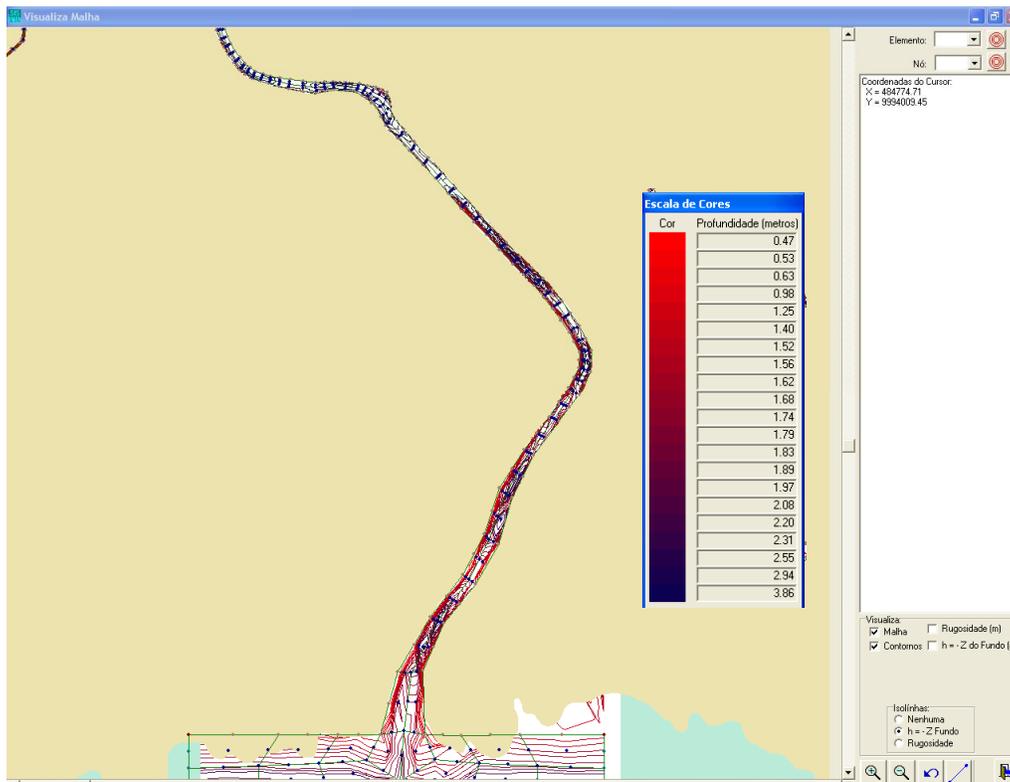


Figura 4.4 - Visualização de um trecho da malha de elementos finitos no SisBAHIA, contendo isolinhas de profundidade e contornos.

## Condições Iniciais e de Contorno

A condição inicial consiste em especificar o campo de velocidade nulo ( $U = 0$  e  $V = 0$ ) em todos os pontos de grade. Para os cenários propostos não se considerou a velocidade do vento, haja vista que o rio apresenta uma forma espacialmente alongada em cujas margens se observam matas ciliares que praticamente impedem a passagem livre do vento.

As condições no contorno aberto são as elevações da superfície livre da água de acordo as constantes harmônicas (vistas em capítulos anteriores) para o porto de Santana. Considerou-se como forçante apenas o fluxo de maré produzida pelo rio Amazonas (devido à presença do marégrafo no Porto de Santana).

A condição de contorno de terra é a de fluxo normal nulo, considerando-o como impermeável ao escoamento. No caso de embocaduras de rios, a velocidade normal é imposta nos nós que o representam.

Para a determinação da rugosidade equivalente de fundo considerou-se o valor de 0.025 m para todo o domínio de modelagem. Tal valor mostrou-se mais adequado, tal como indicado nas referências técnicas do SisBAHIA (ROSMAN, 2009), correspondendo a um leito sedimentar com obstáculos (ondulações de fundo) .

Além dos parâmetros descritos acima, foram adotados a massa específica da água, com valor de 1025 kg/m<sup>3</sup>, a massa específica do ar, com 1,20 kg/m<sup>3</sup>, e a aceleração da gravidade, com 9,81 m/s<sup>2</sup>. Esses parâmetros são necessários para a caracterização física da região de estudo e obtenção de resultados mais próximos da realidade.

### **Condições de contorno para o modelo hidrodinâmico**

Uma vez que a base de dados do SisBaHiA é hierarquizada, os modelos de transporte são dependentes de modelos hidrodinâmicos e estes da malha de elementos, razão pela qual o usuário deverá previamente escolher a malha que deverá ser utilizada pelo modelo hidrodinâmico.

No item simulação da pasta “Parâmetros” foram definidos o instante Inicial 0 s e o instante final 432 000 s (5 dias), com um passo de tempo de 4 s (o que correspondeu a um número de Courant de 2,7). Segundo o Manual do usuário do SisBaHiA (disponível em < <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>>), o passo de tempo pode ser calculado considerando que valor do Número de Courant ideal é entre 3 e 8. A determinação do número de Courant médio (Cr) é feita a partir da equação (10):

$$Cr = \Delta t \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}\right)} \cdot (|V| + \sqrt{gH}) \quad (10)$$

Onde:

$\Delta t$  é o passo de tempo que se deseja determinar (s);

$\Delta x$  é o espaçamento médio longitudinal dos nós da malha (m);

$\Delta y$  é o espaçamento médio transversal dos nós da malha (m);

$|V|$  é o módulo da velocidade da corrente (em geral na prática, este

valor é desprezível por ser muito menor que  $\sqrt{gH}$ );

$g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$H$  é a profundidade média local (m);

Os contornos abertos, ou fronteiras abertas, caracterizam normalmente encontros de massas d'água, sendo um limite do modelo, não é um limite real do corpo d'água. As condições no contorno aberto são as elevações da superfície livre da água de acordo as constantes harmônicas (vistas em capítulos anteriores) para o porto de Santana. Na subpasta 'Parâmetros de Fronteira', na caixa 'Fronteira Aberta', definiu-se dois tipos de parâmetros: valores genéricos calculados via constantes harmônicas dadas, para o cenário "natural" e valores datados calculados via constantes harmônicas dadas, para o cenário (2002). Estes parâmetros informam ao modelo como deve ser entendida a fronteira aberta; se a informação da maré será genérica ou datada.

Selecionou-se em "Fronteira de Terra", a opção "apenas valores permanentes". A Tabela 4.1 apresenta os valores de vazão permanente (em  $m^3/s$ ) em cada nó para os modelos simulados. O tipo de nó refere-se ao tratamento dado pelo modelo na fronteira. Nas simulações realizadas os nós de fronteira de terra: 1,2 e 4 (Gruta) e 1536, 1537 e 1539 (igarapé Provedor), como afluentes ao domínio do modelo, tiveram o mesmo tratamento: foram definidos como nó do tipo 9, ou seja, para cada nó forneceu-se a vazão, o ângulo  $\alpha_{Nx}$  entre a direção normal e o eixo x, o talude  $m$  da direção normal e velocidade tangencial igual a zero.

Tabela 4.1 – Valores de vazão nodal ( $m^3/s$ ) utilizados nas simulações dos modelos hidrodinâmicos para os cenários Natural e 2002 para os nós 1, 2 e 4 (Gruta) e 1536, 1537 e 1539 (Provedor).

Nó	Cenário					
	Natural			2002		
	Cheia (Março)	Transição (Julho)	Estiagem (Outubro)	Cheia (Março)	Transição (Julho)	Estiagem (Outubro)
1	-3.37800	-1.58600	-0.23000	-4.14200	-0.98600	-0.00700
4	-3.37800	-1.58600	-0.23000	-4.14200	-0.98600	-0.00700
2	-3.37800	-1.58600	-0.23000	-4.14200	-0.98600	-0.00700
1536	-1.49900	-0.70400	-0.10200	-1.83800	-0.43800	-0.00300
1539	-1.49900	-0.70400	0.10200	-1.83800	-0.43800	-0.00300
1537	-1.49900	-0.70400	-0.10200	-1.83800	-0.43800	-0.00300

Os valores de vazão nodal informados na Tabela 4.1, para o cenário “natural” foram calculados a partir do produto da área da bacia ( $190 \text{ km}^2$ ) pela precipitação mensal (mm) da série histórica do período 1969 – 1990 (Tabela 10). Feitas as devidas conversões, dividiu-se o valor de vazão total ( $m^3/s$ ) pela largura do canal na fronteira de terra; sendo de 8,90 m para o Gruta e 6,70 m, para o igarapé Provedor, uma vez que a entrada de vazões no SisBAHIA é feita por metro linear. No cenário “2002”, o procedimento foi análogo, porém utilizou-se os dados de precipitação mensal medidos pela estação hidrometeorológica de Macapá para o ano de 2002 (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Valores de precipitação mensal de normal climatológica e ano de 2002 para Macapá.

Mês	Série Histórica	Ano 2002
Jan	287,2	240,3
Fev	355,4	350,2
<b>Mar</b>	<b>411,1</b>	<b>504</b>
Abr	375,0	383,4
Mai	327,8	441,3
Jun	233,4	241,7
<b>Jul</b>	<b>192,8</b>	<b>120,3</b>
Ago	93,0	59,9
Set	34,1	0,8
<b>Out</b>	<b>28,4</b>	<b>0,8</b>
Nov	59,3	16,6
Dez	138,8	136,1

Fonte: IHMET/IEPA.

Por fim os valores encontrados devem ser divididos por três, pois a região da malha apresenta um elemento com três nós. A Tabela 4.3 apresenta a planilha utilizada no cálculo descrito acima. É importante destacar que devido à falta de informação em relação à distribuição de vazões no igarapé provedor esta foi estimada como sendo 1/3 da vazão do Gruta.

Tabela 4.3 - Dados utilizados no cálculo da vazão total e nodal para os nós 1, 2 e 4 (Gruta) e 1536, 1537 e 1539 (igarapé Provedor).

Cenários	Natural			2002		
	Cheia	Transição	Estiagem	Cheia	Transição	Estiagem
Área da Bacia						
Contribuinte (m <sup>2</sup> )	1,900E+08	1,900E+08	1,900E+08	1,900E+08	1,900E+08	1,900E+08
Vazão de Precipitação (m <sup>3</sup> /s/m <sup>2</sup> )	1,586E-07	7,446E-08	1,080E-08	1,944E-07	4,630E-08	3,086E-10
Qtotal Gruta (m <sup>3</sup> /s)	30,13	14,15	2,05	36,94	8,80	0,06
Qtotal Provedor (m <sup>3</sup> /s)	10,04	4,72	0,68	12,31	2,93	0,02
Largura da Seção (m)	Qnodal (m <sup>3</sup> /s/m)					
Gruta	8,92	-3,378	-1,586	-0,230	-4,142	-0,986
Provedor	6,7	-1,499	-0,704	-0,102	-1,838	-0,438

As condições iniciais 2DH consistiram em especificar o campo de velocidade nulo ( $U = 0$  e  $V = 0$ ) em todos os nós do domínio. Quanto ao valor de elevação, definiu-se a mesma cota (Tabela 4.4) para todos os nós. Este valor variou em razão de a maré genérica (cenário “natural”) e a maré datada (cenário “2002) possuírem elevações diferentes no início da simulação. Em razão da pouca profundidade o igarapé da Fortaleza não apresenta variações de temperatura ao longo da coluna d’água.

Tabela 4.4 – Resumo das principais características dos experimentos numéricos simulados pelo SisBAHIA.

Cenário	Precipitação (mm/mes)	Período Simulado(s)	Passo de tempo (s)	Elevação (m)	Condição inicial (m)
Natural					
Cheia (Março)	411	5 dias	5	0,063	1,833
Estiagem (Outubro)	28	5 dias	4	0,063	1,77
Transição (Julho)	193	5 dias	5	0,063	1,833
2002					
Cheia (Março)	504	5 dias	5	-0,0062	1,7638
Estiagem (outubro)	0,8	5 dias	4	-0,7864	0,9836
Transição (Julho)	120	5 dias	5	0,063	1,833

O intervalo de tempo de geração dos resultados do modelo hidrodinâmico foi configurado para 2400 s (espacial) e 1200 s (temporal). Para facilitar a observação dos resultados distribuíram-se seis estações (Tabela 4.5) ao longo da região em estudo, de forma a contemplar todas as possíveis variações no escoamento. É possível também obter resultados em outras regiões ou nos do domínio da modelagem.

Tabela 4.5 - Identificação das estações distribuídas ao longo do domínio da modelagem.

Estação	Nó	Coordenada_X	Coordenada_Y	Num.
Amazonas	604	484291.7000	9993859.0000	1
Confluência-Provedor	1256	483929.8300	9996340.4000	3
Fortaleza - Montante (Gruta)	4	488401.8500	9998843.8000	6
Fortaleza - reta do meio	480	485618.1775	9997816.6500	5
Foz	670	484398.7000	9994103.6000	2
Montante - Provedor	1539	482990.0950	9995595.7500	4

### **Condições de contorno para o modelo Lagrangeano**

Nos modelos Lagrangeanos foram simulados períodos de 30 dias, através da introdução de ciclos dentro dos modelos hidrodinâmicos acoplados, baseados nas elevações de nível de água obtidas. O passo de tempo foi de 40 s e o modo de transporte selecionado foi o advectivo e difusivo. Em todos os cenários simulados foram inseridas como parâmetro duas fontes retangulares emissoras de contaminante (Tabela 4.6), sem decaimento, em dois pontos do domínio da modelagem: a montante do igarapé Provedor e no Gruta. Estas fontes encontram-se distantes dos limites de contorno aberto, de tal forma que, se uma partícula atravessa um segmento do contorno, ela sai do domínio modelado, sendo assim perdida.

Tabela 4.6 – Propriedades das fontes emissoras de contaminante inseridas no domínio da modelagem.

Fonte	Local	Dimensões		Posição do centro	
		Comprimento (m)	Largura (m)	Coordenada x	Coordenada y
1	Gruta	7	2	488425	9998832
2	Provedor	6	4	482998	9995594

#### 4.4. Cenários simulados

Na simulação dos cenários buscou-se estabelecer um padrão de comparação para as mudanças na hidrodinâmica do canal a partir da inserção de dados de vazão nos contornos de terra referentes ao igarapé do provedor e Gruta.

O **cenário 1**, denominado “**natural**”, utiliza dados de **maré genérica**, de acordo com as constantes harmônicas obtidas para o Porto de Santana e geradas pelo modelo, e dados de vazão fluvial obtidos a partir da série histórica de precipitação, como descritos anteriormente.

O **cenário 2**, denominado “**2002**”, utiliza dados de **maré datada**, de acordo com as constantes harmônicas obtidas para o Porto de Santana e geradas pelo modelo, e dados de vazão fluvial dos respectivos meses simulados.

Para cada um desses cenários foram simuladas estações de cheia (caracterizada pelo mês com maior índice de precipitação: março), transição (mês de julho) e estiagem (caracterizada pelo mês com menor índice de precipitação: outubro). Foram simulados no modelo hidrodinâmico períodos de 5 dias para todos os cenários, a fim de representar um período de sizígia e outro de quadratura.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a modelagem do igarapé da Fortaleza criou-se no SisBAHIA uma base de dados intitulada “Fortaleza.MDB”, que contém uma malha associada a seis modelos hidrodinâmicos e seis modelos Lagrangeanos. Todo o projeto pode ser acessado livremente através da cópia da base de dados e resultados obtidos, disponibilizada em cd-room que segue anexo a este estudo, totalizando cerca de 10 MB. Neste capítulo são apresentados, especialmente através de mapas e gráficos, os principais resultados obtidos. No entanto, outras informações encontram-se na base de dados que podem ser exploradas e analisadas em pesquisas futuras.

### **Elevação de marés**

O Gráfico 5.1 mostra a variação do nível de maré ao longo de 5 dias, simulada para os cenários “natural” com maré genérica e “2002” com maré datada. Observa-se para a maré genérica uma pequena diferença entre a duração da maré enchente (5,21 h) e da vazante (7,14). No entanto, para as marés datadas essa diferença diminui e, segundo os dados da simulação, em outubro a duração da maré enchente (7,01 h) é maior que da vazante (4,68 h) (Gráfico 5.2). A simulação demonstra que as curvas de maré produzidas pelo modelo numérico oscilaram entre as dominâncias de vazante e enchente, não mostrando de forma decisiva um domínio preferencial. Este resultado difere dos dados medidos em campo em 08/09/2001 por Silva et al. (2003) que relata predominância de maré vazante (7:30 h) em relação à maré enchente (5:00 h). Em campanha de campo realizada em 13/09/2008, os valores encontrados foram de 6:40 h para maré vazante e 5:10 h para maré enchente. Porém, comparados com a previsão de maré genérica há compatibilidade dos dados. A simulação também mostrou

coerência quanto ao tipo de maré observado no igarapé da Fortaleza como sendo semidiurna (constituído por duas preamares (PM) e duas baixa-mares (BM)) com um período de aproximadamente 12:30 h. Não foram encontrados, na bibliografia pesquisada, registros acerca dos valores de elevação, porém em conversa com moradores do igarapé da Fortaleza há relatos de que os maiores valores de elevação ocorrem no mês de março, com as chamadas “lançantes”<sup>8</sup>. Este é um dado que também se mostrou compatível com a simulação e dados obtidos por Takiyama et al. (2007b) para o rio Matapi.

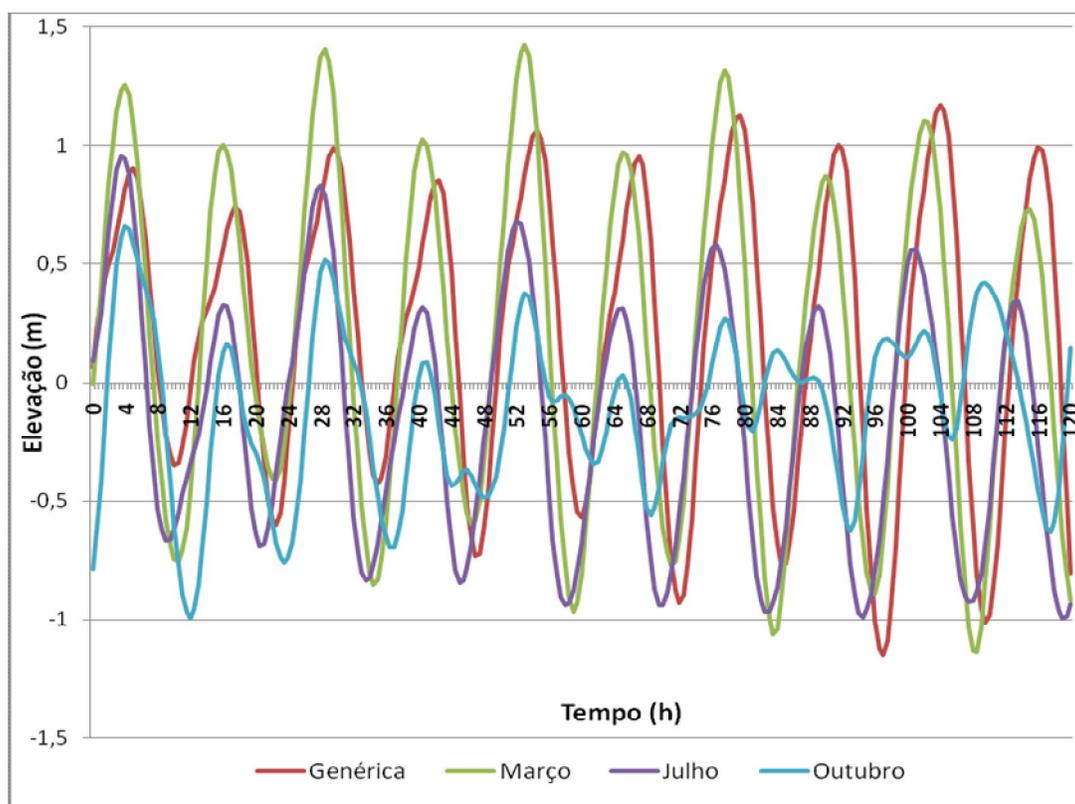


Gráfico 5.1 - Variação do nível de maré no domínio computacional, forçado pelas componentes harmônicas do porto de Santana, para os cenários simulados.

<sup>8</sup> Os meses em que a maré apresenta maior elevação são março e setembro, por ocasião dos equinócios (durante as marés de sizígias).

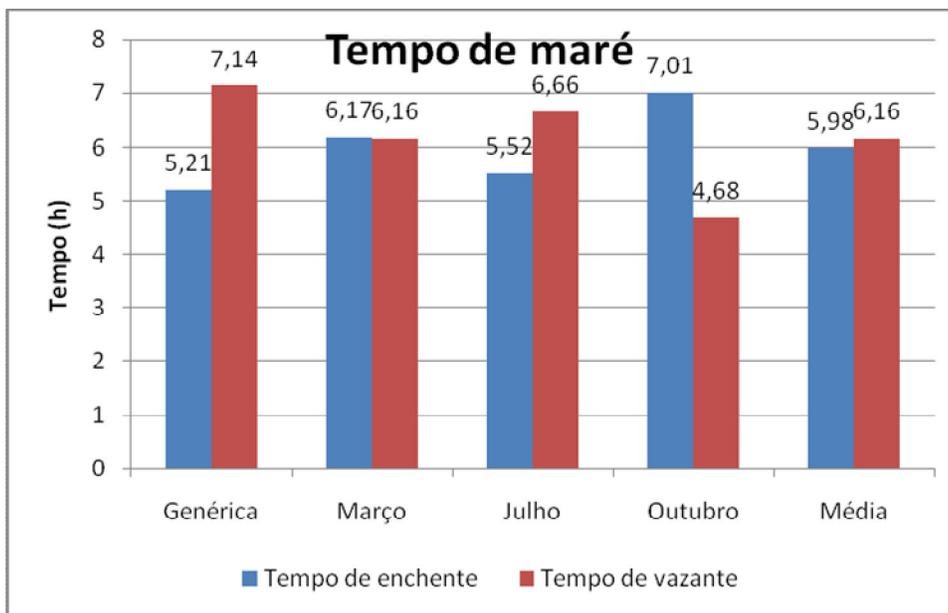
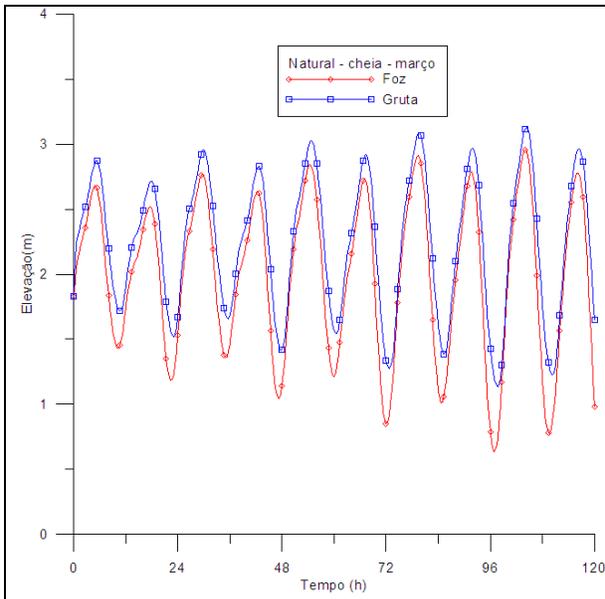
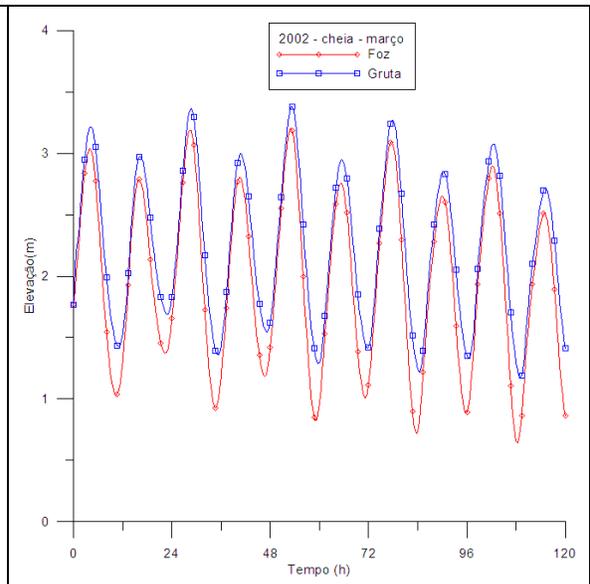


Gráfico 5.2- Comparação entre o tempo de maré enchente e vazante após simulação de 5 dias para marés genérica e datadas no ano 2002.

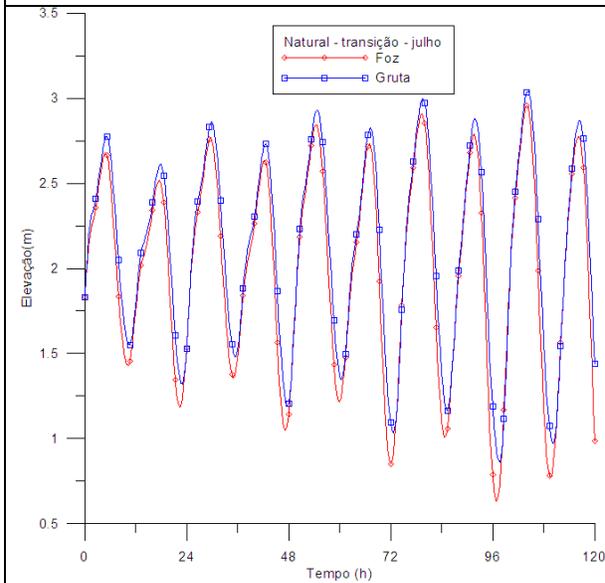
Foram também comparados os valores de elevação em um mesmo cenário para diferentes estações (Gráfico 5.3 (a) – 5.3 (f)). Os resultados mostraram que entre a Foz (coordenadas 484398.7000 e 9994103.6000) e o Gruta (coordenadas 488401.8500 e 9998843.8000) as diferenças na altura da coluna de água variaram entre 45 cm (no cenário 2002 - cheia) e 5 cm (no cenário 2002 - estiagem), demonstrando um regime de pouca alteração da lâmina de água de preamar e baixa-mar.



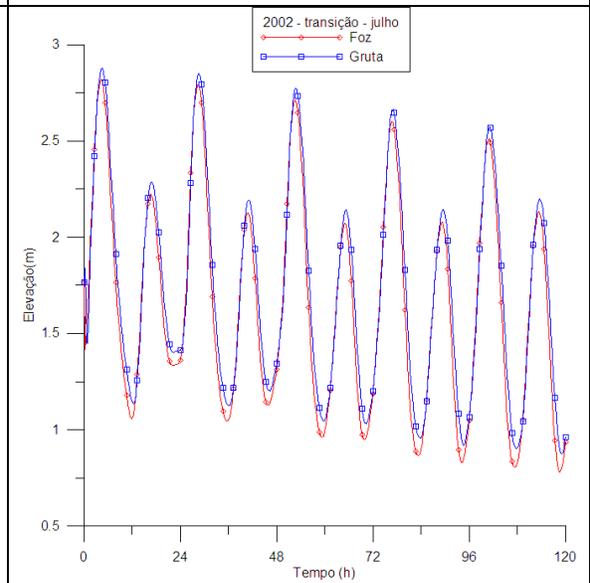
(a)



(d)



(b)



(e)

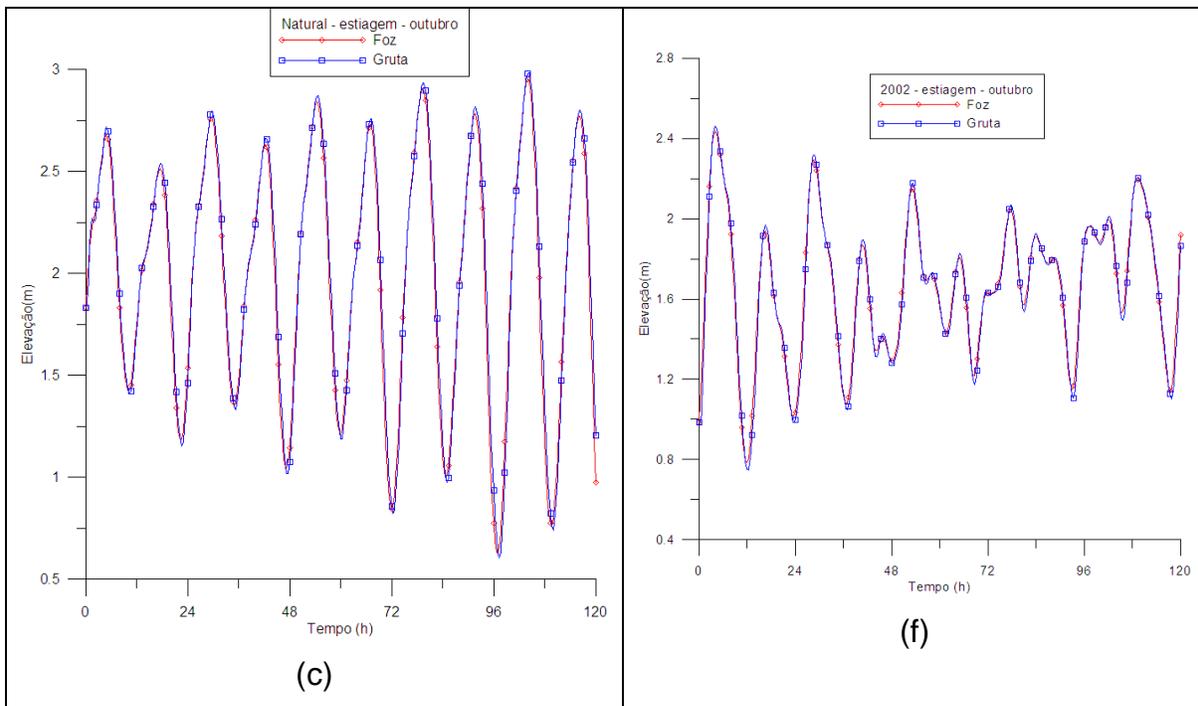


Gráfico 5.3 – comparação entre valores de elevação em diferentes cenários (a) Natural – cheia, (b) Natural – transição, (c) Natural – estiagem, (d) 2002 – cheia, (e) 2002 – transição e (f) 2002 - estiagem para as estações Foz e Gruta.

## Campos de velocidade

Por opção, para apresentação dos resultados da simulação do modelo hidrodinâmico escolheu-se o trecho compreendido entre a Foz e a ponte sobre o igarapé da Fortaleza (nó 713). A escolha ocorreu em função de haver no local um ancoradouro com fluxo intenso de pequenas embarcações que trazem produtos como açaí e pescado para serem comercializados. A dinâmica da maré pode, então, qualitativamente ser bem avaliada para este local comparada a outros trechos. As Figuras 5.1 – 5.8 apresentam vetores e isolinhas de velocidades para o cenário “2002” estação sazonal cheia, correspondente ao mês de março. Justifica-se esta opção por ser este cenário o que apresenta maiores valores de velocidade entre os simulados. O intervalo de tempo escolhido foi de 14 h, dividido em intervalos regulares de 2 h, considerando o início da obtenção de dados o instante  $t = 120000$  s da simulação.

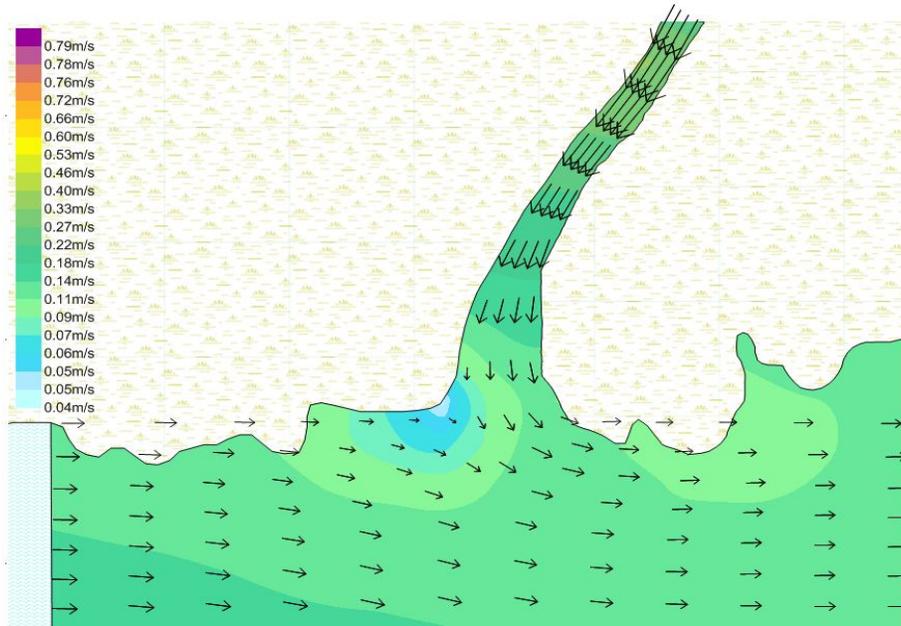


Figura 5.1 – Campo de velocidades simulado pelo modelo hidrodinâmico para o cenário 2002 – cheia, com destaque para o trecho compreendido entre a Foz e a ponte, no instante  $t = 120000s$  da simulação e  $t = 0$  para análise, em condição de vazante.

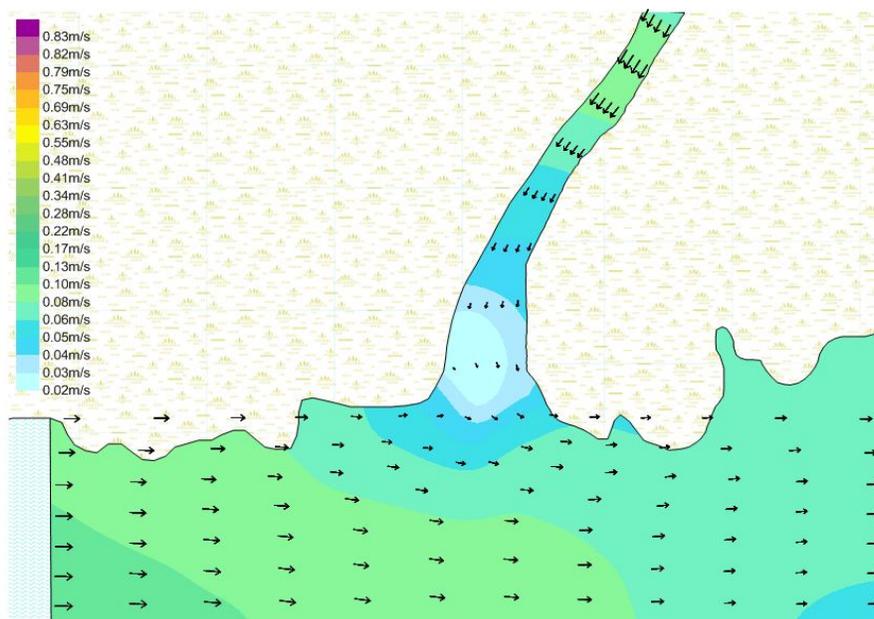


Figura 5.2 - Campo de velocidades simulado pelo modelo hidrodinâmico para o cenário 2002 – cheia, com destaque para o trecho compreendido entre a Foz e a ponte, no instante  $t = 127200s$  da simulação e  $t = 2$  h para análise, em condição de vazante.

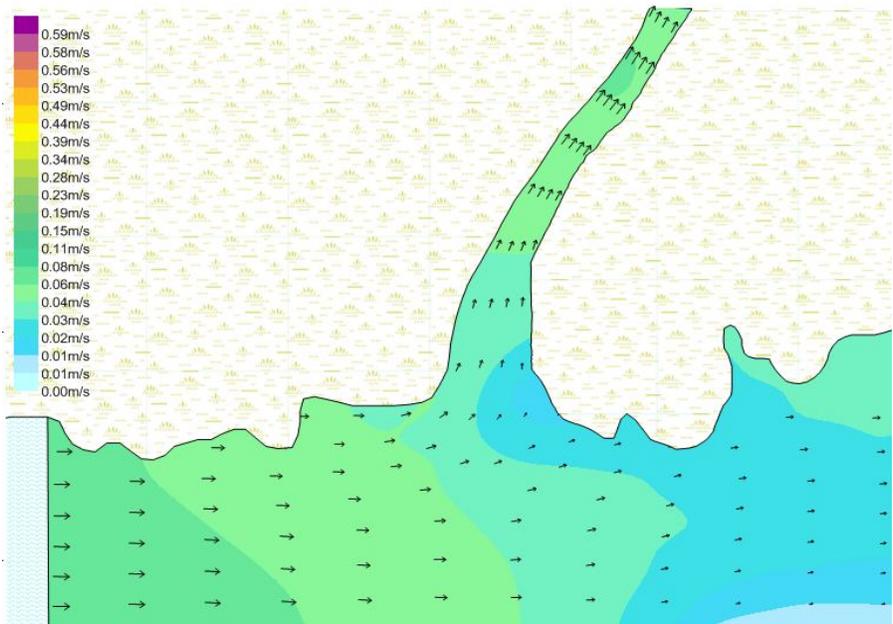


Figura 5.3 - Campo de velocidades simulado pelo modelo hidrodinâmico para o cenário 2002 – cheia, com destaque para o trecho compreendido entre a Foz e a ponte, no instante  $t = 134400s$  da simulação e  $t = 4 h$  para análise, em condição de vazante.

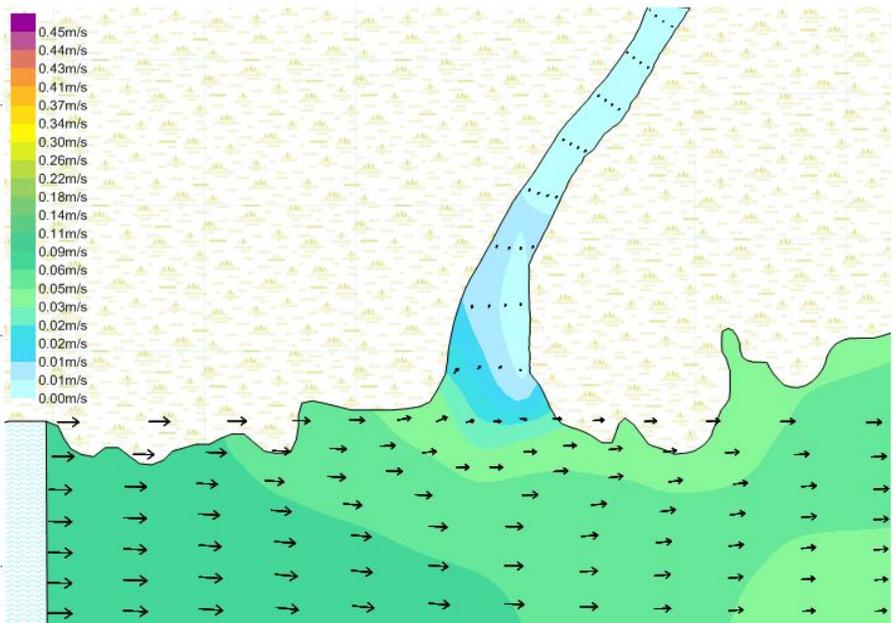


Figura 5.4 - Campo de velocidades simulado pelo modelo hidrodinâmico para o cenário 2002 – cheia, com destaque para o trecho compreendido entre a Foz e a ponte, no instante  $t = 141600s$  da simulação e  $t = 6 h$  para análise, em condição de enchete.

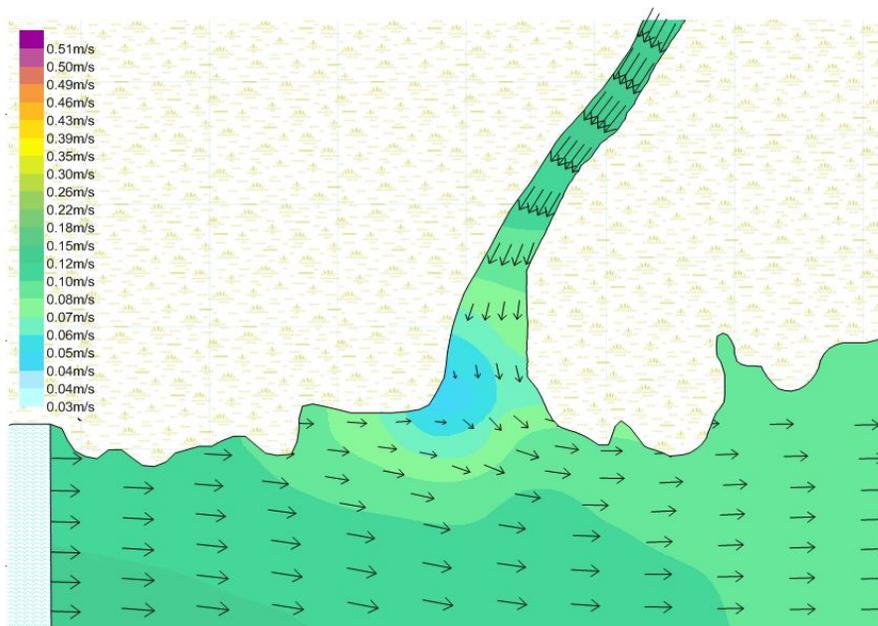


Figura 5.5 - Campo de velocidades simulado pelo modelo hidrodinâmico para o cenário 2002 – cheia, com destaque para o trecho compreendido entre a Foz e a ponte, no instante  $t = 148800s$  da simulação e  $t = 8$  h para análise, em condição de enchete.

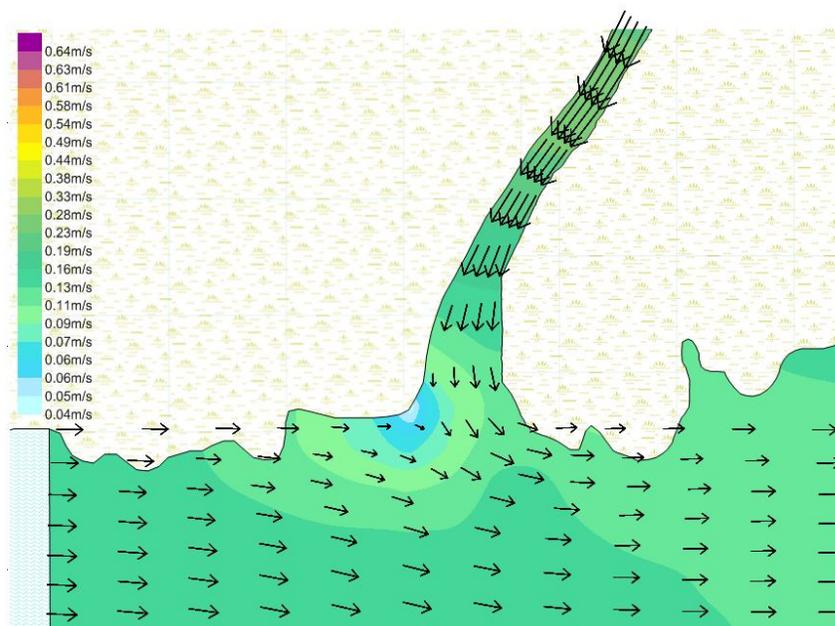


Figura 5.6 - Campo de velocidades simulado pelo modelo hidrodinâmico para o cenário 2002 – cheia, com destaque para o trecho compreendido entre a Foz e a ponte, no instante  $t = 156000s$  da simulação e  $t = 10$  h para análise, em condição de vazante.

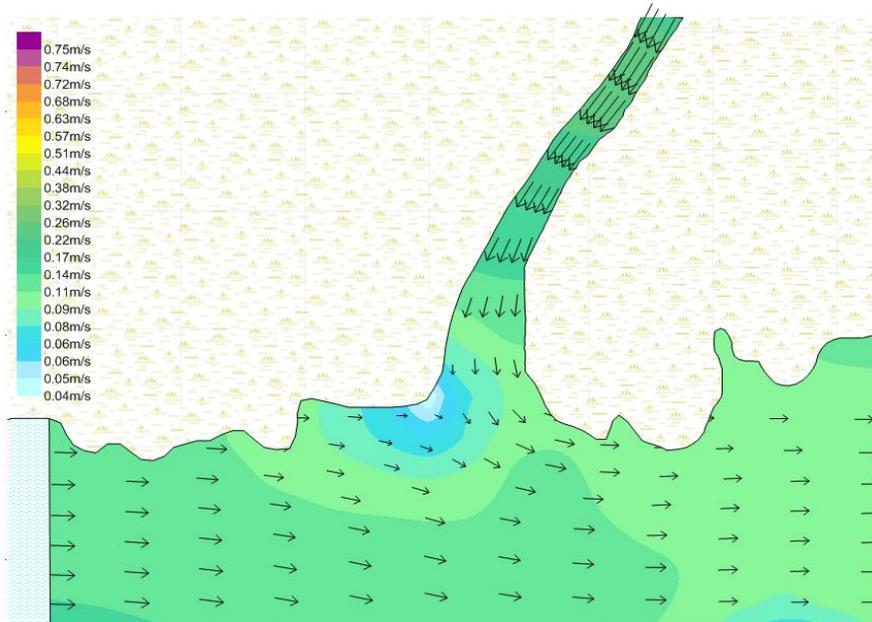


Figura 5.7 - Campo de velocidades simulado pelo modelo hidrodinâmico para o cenário 2002 – cheia, com destaque para o trecho compreendido entre a Foz e a ponte, no instante  $t = 163200s$  da simulação e  $t = 12 h$  para análise, em condição de vazante.

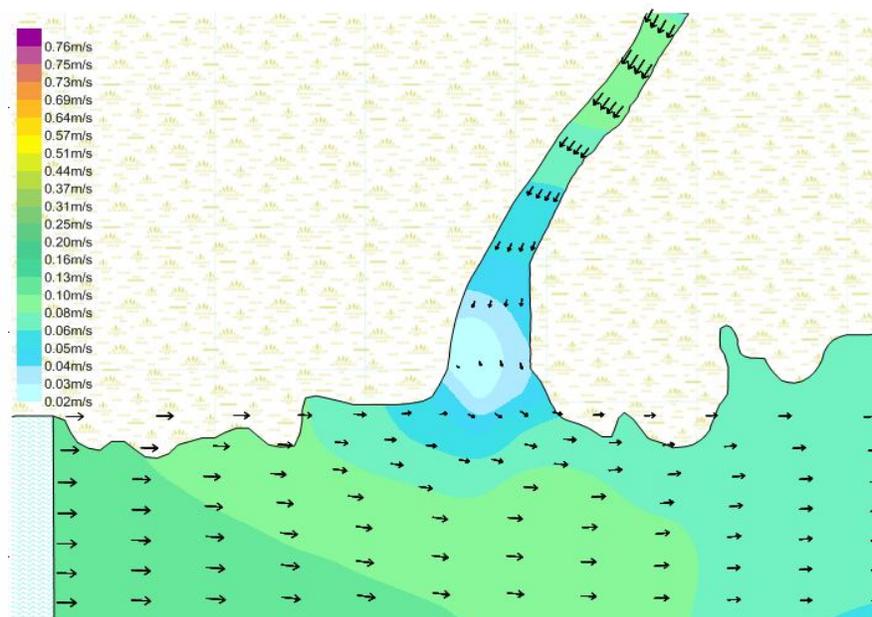


Figura 5.8 - Campo de velocidades simulado pelo modelo hidrodinâmico para o cenário 2002 – cheia, com destaque para o trecho compreendido entre a Foz e a ponte, no instante  $t = 170400s$  da simulação e  $t = 14 h$  para análise, em condição de vazante.

Os campos de velocidade mostram-se fortemente associados tanto à dinâmica da maré do rio Amazonas quanto ao aporte de precipitação (utilizado como parâmetro de vazão de entrada no modelo no gruta e no Provedor). Esta pode ser uma explicação para que o período de vazante no igarapé seja maior que o de enchente. Isto é, há um fluxo de duração maior em direção à jusante devido ao escoamento da precipitação à montante. As correntes mais intensas ocorrem no período mais chuvoso (cenário 2002 cheia) com redução progressiva à medida que diminui a intensidade de precipitação à montante do igarapé. O modelo não indicou um aumento na velocidade do fluxo no sentido do interior do igarapé à medida que diminui o fluxo à montante. Isto pode ter acontecido devido o tempo de simulação utilizado (apenas cinco dias) ou em razão da batimetria na região do rio Amazonas, na foz do igarapé, não corresponder à realidade.

Em termos quantitativos, os valores fornecidos pelo modelo em nenhum dos cenários foram superiores a 1 m/s. A diferença entre os resultados da simulação e os dados obtidos em campo (1,16 m/s) ou em estudos anteriores Silva et al. (2003) 1,5 m/s podem também estar relacionados à batimetria do local e/ou ao uso de diferentes equipamentos e metodologias na medição das velocidades. O valor de velocidade fornecido pelo modelo hidrodinâmico 2DH corresponde aos valores de superfície. Na coleta de campo (13/09/2008), mediu-se a velocidade média da corrente de água utilizando um molinete e usando o método de verticais conforme Santos et al. (2001). Ao passo que Silva et al. (2003) usaram uma ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) em suas medições. Tal equipamento, segundo os autores, torna-se imprescindível para que se possa demonstrar com maior exatidão como se comportam as vazões e as correntes dos rios e canais.

Pinheiro et al. (2008) em estudo sobre a dispersão de poluentes no baixo rio Amazonas utiliza valores estimados de vazão de modo que a velocidade máxima do rio não ultrapassasse o limite de 1,2 m/s. Logo, se os valores encontrados após a simulação não são reais, apresentam a mesma ordem de

grandeza dos valores encontrados na bibliografia para o local e podem ser considerados como referência na tomada de decisões e prevenção de lançamento de poluentes e suas influências negativas sobre a bacia.

Em termos ambientais a análise dos valores de velocidades fornecidas pelo modelo para os diferentes cenários pode ser um parâmetro importante para a biodiversidade aquática. Para Pereira (2004), ao estudar sobre entomologia em igarapés nos municípios de Presidente Figueiredo e Manaus, a velocidade da água é, provavelmente, o fator ambiental mais importante que afeta os organismos de ambientes onde o fluxo de água é constante, tanto para os que vivem na coluna d'água quanto para os do substrato de fundo. Ainda nesse sentido, em estudo realizado por Pascoalato et al. (2008), registrou-se em igarapé com menor velocidade superficial de corrente um maior número de entidades ecológicas de macroalgas. Assim, as regiões que apresentam menores velocidades tendem a favorecer a permanência e reprodução de espécies. Os valores máximos encontrados para as velocidades nos cenários simulados variaram entre 0,26 m/s (durante a estiagem) e 0,6 m/s (durante a cheia). Uma vez que os valores de velocidade diferem espacialmente e temporalmente, o monitoramento da biodiversidade aquática ou mesmo dos índices de poluição da água deveriam usar como pontos de controle as regiões onde os valores de corrente são menores e de preferência nos períodos de estiagem. Independente da estação sazonal, por razões puramente físicas (força centrípeta) a velocidade de corrente é menor na face convexa (região interna) dos trechos curvos do igarapé.

Quando comparados os cenários “natural” e “2002”, quanto aos valores de vazão utilizados (Tabela 4.3), observou-se que com variações de vazão de 22% (natural cheia – 2002 cheia) as variações nas velocidades foram de 7 % (para as velocidades máximas) e de 120% (para as velocidades mínimas). Este resultado sugere que um aumento na intensidade da vazão à montante (que pode ocorrer pelo aumento do despejo de águas servidas) terá um impacto maior nos valores de velocidade mínima (com tendência ao acréscimo) que nas velocidades máximas. Se considerarmos uma população contribuinte com águas servidas para

o canal da bacia igual a 80 000 pessoas (Tabela 2.1) e que este fluxo abasteça o igarapé da Fortaleza de maneira que cada pessoa contribua com 100 litros diariamente (estimativa feita com base em Clarke e King (2005)) teríamos um acréscimo na vazão de  $0,093 \text{ m}^3/\text{s}$ . Esta vazão corresponde a um acréscimo de apenas 0,3% na vazão do cenário natural cheia. Então o aumento populacional a princípio exerceria pouca influência no comportamento hidrodinâmico do igarapé, sua maior relevância está no aumento do tempo de dispersão dos poluentes eventualmente carregados para o leito do rio.

### **Campos de concentração de contaminante**

Os modelos de simulação de danos ambientais provocados por eventuais contaminantes lançados nos rios utilizam a velocidade do fluxo como principal parâmetro para geração de resultados. Portanto, quaisquer incertezas durante a obtenção do valor da velocidade, tendem a comprometer os resultados obtidos.

Para apresentar os resultados da simulação do modelo de transporte Lagrangeano, optou-se pela comparação qualitativa do deslocamento de uma nuvem de contaminante, lançadas por fontes localizadas no gruta e à montante do igarapé Provedor (Tabela 4.6) ao longo do canal simulado (sem os contornos de terra) para os cenários extremos de fluxo de velocidade (2002 cheia e 2002 estiagem) para os mesmos intervalos de tempos. As Figuras 5.9-5.20. O intervalo de tempo escolhido foi de 12 h, dividido em intervalo regulares de 1 h.

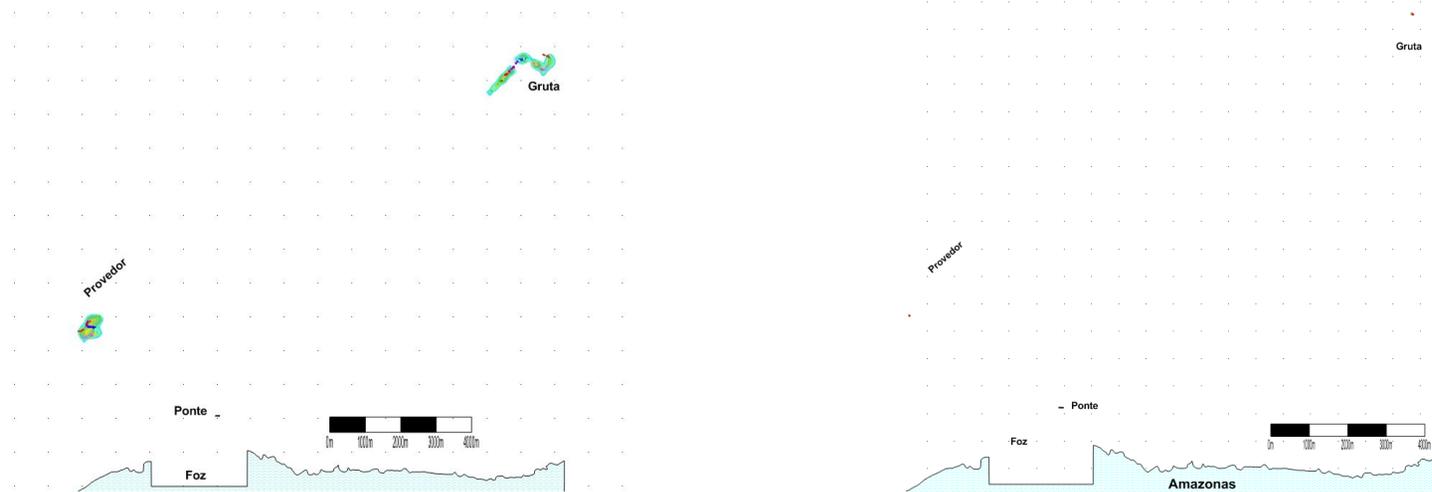


Figura 5.9 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Providor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 1 h de simulação.

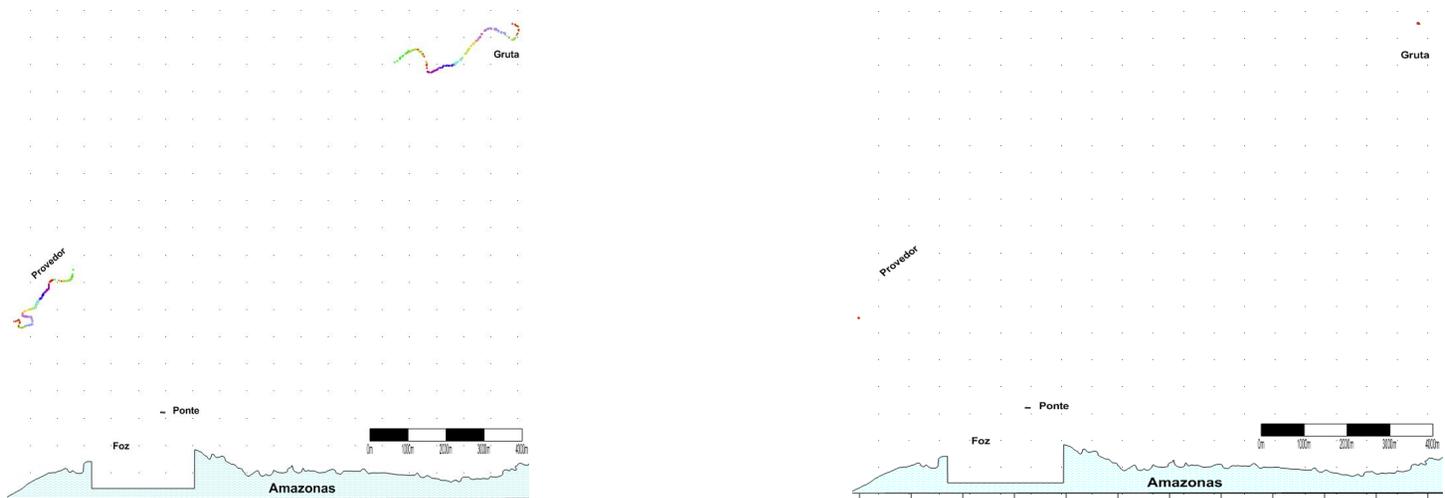


Figura 5.10 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Providor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 2 h de simulação.

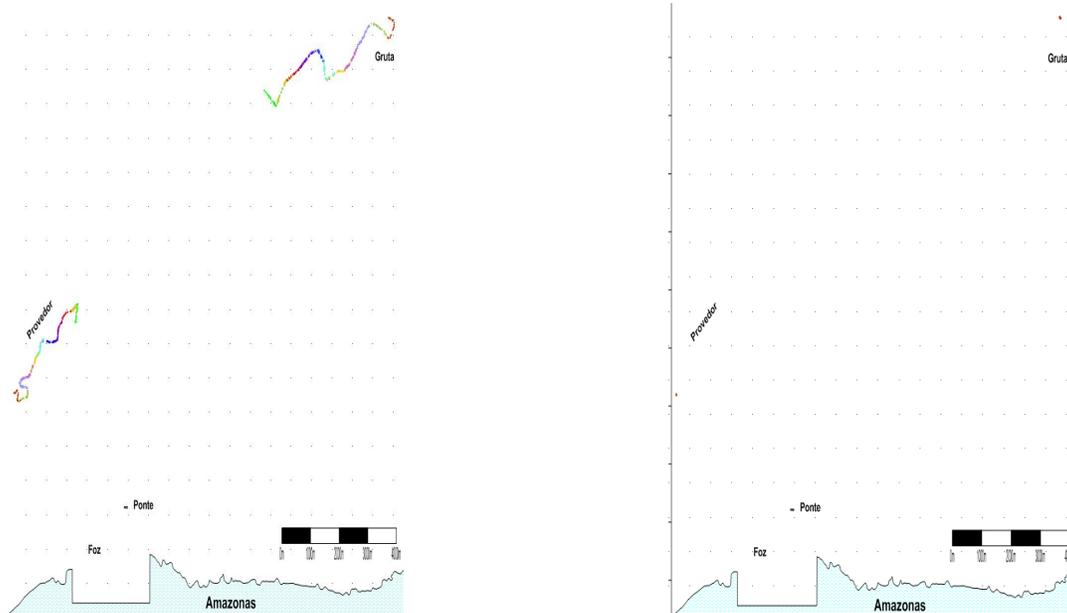


Figura 5.11 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Providor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 3 h de simulação.

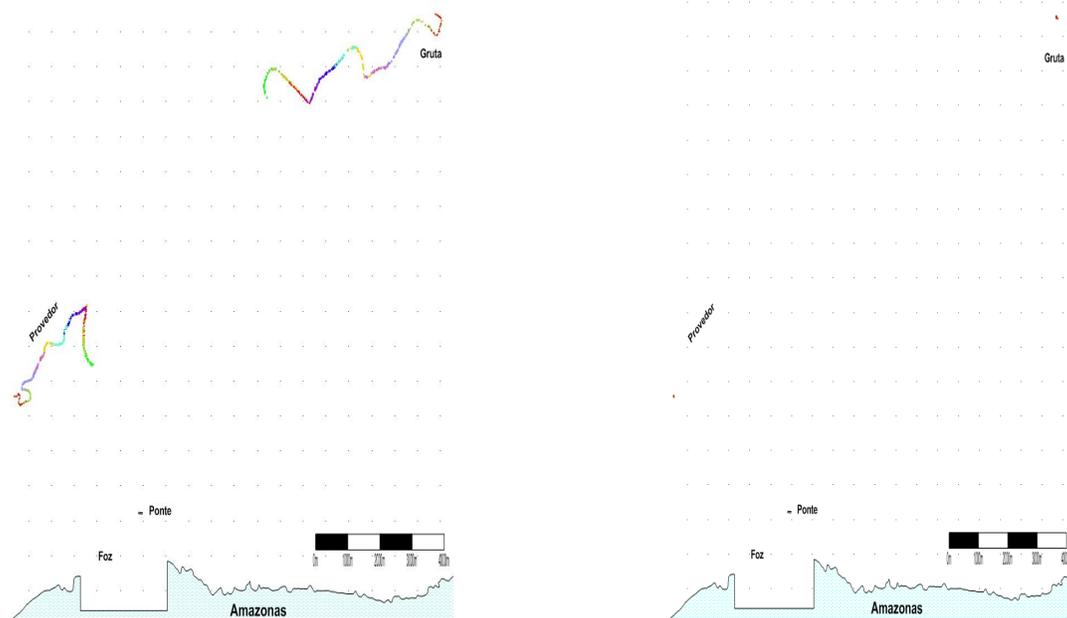


Figura 5.12 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Providor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 4 h de simulação.

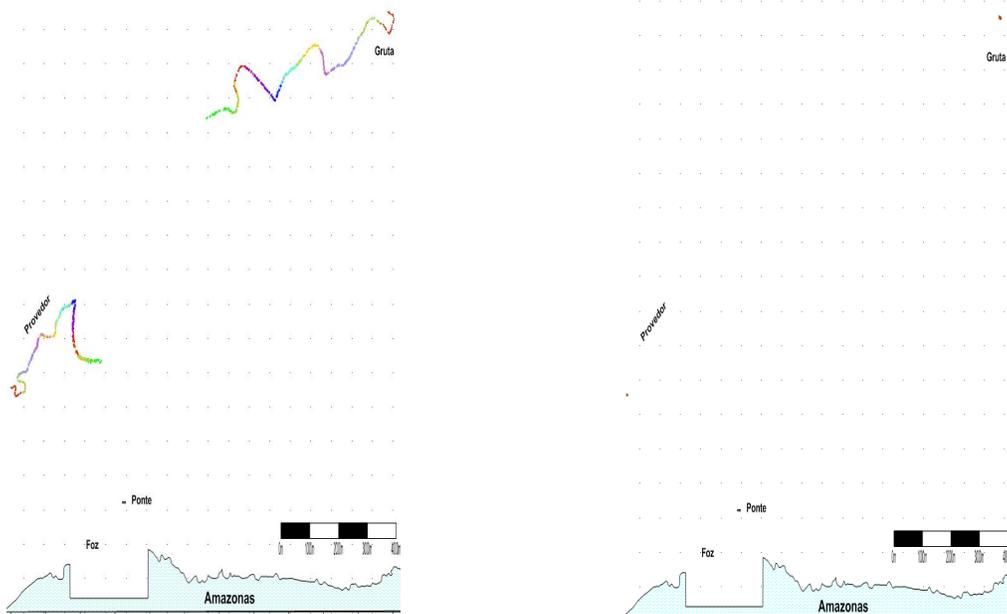


Figura 5.13 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Providor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 5 h de simulação.

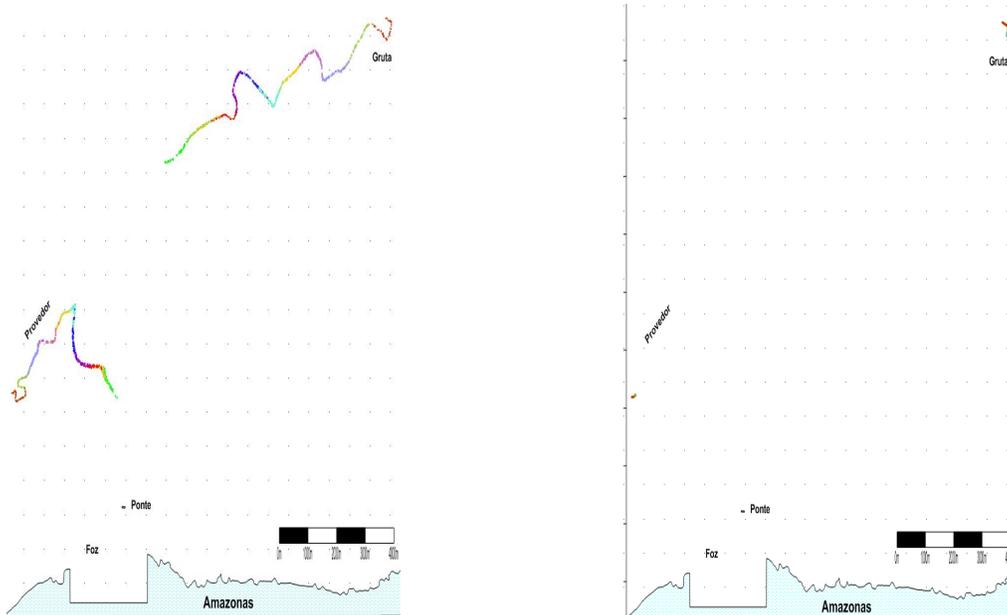


Figura 5.14 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Providor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 6 h de simulação.

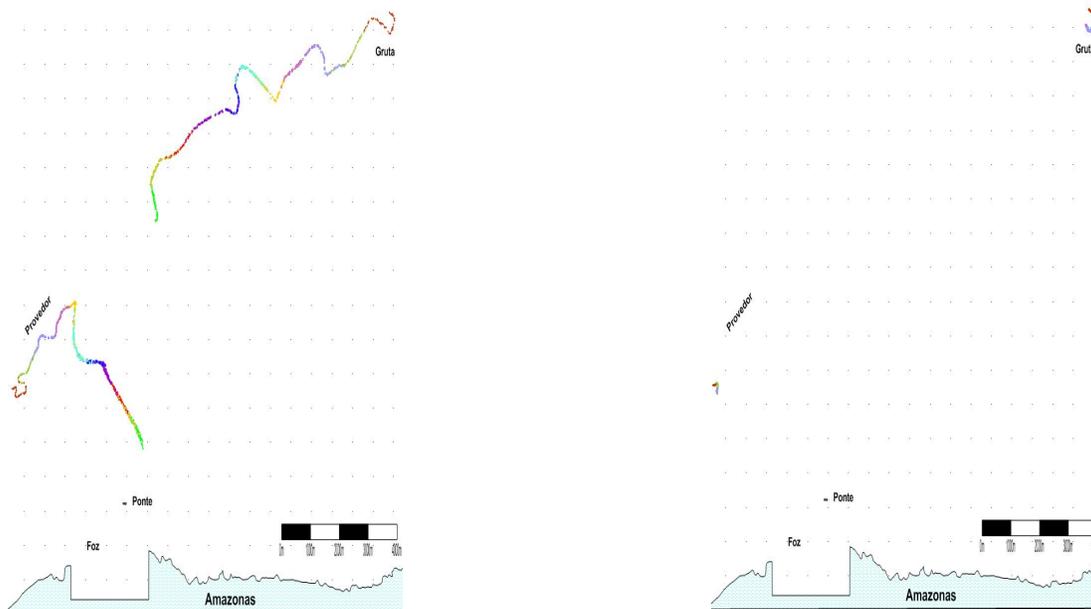


Figura 5.15- Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Providor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 7 h de simulação.

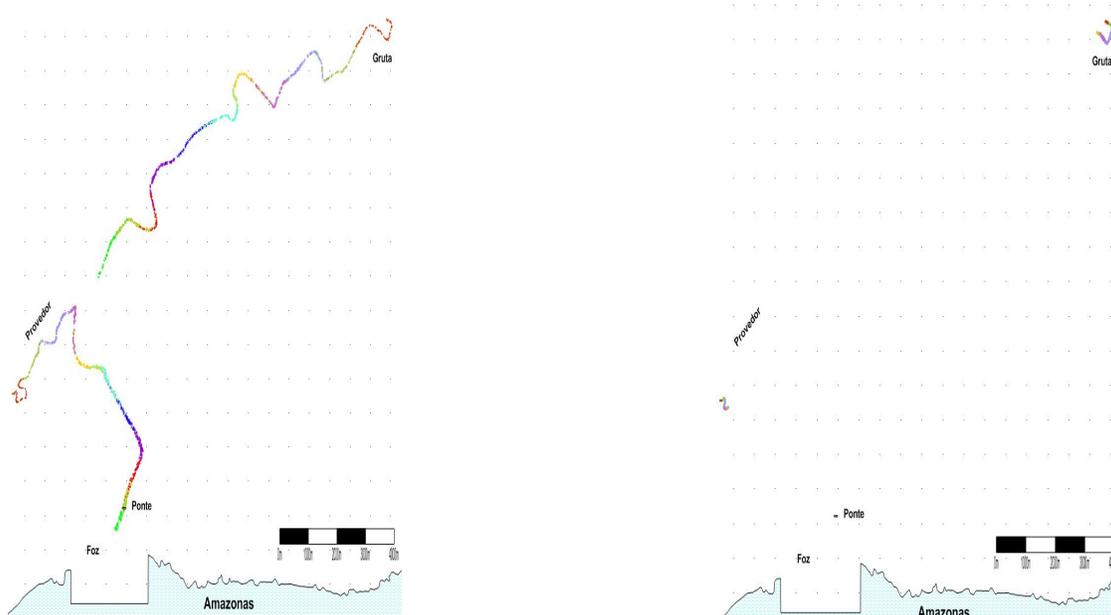


Figura 5.16 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Providor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 8 h de simulação.

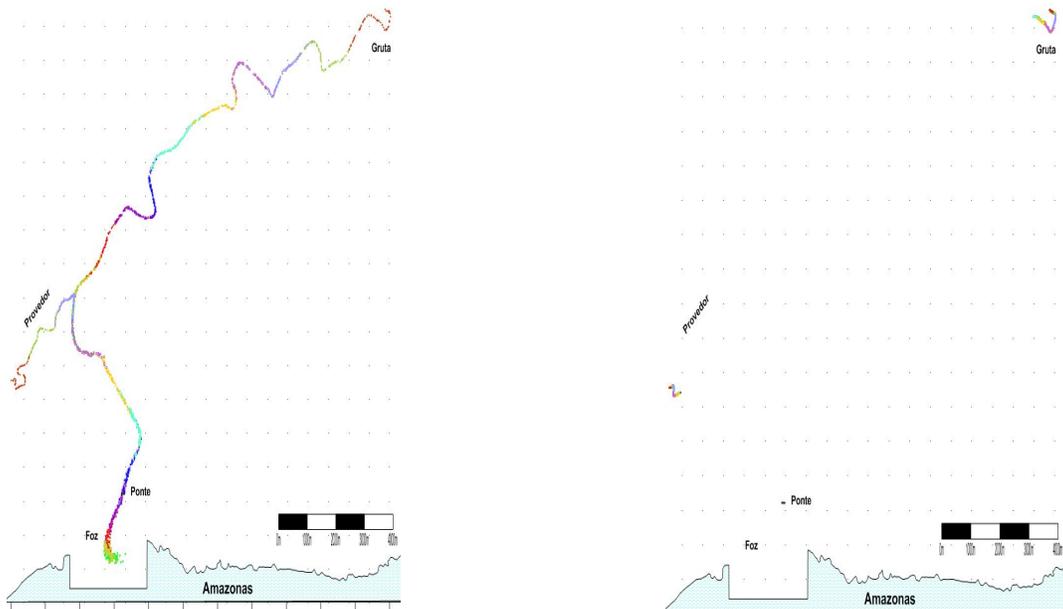


Figura 5.17- Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Provedor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 9 h de simulação.

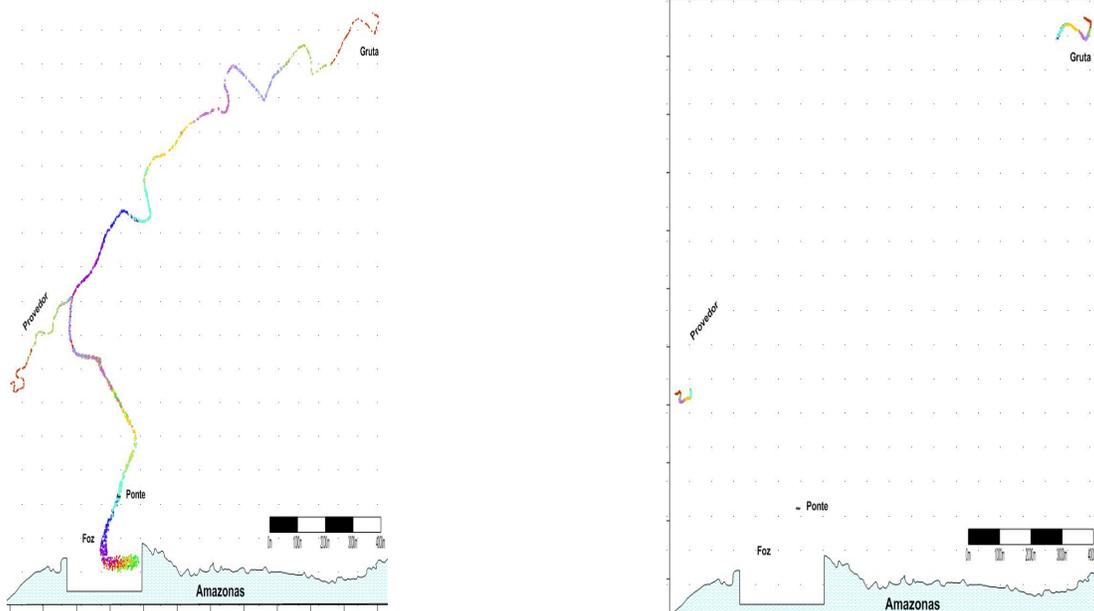


Figura 5.18 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Provedor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 10 h de simulação.

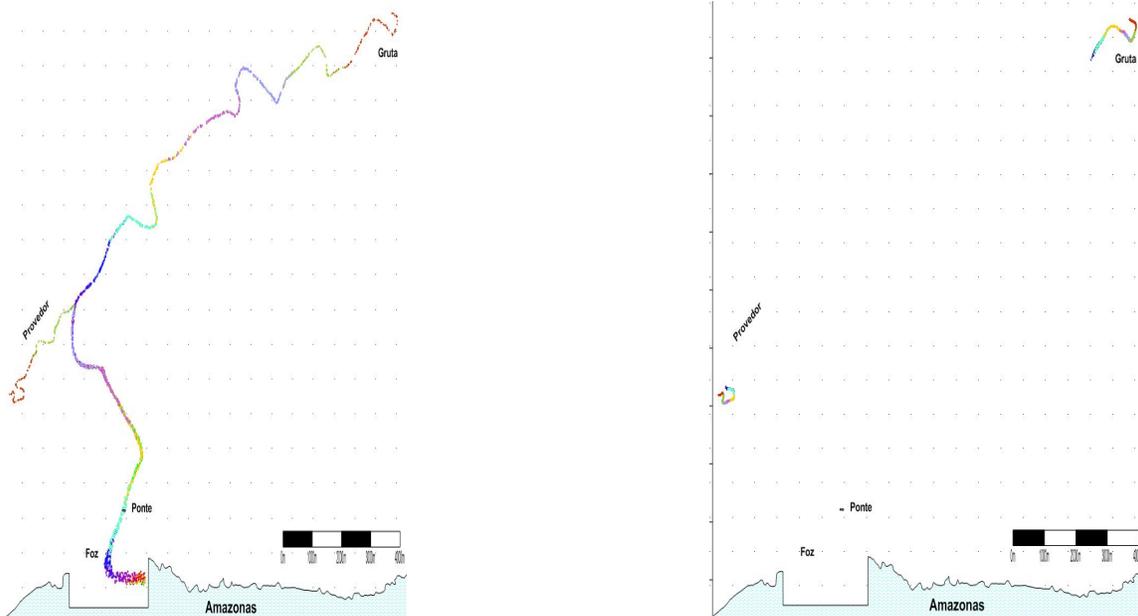


Figura 5.19 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Provedor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 11 h de simulação.

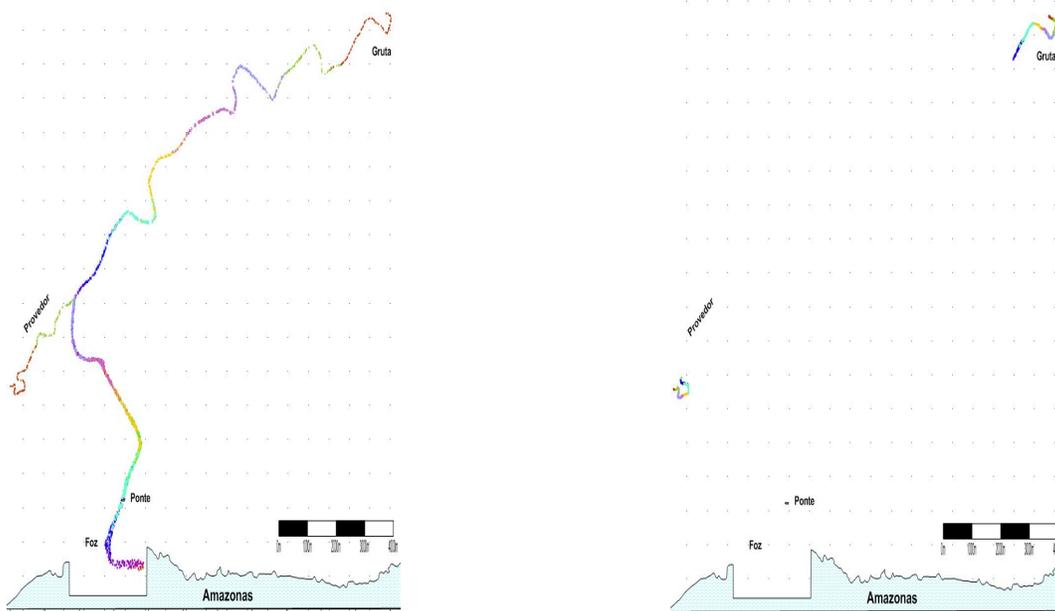


Figura 5.20 - Nuvem de contaminante proveniente de duas fontes retangulares emissoras (Provedor e Gruta), sem decaimento, para o cenário 2002 (esquerda) cheia e (direita) estiagem, observadas simultaneamente após 12 h de simulação.

Observando-se a sequência de Figuras é possível avaliar que a nuvem de contaminantes, não se dispersa da mesma maneira nos dois cenários. Em razão das maiores velocidades no cenário 2002 cheia, a dispersão é bem mais acentuada neste cenário que na estiagem. No cenário de cheia, após 12 h de simulação ainda há contaminantes ao longo do rio que se apresentam com concentrações diferentes. Na simulação realizada foram necessárias 175 h (7,3 dias) para que toda nuvem de poluente deixasse o canal principal. Outra observação que é feita refere-se ao comportamento da nuvem na confluência do igarapé Provedor com o Fortaleza: ela não segue à montante, mas sim desloca-se em sentido à foz. A explicação para esse comportamento é em razão do fluxo oriundo do Gruta influenciar fortemente na dinâmica do rio. Por outro lado, no cenário de estiagem, mesmo após o tempo de simulação de 15 dias (360 h) ainda há contaminantes no rio. Este é um dado que pode ser utilizado em futuros monitoramentos para estabelecer o tempo de autodepuração do rio.

A consistência de dados e a distribuição temporal e espacial das informações não foram suficientes para a modelagem da qualidade de água no igarapé da Fortaleza, mas mostrou-se satisfatória para estimar qual o tempo de residência das águas no igarapé. Este tempo para as águas estuarinas mostrou-se dependente da variabilidade climática não ultrapassando 24 horas na estação chuvosa, enquanto na estiagem foi de até 82 horas. Para Santos (2004), quando o tempo de residência das águas de um rio é pequeno pode ser um fator limitante da produção primária, pois os nutrientes permanecem pouco tempo no seu interior. Takiyama et al. (2007a), no entanto, ao avaliar parâmetros de qualidade de água, destaca que os índices de Oxigênio Dissolvido (OD), por exemplo, sofrem melhora gradativa à medida que as águas do rio Amazonas penetram no igarapé. Cunha (2003) também concluiu que os pontos mais afastados da foz do igarapé são os que apresentam os piores índices para parâmetros de qualidade de água como OD, pH e número mais provável de coliformes fecais (NMP/100 ml).

Para um mesmo cenário, os pontos que apresentaram valores relativamente menores de tempos de residência são aqueles que se localizam mais próximos à foz do igarapé. Mas isso não significa que são menos vulneráveis que aqueles que estão mais distante. Próximo à ponte, por exemplo, onde localiza-se um ancoradouro, o tempo de renovação é pequeno, mas este local pode estar sujeito a outros tipos de contaminantes, tais como o óleo derramado das embarcações ou a água de lastro dos navios que passam pelo canal do rio Amazonas. A Figura 6.21, apresenta a estimativa dos valores de tempo de residência resultantes da modelagem para o cenário 2002 cheia. Onde observa-se que o tempo de residência próximo à ponte é inferior 6 h, isto é, a água leva um ciclo de maré para se renovar neste ponto.

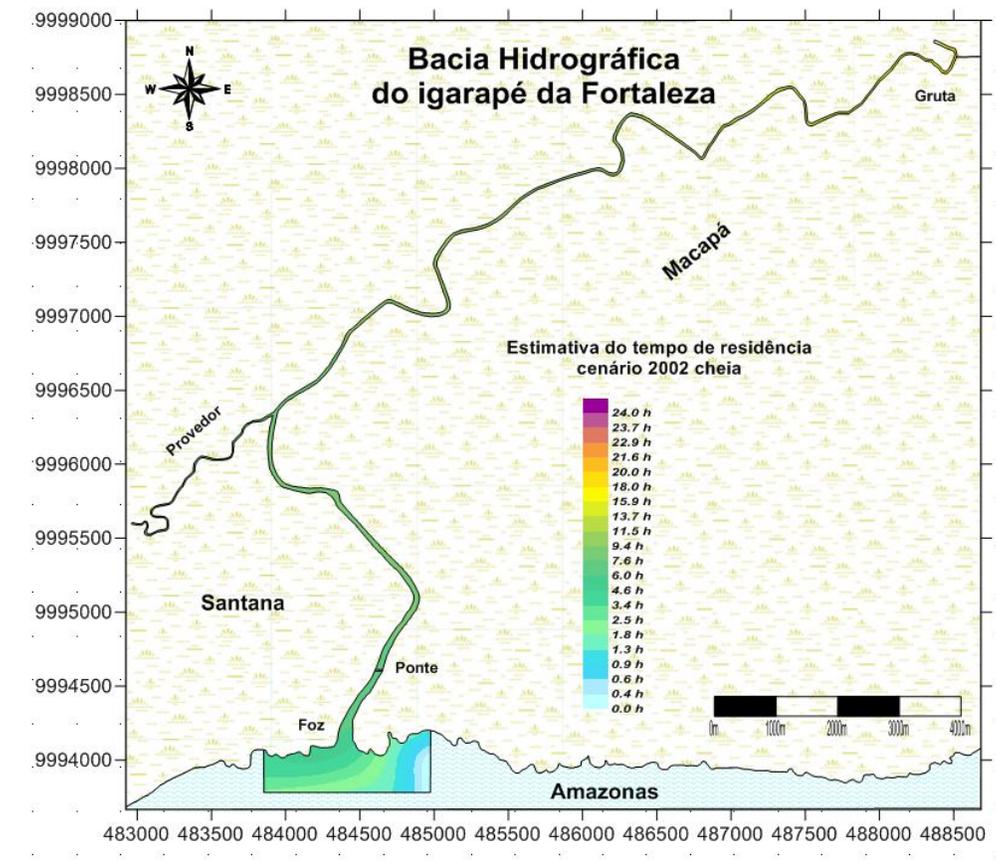


Figura 5.21 – Estimativa do tempo de residência para o cenário 2002 cheia no canal do igarapé da Fortaleza.



## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os rios são muito mais do que espaços que contêm água. Eles abrigam uma rica biodiversidade de fauna e de flora e nos oferecem múltiplos benefícios. E não precisamos esperar anos para comprovar as consequências de sua degradação. Para acelerar o “progresso”, muitos rios foram modificados e encontraram pela frente desmatamentos, consequências de queimadas, atividades extrativistas, problemas com agrotóxicos, construções de estradas e obras hidráulicas, moradias irregulares e muito lixo.

Os resultados da modelagem da circulação hidrodinâmica realizada no igarapé da Fortaleza devem ser considerados qualitativamente, visto que não foi possível realizar a calibração e validação do modelo dentro do intervalo de tempo simulado. No entanto, quando são comparados os valores fornecidos pelo modelo com os dados medidos de campo ou apresentados em estudos anteriores, mesmo observando-se a não calibração do modelo, conclui-se que o sistema apresentado é capaz de caracterizar a circulação hidrodinâmica do trecho modelado. Comprovando-se, a hipótese proposta pela dissertação. Portanto, o SisBAHIA mostrou-se viável para assimilar as limitações impostas e forneceu dados que permitem uma melhor compreensão da hidrodinâmica do igarapé da Fortaleza.

Ao observar os dados de maré, a modelagem hidrodinâmica do igarapé da Fortaleza não confirmou a prevalência da maré vazante sobre a enchente. No entanto, foi compatível em relação ao tipo de maré observado como sendo semidiurna (constituído por duas preamares (PM) e duas baixa-mares (BM)) com um período de aproximadamente 12:30 h.

Os campos de velocidade mostram-se fortemente associados tanto à dinâmica da maré do rio Amazonas quanto ao aporte de precipitação à montante. Os valores de fluxo apresentam a mesma ordem de grandeza comparados a outras pesquisas e sugere que monitoramentos futuros relacionados à biodiversidade aquática ou qualidade de água observem a estação sazonal

(preferencialmente na estiagem) e a característica hidrodinâmica (coletas na região interna da curva do rio). Considerando também a dinâmica do transporte de contaminantes recomenda-se definir um ponto próximo à confluência do igarapé da Fortaleza com o igarapé Provedor como local para monitoramento permanente (instalação de uma estação automática de monitoramento), para dar suporte às ações de gerenciamento dos recursos hídricos.

O crescimento populacional e o uso diverso do solo podem vir a agravar a situação ambiental atual da bacia. O aumento populacional urbano na área da bacia, aparentemente não altera o comportamento hidrodinâmico do igarapé, mas aumenta o tempo de dispersão dos poluentes carregados para o leito do rio, produzindo alterações na qualidade de água que não foram estimadas pelo presente estudo.

O tempo de renovação das águas no igarapé da Fortaleza é influenciado pela variação climática, com valores variando de menos de 24 h até 3 dias e meio. Como as medições disponíveis para comparação referem-se ao ano de 2002, seria conveniente que os dados de condições de contorno do modelo fossem atualizados.

As pesquisas futuras devem priorizar a atualização batimétrica não só do trecho ora estudado, mas de toda a extensão do canal. Assim, se poderia otimizar o conhecimento sobre a dinâmica de funcionamento dos ecossistemas presentes na bacia e seu grau de dependência com o igarapé da Fortaleza.

Outra recomendação é que a área modelada seja ampliada. Neste estudo, por exemplo, não foram considerados os fluxos dos outros afluentes do igarapé da Fortaleza, esses devem futuramente ser inseridos como contribuintes do fluxo de vazão do canal principal. Trata-se de uma estratégia para melhorar a gestão desse ecossistema de importância ecológica, econômica, social e cultural para a sociedade amapaense.

O passo de tempo utilizado pelo modelo foi de 4 s, o que produziu um ganho real de 32 vezes o intervalo de tempo simulado, ou seja, podemos simular um dia em apenas 45 minutos. O aumento na velocidade dos processadores pode

propiciar ganhos ainda maiores. Um passo de tempo maior não aumenta o ganho da simulação. Esse parâmetro é utilizado como condição que o sistema usa na resolução das equações intrínsecas ao modelo. Futuramente será possível, a partir de dados confiáveis, simularmos anos em poucas horas.

A análise do capítulo anterior permite constatar que os objetivos propostos pelo estudo se efetivaram. A simulação de cenários, considerando aspectos climáticos sazonais; a modelagem hidrodinâmica do igarapé e a estimativa do tempo de residência das águas; formam um conjunto de dados úteis ao gerenciamento da bacia do igarapé da Fortaleza e estimulam a continuidade da pesquisa.

Neste estudo, a capacidade de simulação do SisBAHIA ficou limitada devido à quantidade e qualidade das informações que foram obtidas. À primeira vista seria mais fácil usar um modelo “mais simples”. Porém, a modelagem numérica aplicada aos sistemas ambientais não é um mero modismo. Pelo contrário, seu uso prescinde de se conhecer o funcionamento do sistema. Essa busca por representações cada vez mais fieis à realidade tem levado à proposição de modelos cada vez mais robustos. Este é o caminho natural da investigação científica: melhorar a técnica, a ferramenta de investigação sem desconsiderar a qualidade das informações.



## REFERÊNCIAS<sup>9</sup>

ADGER, N. et al. **Mudança do Clima 2007: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade à Mudança do Clima: Sumário para os Formuladores de Políticas**. mai. 2007.

AGOSTINHO, A. A. et al. Conservação da biodiversidade em águas continentais do Brasil. *Megadiversidade*, 1(1). jul. 70-78p. 2005.

AGUIAR, J do S. e SILVA, L M dos S. Caracterização e Avaliação das Condições de Vida das Populações Residentes nas Ressacas Urbanas dos Municípios de Macapá e Santana. In: **Diagnóstico de Ressacas do Estado do Amapá: Bacias do Igarapé da Fortaleza e do Rio Curiaú**. Luis Roberto Takiyama e Arnaldo de Queiroz da Silva (orgs.). Macapá: IEPA-SETEC, 2003.

AMAPÁ (Estado). **Lei n. 0388**, Dispõe sobre os instrumentos de controle do acesso à biodiversidade do Estado do Amapá e dá outras. 1997.

\_\_\_\_\_. **Lei n. 0455, de 22 de julho de 1999**. Dispõe sobre a delimitação e tombamento das áreas de “ressacas” localizadas no estado do Amapá e dá outras providências. Diário Oficial [do] Estado do Amapá, Macapá, n. 2099, 23 jul. 1999.

\_\_\_\_\_. **Lei Nº 0686**, Dispõe sobre a Política de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado do Amapá dá outras providências. 2002.

\_\_\_\_\_. **Lei n. 0835, de 27 de maio de 2004**. Dispõe sobre a ocupação urbana e periurbana, reordenamento territorial, uso econômico e gestão ambiental das áreas de “ressacas” e várzeas localizadas no estado do Amapá e dá outras providências. Diário Oficial [do] Estado do Amapá, Macapá, n. 3286, 27 mai. 2004.

AMARAL, K. J. **Estuário do Rio Macaé: Modelagem Computacional Como Ferramenta Para o Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos**. 2003. 160p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

ARAGON, L. E. (Org.) **Problemática do uso local e global da água na Amazônia**. Belém: NAEA/UFPA, 2003. 504p.

ARAÚJO, S. C. de S. **Modelos de Simulação baseados em Raciocínio Qualitativo para Avaliação da Qualidade da água em Bacias Hidrográficas**. 2005. 218 f. Tese (Doutorado em Ecologia). Instituto de Biologia, Universidade de Brasília. 2005.

---

<sup>9</sup> Baseadas na norma NBR 6023, de 2002, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

ASSAD, A. L. D. **Biodiversidade: Institucionalização e Programas Governamentais no Brasil**. Tese de Doutorado (Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências). Campinas, 2000.

BÁRBARA, V. F. **Uso do Modelo QUAL2E no Estudo da Qualidade da Água e da Capacidade de Autodepuração do Rio Araguari – AP (Amazônia)**. 2006. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.

BASTOS, C. M. C. B. **Conflitos ambientais Urbanos em Áreas de Ressaca: Um Estudo da Comunidade Negra da Lagoa dos Índios em Macapá/AP**. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Centro de Desenvolvimento Sustentável. Brasília, 2006. 187p. ilustr.

BOCATO JR, F. C. **Valoração econômica de ativos naturais urbanos: o caso da área de preservação ambiental da Fazendinha e seu entorno, Macapá – Amapá**. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical), Universidade Federal do Amapá, Macapá, 100p, 2009.

BECKER, Bertha. **Amazônia: geopolítica na virada do III milênio**. Rio de Janeiro: Garamond, 2004. 172p.

BERNARDES, L. N. C. Tipos de clima do estado do Rio de Janeiro. Revista Brasileira de Geografia, v. 14, n. 1, p. 57 – 80. 1952.

BONGANHA, C. A. **A utilização da modelagem matemática como ferramenta para a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos: uma proposta para o município de Araraquara – SP**. 2005. 135p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente). Centro Universitário de Araraquara (UNIARA). 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. Primeiro Relatório Nacional para a Convenção sobre Diversidade Biológica: Brasil. Brasília, MMA, 1998. 283 p.

\_\_\_\_\_. Agência Nacional de Águas (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2009** / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2009. 204 p. II.

\_\_\_\_\_. **Decreto Federal nº 24.643 de 10 de julho de 1934**– Código de Águas. Brasília, 1934.

\_\_\_\_\_. **Lei nº. 4771, de 15 de setembro de 1965**. Dispõe sobre o novo Código Florestal Brasileiro. Brasília, DF, 16 setembro 1965.

\_\_\_\_\_. Conferência das Nações Unidas Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1992, Rio de Janeiro. **Agenda 21**. Brasília: Senado Federal, Subsecretaria de Edições Técnicas, 1996.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos

Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Relator: Fernando Henrique Cardoso. Diário Oficial da União, Brasília, 8 de janeiro de 1997.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 9.984. de 17 de julho de 2000.** Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas – ANA, Brasília, DF. 2000.

\_\_\_\_\_. **Portaria 518/2004.** Padrão de potabilidade da água para consumo humano. Ministério da Saúde, Brasília.

\_\_\_\_\_. Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

BRAVO DE LA PARRA, R., POGGIALE, J.-C., 2005. Theoretical ecology and mathematical modelling: problems and methods. *Ecol. Model.* 188, 1–2.

BRITO, D. C. **Aplicação do Sistema de Modelagem da Qualidade da Água QUAL2KW em Grandes Rios: O Caso do Alto e Médio Rio Araguari – AP.** 2008. 144 p. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical), Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2008.

CEARÁ (Estado). **Avaliação do Uso Potencial de Áreas Estuarinas a Partir da Identificação e Caracterização do Comportamento de Variáveis Hidro-Climáticas, Oceanográficas e Ambientais – Estudos de Caso: Rio Pirangi-CE.** Relatório Final. Convênio FUNCAP/CNPq/PRONEX. Fortaleza, jan. 2007.

CHAPRA, S. C. **Surface water quality modeling.** McGraw-Hill, 1997.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais.** Editora Edgard Blucher, 1999 (4ª reimpressão. 2007) São Paulo. 236p.

CLARKE, R. e KING, J. **O atlas da água: o mapeamento completo do recurso mais precioso do planeta.** São Paulo: Publifolha, 2005. 128p.

COELHO, Benedito de Assis et al. **Ressacas: por quê protegê-las?** Macapá: SEMA, 2006. 22p.

COELHO, M. C. N. **Impactos ambientais em áreas urbanas – Teorias, conceitos e metodologia de pesquisa.** In: GUERRA, Antonio José Teixeira e CUNHA, Sandra Baptista da (orgs.). *Impactos ambientais urbanos no Brasil.* 3ª ed., Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.

COSTA, D. da J. F. da et al. **O processo de ocupação da ressaca dos bairros Universidade e Zerão.** Trabalho de Conclusão de Curso. 77 f. Universidade Federal do Amapá. Macapá, 2002.

COELHO NETO, A. L. O geocossistema da Floresta da Tijuca. In: ABREU, M.A.A. Natureza e sociedade no Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Biblioteca Carioca/ IPLANRIO, 1985. p.104-142.

COSTA NETO, S. V. et al.. Inventário Florístico das Ressacas das Bacias do Igarapé da Fortaleza e do Rio Curiaú. In: Takiyama, L.R. ; Silva, A.Q. da (orgs.). **Diagnóstico das Ressacas do Estado do Amapá: Bacias do Igarapé da Fortaleza e Rio Curiaú**, Macapá-AP, CPAQ/IEPA e DGEO/SEMA, 2003, p.1-22.

CUNHA, A. C. e CUNHA, H. F. A. **Water Pollution Survey in Rivers of the State of Amapá - Brazil**. 5Th Workshop sobre Ecossistemas Amazônicos - ECOLAB., Macapá - AP, v. 1, 2000.

\_\_\_\_\_, A. C. et al. **Approaches to Evaluation of Self-purification in Estuarine Rivers of Southeast of Amapá State - Brazil** (Resumo Expandido). Congresso da Associação Brasileira do Quaternário - ABEQUA, Rio Grande do Sul, v. 1, p. 152-153, 2001.

\_\_\_\_\_, A. C. e COUTO, R. (Orgs.) **Diagnóstico Rápido Participativo na Bacia do Igarapé da Fortaleza – AP**. Governo do Estado do Amapá-GEA/SETEC. (prelo). (2002). 53 p.

\_\_\_\_\_, A. C; et al.. Estudo Preliminar Sobre a Variação Espaço-Temporal de Parâmetros de Qualidade de Água no Igarapé da Fortaleza. pp. 105-136 In: Takiyama, L.R. ; Silva, A.Q. da (orgs.). **Diagnóstico das Ressacas do Estado do Amapá: Bacias do Igarapé da Fortaleza e Rio Curiaú**, Macapá-AP, CPAQ/IEPA e DGEO/SEMA, 2003, p.105-136.

\_\_\_\_\_, A. C. et al. **Qualidade microbiológica da água de rios de áreas urbanas e periurbanas no baixo Amazonas: o caso do Amapá**. Revista da ABES, Rio de Janeiro, v. 9, n. 4, p. 322-328, 2004.

\_\_\_\_\_, A. C. **Pollutants movement in the environment: the shallow flow experimentation and numerical simulation on Matapi River mouth, in Amapá/Brazil, Estuarine Coast**. Pos-doctorate in engineering. American World University/AWU. EUA. 111 p. 2008.

DRUMMOND, J. A.; CASTRO, T. C. A. de, e BRITO, D. M. C. Atlas das Unidades de Conservação do Estado do Amapá. Macapá: MMA/IBAMA; GEA/SEMA, 2008. 128p.

EHRlich, P. R. **A perda da Biodiversidade - causas e conseqüências**. In: WILSON, E. (Editor) e PETER, F. M. (Subeditor). Biodiversidade. São Paulo. Ed. Nova Fronteira, 1997. p. 27-35..

ESRI. **ArcGIS Desktop, Tools for Authoring, Editing, and Analyzing Geographic Information**. New York St, RedLands CA, USA. 2007.

ESTEVEs, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro, Interciência/Finep. 602p. 1998.

FERREIRA, C. de F. **Avaliação microbiológica e físico-química do igarapé das Pedrinhas**. Trabalho de Conclusão de Curso. 50 f. Universidade Federal do Amapá. Macapá, 2005.

FRAGOSO Jr, C. R., FERREIRA, T. F. e MARQUES, D. MOTA. **Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos**. São Paulo- SP, Oficina de Textos, 2009. 303p.

GAMA, C. S. e HALBOTH, D. A. Ictiofauna das Ressacas das Bacias do Igarapé da Fortaleza e do Rio Curiaú. In: Takiyama, L.R. ; Silva, A.Q. da (orgs.). **Diagnóstico das Ressacas do Estado do Amapá: Bacias do Igarapé da Fortaleza e Rio Curiaú, Macapá-AP**, CPAQ/IEPA e DGEO/SEMA, 2003, p.23-52.

GOOGLE EARTH, também disponível em: < <http://earth.google.com/intl/pt/>>. Acesso em: 20 de nov. de 2008.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Degradação ambiental. In: CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand. Brasil, 1996. p. 337-339.

GUERRA, M. et al. Agriculture, Biodiversity, and 'Appropriate Biotechnologies'. In Brazil. *Ciência e Cultura Journal of Brazilian Association for the Advancement of Science*. 1998, Volume 50 (6). Novembro/Dezembro.

HORTON, R. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. New York: Geological Society of American Bulletin, 1945. v.56. p. 807-813.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Contagem da população. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/default.php>. Acessado em: 13 de mai de 2009.

JATOBÁ, S. U. S.; BURSZTYN, M.; RIBAS, O. T. **Gestão ambiental urbana. roteiro metodológico aplicável a comunidades urbanas locais**. In. THEODORO, S. H. (Org.). *Conflitos e uso sustentável dos recursos naturais*. Rio de Janeiro: Garamond, 2002.

JUNIOR, A. de A. Q. et al. **A dinâmica pesqueira no igarapé da Fortaleza; um diagnóstico sócio-ambiental no período de 10/05/2003 a 01/05/2004**. Trabalho de Conclusão de Curso. 60 f. Universidade Federal do Amapá. Macapá, 2004.

LIMA, R. A. P. de. Imigrantes e qualidade de vida na Amazônia setentrional brasileira IN: **Scripta Nova Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Universidad de Barcelona** [ISSN 1138-9788] Nº 45 (31), 1 de agosto de 1999.

KOBIYAMA, M. e MOTA, A. .A. Recursos hídricos e saneamento. In: **Seminário Saneamento Ambiental (2008: Rio Negrinho)**, Rio Negrinho: ACIRNE, Anais, 2008. CD-rom. 33p.

KOLDITZ, Olaf. **Computational Methods in Environmental Fluid Mechanics**, 2nd ed. Springer-Verlag .2002. 378p.

LUCAS, E. W M, BARRETO, N. J. C. e CUNHA, A. C. **Variabilidade hidrológica da bacia do Rio Jari (AP): estudo de caso do ano de 2000**. In: Tempo, Clima e Recursos Hídricos: Resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá. Capítulo 07. (Orgs) CUNHA, A. C.; SOUZA, E. B. e CUNHA, H. F. A. Macapá – AP. IEPA. p 119-134. 2010.

MACAPÁ (Município). **Lei 0948, de 17 de janeiro de 1999**. Dispõe sobre a Lei de proteção, controle, conservação e melhoria do meio ambiente no município de Macapá e dá outras providências. Diário Oficial [do] Município de Macapá, n. 421, 1999. p. 49-74, 18 jan. 1999.

\_\_\_\_\_. **Plano diretor de desenvolvimento urbano e ambiental de Macapá**. Macapá, P.M.M. – SEMPLA, IBAM. 2004. 81p. ilustr.

Macrodiagnóstico do Estado do Amapá: primeira aproximação do ZEE/ Equipe Técnica do ZEE - AP. -- 3. ed. rev. ampl. --Macapá: IEPA, 2008. 142p. Disponível em: <<http://www.iepa.ap.gov.br/arquivopdf/macrodiagnostico.pdf>>

MILANO, M. S. **Biodiversidade, Ciência e Tecnologia**. In: Seminário Internacional sobre Direito da Biodiversidade. Brasília: Conselho de Justiça Federal. 11 a 14 de maio, 1999, 14 p. (Revista CEJ, Brasília n.8, p. 86-94, maio/ago.)

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. Aplicativo Série Histórica 6**, Brasília, 2009.

MIRANDA, L. B; CASTRO, B. M. e KJERV, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo. Acadêmica; 42. 414 p.2002.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 28 jun. 2009.

MONTE-MÓR, R. L. M. **Urbanização extensiva e lógicas de povoamento: um olhar ambiental**. In: SANTOS, M.; SOUZA, M. A. de & SILVEIRA, M. L. (Orgs.). Território, Globalização e Fragmentação. São Paulo: Hucitec, 1994.

NEIFF, J. J. Aquatic plants of the Paraná River system. - In: Davies, B. R.; Walker, K. F. (eds.): **The ecology of river systems**. Dr. W. Junk Publishers: Dordrecht; 1986. p. 557-571.

NERI, S. H. A. **A utilização das ferramentas de Geoprocessamento para identificação de comunidades expostas a Hepatite A nas áreas de Ressacas dos Municípios de Macapá e Santana/AP** – Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2004. 173p.

OLIVEIRA, A. M. e CUNHA, A. C. **Impactos socioeconômicos associados às enchentes de 2000 e 2006 no Município de Laranjal do Jari.** In: Tempo, Clima e Recursos Hídricos: Resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá. Capítulo 11. (Orgs) CUNHA, A. C.; SOUZA, E. B. e CUNHA, H. F. A. Macapá – AP. IEPA. p 196-211. 2010.

OLIVEIRA, D. M. Considerações sobre o comportamento das marés e de alguns parâmetros físico-químicos no Arquipélago do Bailique, Macapá-AP. In: Seminário de Iniciação Científica, UNIFAP, 2001. p. 45.

OLIVEIRA, M. A. T. e HERMANN, M L P. **Ocupação do solo e riscos ambientais na área cornubada de Florianópolis.** In: GUERRA, A J T. e CUNHA, S B da (orgs.). Impactos ambientais urbanos no Brasil. 3ª ed., Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. p. 147-188.

OLIVEIRA, S. de A. de O.; NETA, M. D. da S., e PINHEIRO, R. da S. **Saneamento básico: o abastecimento de água potável e suas conseqüências no bairro da Pedrinhas.** Trabalho de Conclusão de Curso. 65 f. Universidade Federal do Amapá. Macapá, 2001.

PASCOALOTO, D., PINTO, A. G. N., e TAKANO, E E A. Características Físicas e Comunidades de Macroalgas em um Igarapé de Terra Firme na Reserva Florestal Adolpho Ducke (Manaus/Am). **Caminhos de Geografia.** Uberlândia. v. 9, n. 25. 108 – 114, 2008.

PEREIRA, Domingos Leonardo Vieira. **Distribuição e Chave Taxonômica de Gêneros de Gerromorpha e Nepomorpha (Insecta: Heteroptera) na Amazônia Central.** 2004. 141p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Programa de Pós-Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais do convênio INPA/UFAM. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2004.

PINHEIRO, L. A. R et al. Aplicação de simulação computacional à dispersão de poluentes no baixo rio Amazonas: potenciais riscos à captação de água de Macapá-Amapá. Ver. Amazônia Ci.& Desenvolvimento, Belém-PA, v. 4, n.7, julho, 2008.

RIBEIRO, W. C. O Patrimônio Ambiental Brasileiro. Folha de São Paulo. 06/06/97. Cad. 1, p. 3.

ROCHA, D. **Proposta Metodológica para Integração dos Instrumentos de Gerenciamento de Recursos Hídricos.** 2007. 285 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)– COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

ROSMAN, P. C. C. *Referência Técnica do SISBAHIA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental*, Programa COPPE: Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Rio de Janeiro, Brasil. 2009. 213p.

SANSONOWSKI, R. C. **A Modelagem Numérica como Instrumento de Apoio à Avaliação Ambiental**. 2003. 121p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo), Faculdade de Engenharia Mecânica/Instituto de Geociências da Universidade de Campinas, Campinas, 2003.

SANTANA (Município). **Plano Diretor Participativo de Santana – AP: Proposta texto-base**. *Consulta social*. Secretaria de Desenvolvimento Urbano. 2006;

SANTOS, A. R. Caracterização morfológica, hidrológica e ambiental da bacia hidrográfica do rio Turvo Sujo, Viçosa, MG. 2001. 141f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

SANTOS, I et al; **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza, CEHPAR. 2001.

SANTOS, M. et al. Aplicação de um modelo hidrodinâmico (MOHID) como ferramenta na avaliação da qualidade da água da Lagoa de Obidos. In: **1º Seminário sobre sistemas lagunares e costeiros**, 30 Setembro a 2 de Outubro, Vila Nova de Santo Andre, Portugal. 2004.

SANTOS, M. M., SAMPAIO, M. F. **Estratégia Nacional de Diversidade Biológica**. Relatório sobre Análise dos Artigos 12 e 18 da Convenção da Diversidade Biológica: acesso a recursos genéticos, conhecimento associado e repartição de benefícios. Campinas: Base de Dados Tropical, 1998. Versão outubro de 1998. 10 p. (<http://www.bdt.org.br/publicacoes/politica/gtt/gtt5>)

SEMA – **Base de Cartográfica do Estado do Amapá**, escala 1:100.000. Amapá, 2003.

SILVA, A de Q da et al. **Carta ambiental da bacia hidrográfica do Igarapé Fortaleza**. 2005. 28p.

SILVA ,J. M. C. O destino das áreas de endemismo da Amazônia. *Megadiversidade* 1 (1). jul. 124-131p. 2005.

SILVA, M. S., MARTINS, M. H. A. e OLIVEIRA, D M. Hidrodinâmica do Igarapé da Fortaleza e do Rio Curiaú e Morfologia de Fundo (Batimetria) do Igarapé da Fortaleza In: Takiyama, L. R. e Silva, A. Q. da (orgs.). **Diagnóstico das Ressacas do Estado do Amapá: Bacias do Igarapé da Fortaleza e Rio Curiaú, Macapá-AP**, CPAQ/IEPA e DGEO/SEMA, 2003, p.137-154.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. São Paulo: EDUSP, 2001. p 35-51.

SOUZA, E. B. e CUNHA, A. C. **Climatologia de Precipitação no Amapá: Mecanismos Climáticos de Grande Escala**. In: *Tempo, Clima e Recursos Hídricos: Resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá*. Capítulo 10. (Orgs) CUNHA, A. C.; SOUZA, E. B. e CUNHA, H. F. A. Macapá – AP. IEPA. p 177-195. 2010.

\_\_\_\_\_, E. B. et al. **Precipitação sazonal sobre a Amazônia Oriental no período chuvoso: observações e simulações regionais com o RegCM3.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 24, n.2, 111-124. 2009.

SMITH, J. e SMITH P. **How to develop a model.** Oxford University Press. 2007, 125p.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. New Halen: Transactions: American Geophysical Union, 1957. v.38. p. 913-920.

TAKIYAMA, L. R., et al. Qualidade das Águas das Ressacas das Bacias do Igarapé da Fortaleza e do Rio Curiaú In: TAKIYAMA, L. R., SILVA, A. Q. da (orgs.). **Diagnóstico das Ressacas do Estado do Amapá: Bacias do Igarapé da Fortaleza e Rio Curiaú,** Macapá-AP, CPAQ/IEPA e DGEO/SEMA, 2003, p.81-104.

\_\_\_\_\_, L. R.; RODRIGUES, P A., e CALDAS, U M. **Impacto ambiental em igarapés urbanos nas cidades de Macapá-ap e Santana-ap: variações da qualidade da água em função das marés.** In: 1a REUNIÃO REGIONAL DA SBPC/AMAPÁ. mar. 2007.

\_\_\_\_\_. L. R. et al. Subsídios à gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Matapi. Relatório Técnico Final Processo CNPq No. 504083/2003-1. Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá – IEPA. Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro – GERCO-AP. Macapá, jul. 2007.

TRATA BRASIL: **Saneamento, Saúde e o Bolso do Consumidor.** Coordenação Marcelo Côrtes Néri. Rio de Janeiro: FGV/IBRE, CPS, 2008. [230]p.

TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH, (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v.4). 1997.

\_\_\_\_\_, C. E. M. **Modelos Hidrológicos.** 2. Ed. Editora da UFRGS, Porto Alegre, 2005. 680 p.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: Enfrentando a escassez.** São Paulo: Rima, IIE, 2. ed., 2005. 248p.

TUNDISI, J. G. **Exploração do potencial hidrelétrico da Amazônia.** ESTUDOS AVANÇADOS 21 (59), 109-114p. 2007

VILLELA, S. M. e MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada.** São Paulo, Editora McGraw Hill do Brasil, 1975. 245p.

WISLER, C. O.; BRATER, E. F. **Hidrologia.** Tradução e publicação de Missão Norte-Americana pela Cooperação Econômica e Técnica no Brasil. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A., 1964.



## **ANEXO**

Cd-room contendo a base de dados Fortaleza.mdb, e demais pastas com planilhas, malhas, mapas e resultados para os modelos utilizados.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)