VINÍCIU FAGUNDES BÁRBARA

USO DO MODELO QUAL2E NO ESTUDO DA QUALIDADE DA ÁGUA E DA CAPACIDADE DE AUTODEPURAÇÃO DO RIO ARAGUARI - AP (AMAZÔNIA)

THE USE OF QUAL2E MODEL IN THE STUDY OF THE WATER QUALITY AND THE AUTODEPURATION CAPACITY OF ARAGUARI RIVER - AP (AMAZON)

Goiânia/GO

- Outubro, 2006 -

VINÍCIU FAGUNDES BÁRBARA

USO DO MODELO QUAL2E NO ESTUDO DA QUALIDADE DA ÁGUA E DA CAPACIDADE DE AUTODEPURAÇÃO DO RIO ARAGUARI - AP (AMAZÔNIA)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

Área de concentração do programa: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Queija de Siqueira.

Co-orientador: Prof. Dr. Alan Cavalcanti da Cunha.

Goiânia/GO

- Outubro, 2006 -

VINÍCIU FAGUNDES BÁRBARA

USO DO MODELO QUAL2E NO ESTUDO DA QUALIDADE DA ÁGUA E DA CAPACIDADE DE AUTODEPURAÇÃO DO RIO ARAGUARI - AP (AMAZÔNIA)

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, aprovada em 20 de outubro de 2006 pela seguinte Banca Examinadora:

_____

Prof. Dr. Eduardo Queija de Siqueira – UFG
Presidente da Banca

_____

Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga – UFG
Examinador Interno

_____

Prof. Dra. Maria do Carmo Cauduro Gastaldini – UFSM
Examinadora Externa

Em primeiro lugar, ao meu país, terra abençoada que me gerou e criou. Em segundo, à minha amada família, tutora do meu ser, e, em especial, à minha mãe, incentivadora do meu saber.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela presença constante e inexplicável, pelo apoio nos momentos de fraqueza e pelo amor sem limites.

Ao professor e amigo, Erides Campos Antunes, pelos conselhos valiosos quando na inscrição no mestrado, pela confiança de sempre e por todas as oportunidades já proporcionadas à minha pessoa.

Às queridas amigas e companheiras de profissão, Karla Alcione da Silva e Andréa Rodrigues da Cunha Naves, pelo empréstimo de livros, pelos diálogos edificantes nos almoços no Restaurante Universitário e por serem verdadeiras parceiras na consolidação da profissão que abraçamos.

Ao Rogério Menezes, pelas informações cedidas, e aos companheiros de mestrado, Alessandro Ribeiro de Sousa, Elza Glauce, Frederico Carlos M. de Menezes Filho, Gunter Assis, Osmar Mendes e Paulo de Tarso Ferreira Sales, pelo apoio de sempre.

Às funcionárias Deuzélia Rosa Gomes dos Santos, Joana D'Arc Ferreira de Freitas e às professoras Luiza Cintra Campos, Lílian Ribeiro de Rezende e Orlene Silva da Costa, pela ajuda constante.

Ao professor Eduardo Queija de Siqueira, pela paciência, disposição, confiança e disponibilidade irrestritas e que, como poucos profissionais, sabe realmente honrar o título de professor e de orientador.

Ao professor Alan Cavalcanti da Cunha, pela co-orientação incansável (assumindo um papel quase de "pai"), pela disponibilidade de tempo e conhecimentos e pelos ensinamentos sempre presentes, principalmente na "hora sagrada do café e do açaí" que, com certeza, perdurarão para a vida toda; cabe ressaltar um agradecimento especial à sua família, que me fez sentir como membro da mesma.

Às minhas irmãs Carla Fagundes Bárbara e Karina Fagundes Bárbara, por estarem ao meu lado em mais esta vitória; aos cunhados Arley Evandro e Gustavo Nepomuceno, por me auxiliarem, mesmo que indiretamente; aos sobrinhos Gabriel e Felipe, por me distraírem nos momentos de cansaço mental e emocional; à avó Terezinha de Jesus Neto Fagundes e aos demais parentes pelo apoio contínuo.

Aos amigos Ana Cláudia Rocha, Família Creti, José Tarcísio, Lígia Abreu, Lívia Riether, Pedro Henrique Mourão, Ribamar Félix de Araújo, Sandro Raphael Borges, e, em especial, à Eliane Carvalhaes Pereira; a todos agradeço pelo companheirismo, estímulo e por me entenderem nos momentos de estudo.

Aos seguintes órgãos e seus respectivos funcionários, pelo apoio institucional, financeiro e/ou logístico: Agência Nacional de Águas (ANA), Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A (ELETRONORTE), Companhia de Água e Esgoto do Amapá (CAESA), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/CTHidro), Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA), Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente (PPGEMA), Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado do Amapá (SETEC), Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Amapá (SEMA/AP) e Universidade Federal de Goiás (UFG).

“Todo mundo quer voar,
nas costas de um beija-flor,
todo mundo quer viver de amor,
mas nem tudo é só querer.

Todo mundo quer ser Rei,
nas costas de um homem bom,
todo mundo quer voar além,
mas é preciso aprender.

Voarás, voarás...”

Paulinho Pedra Azul

RESUMO

A presente investigação apresenta uma caracterização hidráulica e da qualidade da água do médio curso do Rio Araguari (AP), em uma extensão de aproximadamente 120 km. O Rio Araguari, principal corpo hídrico do Estado do Amapá, está situado dentro dos domínios da Amazônia (a maior floresta tropical do planeta), em uma região com grande potencial hidrelétrico. No trecho em estudo, encontra-se implantada a Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes (UHECN), a primeira barragem edificada na Amazônia com fins de geração de energia elétrica. Foi desenvolvido um modelo de oxigênio dissolvido (OD) e de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) com o auxílio do sistema de modelagem QUAL2E, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA). Para isso, procedeu-se, durante um ano e meio, com expedições de campo que objetivaram caracterizar, espacialmente e sazonalmente, os parâmetros hidráulicos, cinéticos e de qualidade da água do Rio Araguari. As etapas da modelagem envolveram a construção, análise de sensibilidade e a calibração do modelo. Posteriormente efetuou-se, com o modelo calibrado, a simulação de três cenários hipotéticos na bacia: (1) a introdução de uma nova barragem a montante da UHECN; (2) o descarte de efluentes *in natura* oriundos dos municípios de Porto Grande e Ferreira Gomes (com crescimento populacional) nas águas do corpo hídrico (período de alta vazão); e (3) o mesmo cenário anterior, porém para a condição de baixas vazões. A matéria orgânica carbonácea presente na água desse rio decompõe-se, em média, nos primeiros cinco dias de incubação. Os valores obtidos experimentalmente para o coeficiente de deoxigenação, K_1, ficaram compreendidos entre 0,13 d^{-1} e 0,90 d^{-1}. O coeficiente de reaeração, K_2, obtido com base nas características hidráulicas, ficaram compreendidos entre 0,01 d^{-1} a 1,40 d^{-1}. Os resultados das campanhas amostrais mostraram que os parâmetros de qualidade da água que se apresentaram mais alterados no trecho em estudo foram: potencial hidrogeniônico, condutividade, sólidos totais, sólidos suspensos, coliformes termotolerantes, amônia, nitrato, demanda bioquímica de oxigênio e oxigênio dissolvido. Quando comparados com a Resolução 357/2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), os parâmetros que mais infringiram esse instrumento jurídico foram: potencial hidrogeniônico, coliformes termotolerantes, nitrato e demanda bioquímica de oxigênio. A nova barragem não interfere significativamente as concentrações de OD e DBO do Rio Araguari, não se podendo fazer a mesma afirmação para os demais parâmetros de qualidade da água. As características que mais se alteraram devido à obra da UHECN foram: hidráulicas (vazão, velocidade, largura e área da seção transversal), e de qualidade da água (potencial hidrogeniônico, condutividade, temperatura da água, sólidos totais, sólidos suspensos, coliformes termotolerantes, nitrato, cloreto, demanda bioquímica de oxigênio e oxigênio dissolvido). O cenário simulado com o descarte nas águas do manancial de efluentes *in natura* dos municípios de Porto Grande e Ferreira Gomes, com o crescimento populacional, no período das baixas vazões, foi o mais desfavorável dentre os cenários investigados com relação à qualidade da água. A pior situação aconteceu na época das estiagens, em que as vazões do curso d'água diminuem consideravelmente e, consequentemente, sua capacidade de diluição também. Neste período, ocorreu uma maior depleção do oxigênio dissolvido presente na água, que alcançou concentrações abaixo de 4,00 mg/L, vindo a infringir a Resolução 357/2005 do CONAMA.

Palavras-chave: Rio Araguari, Amazônia, QUAL2E, hidrelétrica.

ABSTRACT

The current investigation presents a characterization of the hydraulics and water quality of the medium course of the Araguari River, State of Amapá, Brazil, which has an approximate extension of 120 km. The Araguari River is the main water resource of the State of Amapá, located in the domains of the Amazon (the greatest tropical forest of the planet) in a region with great hydropower potential. In the studied river stretch, there is a hydropower generation station called Coaracy Nunes (UHECN), the first barrage build in the Amazon for electrical generation. A model for DO and BOD has been built with the help of the QUAL2E modeling system, developed by the United States Environmental Protection Agency. For this purpose, during one and a half year, field trips have been conducted with the intent of characterizing spacially and seasonally the hydraulics, kinetics and water quality of the Araguari River. The modeling stages involved model construction, sensitivity analisys and calibration. After model calibration, three hypothetic cenarios were simulated: (1) the introduction of a new barrage upstream of the UHECN; (2) municipal untreated wastewater inflow from Porto Grande and Ferreira Gomes into the waterbody, including populational growth, during the high flow period; (3) the same cenario as before but during the low flow period. The carbonaceous organic matter present in water hás shown to decompose, in average, in the first five days of incubation. The values obtained for the BOD first order reaction coefficient layed between 0,13 d^{-1} and 0,90 d^{-1}. The reaeration coefficient, K_2, estimated based on hydraulic characteristics, layed between 0,01 d^{-1} and 1,40 d^{-1}. The results of the sample collections in the river stretch has shown that, amongst the parameters measured, the following were mostly altered: pH, electric conductivity, total solids, suspended solids, fecal coliforms, ammonium, nitrate, BOD and DO. Fecal coliforms, pH, nitrate and BOD were in disagreement with limits defined by Brazilian Legislation on water quality (CONAMA 357/2005). The river impoundment has shown not to significantly alter the DO and BOD concentrations, however, the same statement can not be made for other water characteristics. The water characteristics mostly altered by the UHECN were: hydraulic (flow, velocity, breadth, cross-sectional area) and water quality (pH, electric conductivity, water temperature, total solids, suspended solids, fecal coliforms, nitrate, chloride, BOD and DO). The simulated scenario with municipal untreated wastewater inflow from Porto Grande and Ferreira Gomes (including population growth) into the waterbody during low flow period showed the most critical results in terms of the water quality. The worst simulated situation happened in the dry period in which the river flows decreased significantly and so did the river dilution capacity. In this period the greatest OD depletion occurred and achieved concentrations bellow 4.0 mg/L, in disagreement with Brazilian Water Quality Legislation (CONAMA 357/2005).

Keywords: Araguari River, Amazon, QUAL2E, hydropower station.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: Região Hidrográfica da Amazônia (Departamento de Geoprocessamento da ANA, 2005) 36

FIGURA 2.2: Gráfico genérico do tempo de transição da DBO carbonácea para a DBO nitrogenada 46

FIGURA 2.3: Regiões do mundo com os maiores potenciais de geração de energia elétrica, em TWh/ano: destaque para o Brasil (ANEEL, 2005) 55

FIGURA 2.4: Distribuição da energia primária no Brasil (Braga et al., 2002) 56

FIGURA 2.5: Distribuição das UHEs no território brasileiro: Amazônia ainda pouco explorada (ANEEL, 2005) 57

FIGURA 2.6: a) Vista geral da UHECN; b) Outdoor comemorativo dos trinta anos da usina (Imagens obtidas durante a 5ª Coleta, em maio/2006) 58

FIGURA 2.7: Esquema das relações entre constituintes e coeficientes cinéticos no modelo QUAL2E (BROWN e BARNWELL, 1987 - com adptações) 73

FIGURA 3.1: Precipitação média mensal no período de um ano no Estado do Amapá (PROVAM, 1990) 79

FIGURA 3.2: Rede Hidrometeorológica do Estado do Amapá (Departamento de Geoprocessamento da ANA, 2005 - com adaptações) 81

FIGURA 3.3: Primeira previsão de tempo da história do Estado do Amapá, feita pelo LABHIDRO/IEPA (Cunha, 2004) 82

FIGURA 3.4: Localização da BH do Rio Araguari segundo a nova divisão feita pela ANA (Departamento de Geoprocessamento da ANA, 2006 - com adaptações) 83

FIGURA 3.5: Mapa de localização do Rio Araguari (Elaborado pelo autor com imagens oriundas do HIDROWEB/ANA, 2006) 84

FIGURA 3.6: a) Vista geral do Rio Araguari; b) População ribeirinha (Imagens obtidas durante a 2ª Coleta, em maio/2005) 86

FIGURA 3.7: a) UHE de Coaracy Nunes; b) Presença de rochas de grandes dimensões na calha principal do rio (Imagens obtidas durante a 3ª Coleta, em novembro/2005) 86

FIGURA 3.8: a) Vista geral do reservatório da UHECN; b) Criação de búfalos (bubalinocultura) nas margens do Rio Araguari (Imagens obtidas durante a 4ª Coleta, em março/2005) 86

FIGURA 3.9: Mapa geológico da região do Médio Araguari (ARCVIEW GIA versão 3.1, 2006) 87

FIGURA 3.10: a) Desmatamento da mata ciliar no médio curso do Rio Araguari; b) Dragagem dos sedimentos de fundo do Rio Araguari (Imagens obtidas durante a 1ª Coleta, em novembro/2004) 88

FIGURA 4.1: Aspectos gerais do trecho que foi estudado na presente pesquisa: o Médio Araguari (Departamento de Geoprocessamento da SEMA/AP, 2006 - com adaptações) 93

FIGURA 4.2: Perfil esquemático do trecho modelado 95

FIGURA 4.3: Gráficos da determinação de K_1, da L e do tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada: a) Seção 3: 1ª Coleta (novembro/2004); b) Seção 10: 1ª Coleta (novembro/2004) 97

FIGURA 4.4: Gráficos da determinação de K_1, da L e do tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada: a) Seção 12: 1ª Coleta (novembro/2004); b) Seção 3: 2ª Coleta (maio/2005) 97

FIGURA 4.5: Gráficos da determinação de K_1, da L e do tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada: a) Seção 10: 2ª Coleta (maio/2005); b) Seção 12: 2ª Coleta (maio/2005) 98

FIGURA 4.6: Gráficos da determinação de K_1, da L e do tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada: a) Seção 3: 3ª Coleta (novembro/2005); b) Seção 10: 3ª Coleta (novembro/2005) 98

FIGURA 4.7: Gráficos da determinação de K_1, da L e do tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada: a) Seção 12: 3ª Coleta (novembro/2005); b) Seção 3: 4ª Coleta (março/2006) 98

FIGURA 4.8: Gráficos da determinação de K_1, da L e do tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada: a) Seção 10: 4ª Coleta (março/2006); b) Seção 12: 4ª Coleta (março/2006) 99

FIGURA 4.9: Gráficos da determinação de K_1, da L e do tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada: a) Seção 3: 5ª Coleta (maio/2006); b) Seção 10: 5ª Coleta (maio/2006) 99

FIGURA 4.10: Gráficos da determinação de K_1, da L e do tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada: Seção 12: 5ª Coleta (maio/2006) 99

FIGURA 4.11: Ajuste não-linear para a determinação dos coeficientes de descarga para a Seção 3 104

FIGURA 4.12: Ajuste não-linear para a determinação dos coeficientes de descarga para a Seção 6 104

FIGURA 4.13: Ajuste não-linear para a determinação dos coeficientes de descarga para a Estação Fluviométrica de Porto Platon 104

FIGURA 4.14: Ajuste não-linear para a determinação dos coeficientes de descarga para a Seção R3 105

FIGURA 4.15: Ajuste não-linear para a determinação dos coeficientes de descarga para a Seção 11 105

FIGURA 4.16: Ajuste não-linear para a determinação dos coeficientes de descarga para a Seção 15 105

FIGURA 4.17: Ajuste não-linear para a determinação dos coeficientes de descarga para a Seção 20 106

FIGURA 4.18: Esquema de obtenção dos valores de K_2 (CUNHA et al. 2001 - com adaptações) 106

FIGURA 4.19: a) Gráfico de K_2 na Seção 3 (a montante da UHECN); b) Gráfico de K_2 na Seção 6 (a montante da UHECN) 107

FIGURA 4.20: a) Gráfico de K_2 na Seção de Porto Platon (a montante da UHECN); b) Gráfico de K_2 na Seção R3 (dentro do reservatório da usina) 107

FIGURA 4.21: a) Gráfico de K_2 na Seção 11 (a jusante da UHECN); b) Gráfico

de K_2 na Seção 15 (a jusante da UHECN) 107

FIGURA 4.22: Gráfico de K_2 na Seção 20 (a jusante da UHECN) 108

FIGURA 4.23: a) Momento da vedação do frasco de Winkler com o oxigênio dissolvido fixado; b) Titulação do oxigênio dissolvido no laboratório da CAESA: início da análise laboratorial de oxigênio dissolvido conforme o Método de Winkler (Imagens obtidas durante a 2ª Coleta, em maio/2005) 110

FIGURA 4.24: a) e b) Leitura de parâmetros de qualidade da água na Multisonda Horiba U-10; c) Medição de transparência com o Disco de Secchi (Imagens obtidas durante as três últimas expedições de campo: novembro/2005, março e maio/2006) 111

FIGURA 4.25: a) e b) Frascos de oxigênio dissolvido sendo preparados para a titulação; c) Amostras de água para realização da análise de amônia (Imagens obtidas durante a 5ª Coleta: maio/2006) 111

FIGURA 4.26: Curva de calibração do oxímetro da UFG 112

FIGURA 4.27: Valores de oxigênio dissolvido: concentração de saturação, Método Eletroquímico e Método de Winkler: a) 1ª Coleta (novembro/2004); b) 2ª Coleta (maio/2005) 113

FIGURA 4.28: Valores de oxigênio dissolvido: concentração de saturação, Método Eletroquímico e Método de Winkler: a) 3ª Coleta (novembro/2005); b) 4ª Coleta (março/2006) 113

FIGURA 4.29: Valores de oxigênio dissolvido: concentração de saturação, Método Eletroquímico e Método de Winkler: 5ª Coleta (maio/2006) 114

FIGURA 4.30: a) Alguns modelos de Acoustic Doppler Current Profiler existentes atualmente; b) Detalhe das células tradutoras do ADCP; (Rdinstruments, 2005) 116

FIGURA 4.31: a) Esquema das conexões para funcionamento do ADCP; b) Uma forma de acoplamento do ADCP à embarcação (Rdinstruments, 2005) 117

FIGURA 4.32: Gráfico de saída do programa WinRiver Mode 118

FIGURA 4.33: Perfil esquemático do Médio Araguari nas seis seções de medição de vazão/Fotos do ADCP em funcionamento (Imagens obtidas durante o ano de 2005: seca e cheia. Figura elaborada pelo autor) 119

FIGURA 4.34: Medições da temperatura do ar feitas em duas campanhas de coleta de dados no Rio Araguari 120

FIGURA 4.35: Parâmetros que acusaram maior influência, em termos de OD, no modelo QUAL2E 123

FIGURA 4.36: Minimização dos erros entre OD medido e OD calculado na calibração do QUAL2E 125

FIGURA 4.37: a) Gráfico da diferença entre OD medido e OD calculado no modelo QUAL2E: antes da calibração; b) Gráfico da diferença entre OD medido e OD calculado no modelo QUAL2E: após a calibração 126

FIGURA 5.1: Gráfico da variação espacial e sazonal do potencial hidrogeniônico da água do Rio Araguari 131

FIGURA 5.2: Gráfico da variação espacial e sazonal da condutividade da água do Rio Araguari 132

FIGURA 5.3: a) Gráfico da variação espacial e sazonal da temperatura da água do Rio Araguari; b) Gráfico da variação da temperatura da água em função da vazão 133

FIGURA 5.4: Gráfico da variação espacial e sazonal da transparência da água do Rio Araguari 135

FIGURA 5.5: Gráfico da variação espacial e sazonal dos sólidos totais da água do Rio Araguari 136

FIGURA 5.6: Gráfico da variação espacial e sazonal dos sólidos suspensos da água do Rio Araguari 137

FIGURA 5.7: a) Gráfico da variação espacial e sazonal dos coliformes termotolerantes presentes na água do Rio Araguari; b) Gráfico da variação dos coliformes termotolerantes em função da vazão 139

FIGURA 5.8: Gráfico da variação espacial e sazonal da amônia da água do Rio Araguari 140

FIGURA 5.9: a) Gráfico da variação espacial e sazonal do nitrato da água do Rio Araguari 141

FIGURA 5.10: a) Gráfico da variação espacial e sazonal do cloreto da água do Rio Araguari; b) Gráfico da concentração temporal do cloreto em função da vazão 142

FIGURA 5.11: Gráfico da variação espacial e sazonal da demanda bioquímica de oxigênio da água do Rio Araguari 144

FIGURA 5.12: a) Gráfico da variação espacial e sazonal do oxigênio dissolvido na água do Rio Araguari; b) Gráfico da variação temporal do oxigênio dissolvido na água do Rio Araguari 146

FIGURA 5.13: Gráfico da variação espacial e sazonal da vazão média do Rio Araguari 147

FIGURA 5.14: Gráfico da comparação entre os valores de vazão medidos com o ADCP e os dados fornecidos pelo departamento de operação da UHECN 148

FIGURA 5.15: Gráfico da variação espacial e sazonal da velocidade média da água do Rio Araguari 149

FIGURA 5.16: Gráfico da variação espacial e sazonal da profundidade média do Rio Araguari 150

FIGURA 5.17: Gráfico da variação espacial e sazonal da largura média do Rio Araguari 151

FIGURA 5.18: Gráfico da variação espacial e sazonal da área média da seção transversal do Rio Araguari 152

FIGURA 5.19: Gráfico de saída do modelo QUAL2E: após a calibração 154

FIGURA 5.20: Gráfico de saída do modelo QUAL2E: simulação do CENÁRIO 1 155

FIGURA 5.21: Gráfico de saída do modelo QUAL2E: simulação do CENÁRIO 2 156

FIGURA 5.22: Gráfico de saída do modelo QUAL2E: simulação do CENÁRIO 3 157

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: Categoria dos principais poluentes da água e suas respectivas fontes (LIMA, 2001) 40

TABELA 2.2: Principais vantagens da utilização de modelos matemáticos de sistemas ambientais (PORTO e AZEVEDO, 2002 - com adaptações) 66

TABELA 2.3: Principais critérios que devem ser utilizados na escolha dos modelos de simulação (ORENS, 1984 - com adaptações) 67

TABELA 3.1: Informações gerais da Estação Fluviométrica de Porto Platon (HIDROWEB/ANA, 2005 - com adaptações. Acessado em 28/1/2006, ás 18:30 h)..... 82

TABELA 4.1: Informações referentes às campanhas de coleta de campo realizadas no Médio Araguari 92

TABELA 4.2: Coordenadas dos pontos de coleta 94

TABELA 4.3: Comprimento dos trechos 94

TABELA 4.4: Valores de K_1 (média) e L quantificados para o Rio Araguari 100

TABELA 4.5: Equações utilizadas para estimativa do K_2 (SIQUEIRA, 1996) 102

TABELA 4.6: Resumo das análises realizadas para obtenção dos dados de qualidade da água do Rio Araguari 109

TABELA 4.7: Caracterização dos dados climatológicos e geográficos 120

TABELA 4.8: Variáveis utilizadas como dados de entrada no modelo QUAL2E para o Rio Araguari 122

TABELA 4.9: Valores de K_1 utilizados na calibração do QUAL2E 125

TABELA 4.10: Valores de K_2 utilizados na calibração do QUAL2E 126

TABELA 4.11: Resumo dos dados do Cenário 2 no modelo QUAL2E 128

TABELA 4.12: Dados de qualidade do efluente utilizados na simulação do Cenário 2 128

TABELA 5.1: Valores dos parâmetros hidráulicos medidos nos afluentes do Rio Araguari 153

TABELA 5.2: Tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada no Rio Aragauri 153

TABELA 5.3: Análise multivariada dos parâmetros que mais influenciam K_1 no Rio Araguari 158

TABELA 5.4: Razão entre a DBO5/20 e a L nas cinco coletas realizadas no Rio Araguari 159

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler/Perfilador *Doppler*-Acústico de Corrente.
AIA	Avaliação de Impacto Ambiental.
ANA	Agência Nacional de Águas.
BH	Bacia Hidrográfica.
CAESA	Companhia de Água e Esgoto do Amapá.
CF/88	Constituição Federal de 1988.
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
C_O	Concentração de Oxigênio.
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente.
C_S	Concentração de Saturação de Oxigênio Dissolvido.
DBO e DBO5/20	Demanda Bioquímica de Oxigênio.
DBO_C	Demanda Bioquímica de Oxigênio Carbonácea.
DBO_N	Demanda Bioquímica de Oxigênio Nitrogenada.
DBO_t	Demanda Bioquímica de Oxigênio em um tempo "t" qualquer.
EIA	Estudo de Impacto Ambiental.
E_L	Coeficiente de Dispersão Longitudinal.
ELETROBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S/A.
ELETRONORTE	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A.
EPA	United States Environmental Protection Agency / Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos.
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto.
HIDROWEB	Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas.
IEPA	Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá
L	Demanda Bioquímica Última de Oxigênio.
LabHIDRO	Laboratório de Hidrometeorologia do Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá.
MMA	Ministério do Meio Ambiente.
OD	Oxigênio Dissolvido.

OEA	Organização dos Estados Americanos.
OMS	Organização Mundial de Saúde.
PCD	Plataforma Automática de Coleta de Dados.
pH	Potencial Hidrogeniônico.
PNMA	Política Nacional de Meio Ambiente.
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos.
PPGEMA	Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente.
PROVAM	Programa de Estudos e Pesquisas nos Vales Amazônicos.
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental.
SEMA/AP	Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Amapá.
SETEC	Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado do Amapá.
SNGRH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos.
SNRH	Sistema Nacional de Recursos Hídricos.
SUDAM	Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia.
TTFC/N	Tempo de Transição da Fase Carbonácea para a Nitrogenada.
UFG	Universidade Federal de Goiás.
UHE	Usina Hidrelétrica.
UHECN	Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes.
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 26
1.1 Introdução 26
1.2 Justificativa 27
1.3 Objetivos 29
1.3.1 Objetivo geral 29
1.3.2 Objetivos específicos 30

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 32
2.1 Recursos Hídricos: Aspectos Gerais e Legislação Brasileira 32
2.1.1 A distribuição da água no mundo e no Brasil 32
2.1.2 Amazônia: caracterização ambiental e disponibilidade hídrica 33
2.1.3 Aspectos qualitativos da água 38
2.1.3.1 Potencial hidrogeniônico 41
2.1.3.2 Condutividade 41
2.1.3.3 Temperatura da água 41
2.1.3.4 Transparência 42
2.1.3.5 Sólidos totais e sólidos suspensos 42
2.1.3.6 Coliformes termotolerantes 43
2.1.3.7 Nitrogênio 43
2.1.3.8 Cloreto 44
2.1.3.9 Demanda bioquímica de oxigênio 45
2.1.3.10 Oxigênio dissolvido 46
2.1.4 A capacidade de autodepuração dos corpos hídricos 47
2.1.5 A legislação hídrica brasileira 50
2.1.6 Os usos múltiplos da água 52
2.2 Hidrelétricas Brasileiras 54
2.2.1 O potencial hidrelétrico brasileiro 54
2.2.2 Impactos ambientais causados por hidrelétricas 58
2.3 A Modelagem Matemática como Instrumento de Gestão dos Recursos

Hídricos 63
2.3.1 Importância, conceito e critérios de escolha do modelo de qualidade da água 63
2.3.2 O modelo de Streeter e Phelps 68
2.3.3 O modelo QUAL2E 70

CAPÍTULO 3 - O RIO ARAGUARI 78
3.1 Os recursos hídricos do Estado do Amapá 78
3.2 A Bacia Hidrográfica do Rio Araguari 82
3.3 Pressões antrópicas no Rio Araguari 88

CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS 89
4.1 Escolha do Modelo de Qualidade da Água e do Trecho do Rio Araguari a ser Modelado 90
4.2 Determinação dos Coeficientes de Entrada no Modelo QUAL2E 91
4.2.1 Coeficiente de desoxigenação e demanda bioquímica última 96
4.2.2 Coeficiente de reaeração 100
4.2.2.1 Séries históricas 109
4.2.3 Parâmetros de qualidade da água 109
4.2.3.1 Oxigênio dissolvido 111
4.2.3.1.1 Concentração de saturação de oxigênio dissolvido 114
4.2.4 Coeficiente de dispersão longitudinal 115
4.2.5 Dados hidráulicos 116
4.2.6 Dados climatológicos e geográficos 118
4.2.7 Nitrogênio orgânico e nitrito 121
4.2.8 Demais dados utilizados na modelagem do Rio Araguari 121
4.3 Análise de Sensibilidade 123
4.4 Calibração 124
4.5 Simulações dos Cenários Futuros 127
4.6 Análise Multivariada 128

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES 130

5.1 Caracterização Espacial e Temporal da Qualidade da Água do Médio Araguari 130
5.1.1 Potencial hidrogeniônico 131
5.1.2 Condutividade 132
5.1.3 Temperatura da água 133
5.1.4 Transparência 135
5.1.5 Sólidos totais 136
5.1.6 Sólidos suspensos 137
5.1.7 Coliformes termotolerantes 138
5.1.8 Amônia 139
5.1.9 Nitrato 141
5.1.10 Cloreto 142
5.1.11 Demanda bioquímica de oxigênio 144
5.1.12 Oxigênio dissolvido 145
5.2 Caracterização Hidráulica do Médio Araguari 147
5.2.1 Vazão 147
5.2.2 Velocidade 149
5.2.3 Profundidade 150
5.2.4 Largura 150
5.2.5 Área da seção transversal 151
5.2.6 Dados hidráulicos dos afluentes do Rio Araguari 152
5.3 Tempo de Transição da Fase Carbonácea para a Nitrogenada 153
5.4 Simulações 154
5.4.1 Cenário 1 155
5.4.2 Cenário 2 156
5.4.3 Cenário 3 157
5.5 Análise Multivariada 158
5.6 Razão entre a Demanda Bioquímica de Oxigênio e a Demanda Bioquímica Última de Oxigênio 158

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES 160
6.1 Conclusões 160

6.2 Sugestões 163

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 165

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

O Estado do Amapá é detentor de uma considerável malha hídrica. Em sua região Centro-Leste encontra-se localizado o Rio Araguari (um corpo hídrico cujas águas são utilizadas para diversos fins, tais como: abastecimento público, navegação, geração de energia elétrica, criação de animais e irrigação, dentre outros), seu mais importante manancial. No seu médio curso estão localizados três importantes municípios: Porto Grande, Ferreira Gomes e Cutias. É também nessa região que encontra-se instalada a Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes (UHECN), a primeira barragem com fins de geração de energia elétrica que foi implantada, há mais de trinta anos, nos domínios da Floresta Amazônica, sendo, portanto, a principal fonte energética da região.

Segundo Cunha (2004), atualmente vislumbram-se alguns potenciais conflitos relativos aos usos das águas do Rio Araguari, principalmente entre agricultores, pecuaristas e empresas geradoras de energia elétrica, o que demonstra que essa bacia hidrográfica (BH) necessita ser gerenciada de forma economicamente eficiente e ambientalmente sustentável.

Dessa maneira, um dos principais focos da presente pesquisa consistiu em estudar a capacidade de autodepuração do Rio Araguari; para tanto, fez-se uso da modelagem matemática, onde se procurou avaliar a magnitude de alguns dos possíveis impactos que a UHECN possa estar provocando no corpo hídrico ora mencionado.

A ferramenta computacional escolhida para proceder com esse estudo foi o Sistema de Modelagem da Qualidade da Água QUAL2E, desenvolvido pela agência americana de proteção ambiental. Esse programa é um dos mais utilizados nos dias atuais por pesquisadores de várias partes do mundo. No Brasil, em especial, o mesmo já vem sendo aplicado há mais de uma década, sendo tido como instrumento de auxílio na tomada de decisões quando no gerenciamento dos recursos hídricos.

Apesar das muitas limitações e incertezas que rondam os modelos matemáticos, muitos pesquisadores os têm utilizado quando na modelagem de sistemas ambientais, uma vez que os diversos ciclos (principalmente de nutrientes) que ocorrem na natureza são muito complexos, tornando-se praticamente impossível, para o ser humano, unir e entender uma série de informações e dados desconexos (de tal forma que se consiga compreender o comportamento dos ecossistemas), sem a ajuda de programas computacionais. Esse fato torna-se ainda mais complicado quando o assunto é a Floresta Amazônica, um bioma ainda pouco conhecido e altamente singular, uma vez que o mesmo é o resultado de uma intrincada rede de relações entre os meios biótico e abiótico, divergindo de todos os demais ecossistemas existentes.

O uso de programas de modelagem computacional de sistemas ambientais deve ser difundido no país, visando à conservação dos recursos naturais e contribuindo para o correto e sustentável gerenciamento dos mesmos.

1.2 Justificativa

Até meados de 2003, devido à escassa produção literária sobre o tema, pouco se conhecia sobre as reais condições ambientais do Rio Araguari, bem como sobre os principais efeitos que a construção/funcionamento da UHECN possa ter causado na qualidade de suas águas. Além disso, nunca houve a preocupação com a sistematização de informações que pudessem servir como ferramentas úteis na gestão compartilhada desse rio; os dados existentes eram adquiridos de forma descontínua e direcionados apenas aos interesses da geração de energia elétrica. Porém, com o surgimento de legislações específicas, como a Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e a Resolução 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), e com o crescente aumento das pressões sociais, principalmente das populações ribeirinhas, tem sido suscitado no debate público o uso desse rio para outras finalidades, inclusive a de preservação e gestão dos ambientes aquáticos. Por isso, é importante conhecer os padrões das oscilações espaço-sazonais e os efeitos das ações antrópicas sob os parâmetros de qualidade da água desse manancial, principalmente porque existem cidades instaladas às suas margens. Tais

variações devem ser levadas em consideração, pois, com o crescimento das populações ribeirinhas, os aglomerados urbanos existentes nas margens desse rio demandarão água de boa qualidade para seus mais variados usos, principalmente para fins de abastecimento público, o que pode gerar conflitos futuros ou agravar os existentes.

Devido à falta de estudos específicos na Região Amazônica, há carência de informações que possam consubstanciar decisões sobre a melhor forma de utilizar seus recursos hídricos. Geralmente, esses estudos são relegados a um segundo plano. As políticas públicas costumam endereçar atenção prioritária para a proteção das florestas, olvidando-se de que estas dependem diretamente dos cursos d'água. Cabe ressaltar que os rios e a camada vegetal que cobre a Amazônia, interferem no balanço hidrológico de diversas áreas do país e do globo. Isto se dá devido às elevadas taxas de evapotranspiração advindas da interação entre os mananciais e a cobertura florestal (RIBEIRO, 1990). Além disso, a biodiversidade aquática regional, a maior do planeta (GOULDING, 1997), é diretamente afetada pelos impactos das atividades antrópicas: alguns peixes endêmicos são extremamente sensíveis às mudanças que ocorrem na qualidade da água (como, por exemplo, a diminuição das concentrações de oxigênio dissolvido - OD), e nas condições físicas do rio.

Um dos principais motivos dos conflitos de interesse pelo uso da água na Amazônia é o constante desencontro entre as políticas de saneamento e de recursos hídricos (ANA, 2005). A exemplo disso, é possível citar a questão da classificação dos rios brasileiros (quando na implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos - PNRH), onde, na Região Amazônica, essa implementação ainda é um procedimento bastante insipiente, uma vez que pouco se sabe sobre as composições químicas, físicas e biológicas das águas dos rios existentes nesse bioma e de suas interações com a biota aquática (CUNHA, 2000).

É preocupante, portanto, a carência de estudos que avaliem, de fato, o estado das águas dos rios situados na floresta tropical brasileira, especialmente no tocante aos impactos de empreendimentos como as usinas hidrelétricas, já que o maior potencial energético do país se encontra nesse local (ANEEL, 2005).

Uma das características mais marcantes na construção de usinas hidrelétricas, no passado, era a inexistência de estudos de impactos ambientais (EIAs). Havia um grande desconhecimento sobre quais seriam as principais conseqüências e o nível de abrangência das mesmas no meio natural, principalmente nos ecossistemas aquáticos.

Nesse sentido, a modelação da qualidade das águas superficiais destaca-se como uma ferramenta imprescindível no que tange às questões hídricas, pois possibilita uma abordagem holística sobre os principais mecanismos e interações que se desenvolvem em um rio. Através dos modelos matemáticos é possível compreender algumas propriedades dos sistemas aquáticos, prever suas reações a estímulos e estimar suas capacidades de autodepuração. Essas ferramentas também permitem antever os impactos decorrentes de inúmeros cenários hipotéticos, o que possibilita fundamentar as decisões de gestão de bacias hidrográficas tomadas por seus responsáveis legais.

Nessa pesquisa, o modelo QUAL2E foi utilizado, basicamente, na análise da qualidade da água do Rio Araguari, tendo sido fundamentado em informações obtidas da literatura e *in loco* durante um período de estudo de 1,5 ano. Esse modelo poderá auxiliar na busca das possíveis soluções gerenciais para a minimização dos impactos ambientais que ocorrem na bacia, principalmente no que diz respeito à geração de energia elétrica.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa foi avaliar, com o auxílio do modelo QUAL2E, a dinâmica da variação espaço-sazonal da qualidade da água do Médio Araguari, localizado no Estado do Amapá (AP), mediante a quantificação de variáveis químicas, físicas, biológicas, hidráulicas e climáticas.

1.3.2 Objetivos específicos

Foram objetivos específicos da pesquisa:

a) caracterizar a qualidade atual da água em 120 quilômetros do médio curso do Rio Araguari, verificando sua variação espacial e sazonal nos períodos de cheia e estiagem durante o período de 1,5 ano (novembro/2005 a maio/2006);

b) verificar o atendimento dos padrões de qualidade da água do trecho analisado à Resolução 357/2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente;

c) compilar, em um único documento, as informações hidráulico-sanitárias existentes sobre o Rio Araguari;

d) gerar, juntamente com o modelo QUAL2E, uma ferramenta de apoio ao gerenciamento da qualidade da água da bacia hidrográfica estudada;

e) identificar as alterações ambientais que a Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes possa estar causando nesse corpo hídrico;

f) determinar, em três seções do Médio Araguari, o coeficiente de degradação da matéria orgânica (K_1) e a demanda bioquímica última de oxigênio (L), sendo esses parâmetros fundamentais como dados de entrada no Sistema de Modelagem da Qualidade da Água QUAL2E;

g) quantificar a razão entre a demanda bioquímica de oxigênio e a demanda bioquímica última de oxigênio;

h) elencar os parâmetros de qualidade de água e hidráulicos do corpo hídrico analisado que mais influenciam o K_1;

i) verificar a existência de uma relação entre os parâmetros de qualidade da água e a vazão do Rio Araguari;

j) quantificar o tempo necessário para que haja a transição da fase carbonácea para a nitrogenada quando na decomposição da matéria orgânica presente na água do Rio Araguari;

k) conceber, para o trecho do Médio Araguari, um modelo calibrado com dados de campo para oxigênio dissolvido; e

l) simular, com o modelo calibrado, três cenários ambientais hipotéticos de uso da bacia hidrográfica.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Essa revisão bibliográfica buscou amealhar informações básicas fundamentais para a presente pesquisa, incluindo os aspectos gerais e jurídicos referentes aos recursos hídricos; o potencial hidrelétrico brasileiro e os impactos causados por empreendimentos dessa natureza; e a modelagem matemática como instrumento de gestão da água enquanto recurso natural. Cada um desses assuntos foi enfocado em subcapítulos específicos que são apresentados a seguir.

2.1 Recursos Hídricos: Aspectos Gerais e Legislação Brasileira

2.1.1 A distribuição da água no mundo e no Brasil

De acordo com a Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), a água é um recurso natural renovável, pois consegue se recompor em quantidade por meio do ciclo hidrológico. Esse fluído encontra-se disponível no planeta sob várias formas; porém, é no estado líquido que o mesmo é mais abundante na natureza, uma vez que cobre aproximadamente 70% da superfície do globo terrestre. A importância desse recurso natural para a vida é fundamental e indispensável, pois todos os seres vivos necessitam dele para sobreviver. Porém, sua presença em diferentes quantidades torna-se um fator limitante não só para o desenvolvimento econômico de uma região, mas também para o estabelecimento dos vários ecossistemas existentes (BRAGA et al., 2002).

Atualmente, considera-se que a quantidade total de água na Terra é de 1.386 milhões de km^3, sendo que esse volume tem permanecido constante no globo terrestre durante os últimos 500 milhões de anos (ANEEL, 2002). Tal valor se divide em águas subterrâneas (lençóis freáticos e aqüíferos), superficiais (oceanos, rios, lagos e represas, dentre outros), congeladas (calotas polares e geleiras), e dispersas na atmosfera (na forma de umidade do ar). Contudo, o

maior volume existente, cerca de 97,5%, é composto de água salgada, sendo que somente 2,5% forma a parcela de água potável existente no planeta. Todavia, a maior parte desse último valor encontra-se congelada nos pólos ou armazenada em aqüíferos subterrâneos, restando apenas 0,27% de água doce facilmente disponível para o homem em mananciais superficiais (TUCCI, 2001; REBOUÇAS, 2004; ANA, 2005).

Adicionalmente existe, ainda, a problemática da má distribuição da água na Terra, tanto no espaço quanto no tempo. Tal comportamento pode ser notado, por exemplo, pela existência de desertos em um mesmo continente, detentores de baixos índices de umidade, e de florestas tropicais caracterizadas por elevada umidade.

Dentre a grande maioria dos países, o Brasil é o que possui a maior disponibilidade de água, uma vez que suas coleções hídricas representam cerca de 11% do total mundial, com um volume *per capita* de aproximadamente 36.575,46 m^3/hab.ano. Os rios brasileiros produzem uma vazão de cerca de 168.790 m^3/s. Somando-se a vazão gerada na área da Floresta Amazônica, estimada em 89.000 m^3/s, a oferta de água total do país alcança a casa dos 257.790 m^3/s. Mesmo com tamanho volume, os escoamentos superficiais específicos das várias localidades brasileiras variam muito, indo desde 48,21 L/s/km^2 (na Região Hidrográfica do Atlântico Norte) e 34,21 L/s/km^2 (na Região Hidrográfica Amazônica), até 2,81 L/s/km^2 (na Região Semi-Árida do Atlântico Leste) e 4,5 L/s/km^2 (na BH do Rio São Francisco). Dessa forma, como o país enfrenta problemas ligados à má distribuição de sua população, uma vez que a maior parte da mesma encontra-se localizada em locais com baixa disponibilidade hídrica, surgem problemas de escassez em algumas regiões, principalmente na época de estiagem, como em algumas localidades do Sudeste do Brasil. Esse comportamento não se observa na Região Amazônica, que possui a maior oferta de água doce do Brasil (TUCCI, 2001; ANEEL, 2002; MMA, 2004).

2.1.2 Amazônia: caracterização ambiental e disponibilidade hídrica

Localizada na América do Sul, a Região Amazônica é formada pela maior floresta tropical do mundo, a qual se estende por mais da metade do Brasil (abrangendo os Estados do

Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e grande parte dos Estados do Mato Grosso e do Maranhão), ocupando aproximadamente 60% do território nacional. Está situada entre o Planalto das Guianas (ao Norte) e o Planalto Central Brasileiro (ao Sul), ocupando uma área de cerca de 6,5 milhões de km^2 e possuindo uma temperatura média em torno de 25ºC.

A Região Amazônica pode ser caracterizada, de acordo com Mota (2003), por duas subdivisões: terras firmes, que nunca são inundadas pela elevação dos níveis dos rios e que, em sua grande maioria, são cobertas por vegetação densa, e terras de várzeas, localizadas nas regiões marginais dos cursos d'água, sendo periodicamente inundadas (onde predominam as espécies típicas de locais pantanosos).

Segundo Hanan e Batalha (1995), a Amazônia é detentora da maior densidade mundial de recursos naturais e biodiversidade. A variedade de vida é tão grande que em um hectare de floresta podem ser encontradas até 150 espécies de árvores. Além disso, os elevados índices de temperatura, radiação solar, umidade e vento, condicionam o ritmo fenológico da floresta tropical, propiciando uma aceleração no metabolismo dos microrganismos e, conseqüentemente, na mineralização da matéria orgânica. Isso explica o fato do solo da região ser naturalmente pobre em nutrientes, servindo muito mais como elemento de fixação mecânica das espécies vegetais do que como fonte direta de nutrientes. Por isso, esse ecossistema é extremamente frágil e dependente da ciclagem de substâncias advindas da decomposição da matéria orgânica de origem primária. A maior parte dos nutrientes é oriunda da serrapilheira e dos excrementos de animais, se concentrando nos horizontes mais rasos do solo, o que força os vegetais a desenvolverem sistemas radiculares superficiais. Além disso, os mesmos autores afirmam, ainda, que a água que escorre por folhas, galhos e troncos das árvores, dissolve excrementos e materiais em decomposição oriundos da fauna em geral e se enriquece, transportando os elementos nutritivos até o solo da floresta, fertilizando-o. É possível perceber na Amazônia, portanto, a existência de um delicado equilíbrio entre os meios biótico e abiótico onde, pela capacidade que esse bioma possui de recircular a matéria orgânica, os vegetais tornam-se independentes da disponibilidade natural de nutrientes no solo, sendo isso uma característica bastante singular, o que difere esse ecossistema de praticamente todos os demais existentes no mundo.

A Rede Hidrográfica Amazônica, ilustrada na **Figura 2.1**, abrange, além do Brasil, mais seis países: Colômbia, Equador, Peru, Bolívia, Venezuela e Guianas, o que a coloca em posição privilegiada no que diz respeito à disponibilidade de água. Dentro do território brasileiro, sua vantajosa condição hídrica se dá devido ao fato do Rio Amazonas drenar uma imensa área que recebe, em mais da metade de sua superfície, índices anuais de pluviosidade que variam de 2.000 a 3.000 mm. Com uma densidade populacional atual de 1,70 hab./km^2 e disponibilidade hídrica de 4.206 km^3/ano, o que corresponde a 71,1% do total brasileiro e 8% do montante mundial, a Amazônia praticamente não se depara com problemas relacionados à oferta de recursos hídricos. Mesmo com um crescimento populacional estimado, para o ano de 2020, em 9,6 milhões de habitantes, alcançando uma densidade demográfica média de 2,5 hab./km^2, essa região não apresenta indícios de que existirão conflitos pelo uso da água (TUCCI, 2001; ANEEL, 2002; ANA, 2005).

Todavia, segundo levantamento da qualidade das águas superficiais do Brasil, promovido pela Agência Nacional de Águas (ANA) no ano de 2005, e de acordo com Mota (2003), apesar de tamanha oferta hídrica, a Região Hidrográfica Amazônica já apresenta sinais de degradação ambiental no que diz respeito à qualidade de suas águas, principalmente nos trechos localizados nas proximidades dos grandes centros urbanos. Segundo esses autores, as ações antrópicas que mais interferem no delicado equilíbrio hídrico da floresta tropical são as apresentadas a seguir:

- O despejo de efluentes domésticos que ocorre, em sua grande maioria, de maneira pontual, mais precisamente nas imediações de grandes cidades, tais como Manaus, Santarém, Porto Velho, Boa Vista, Macapá e Rio Branco. Essa situação é compreensível quando se observam os baixos índices de coleta e tratamento de esgoto da Região Norte do Brasil, que são de 10,4% e 2,3%, respectivamente.
- O descarte e a contaminação por mercúrio, que é um metal tóxico utilizado de forma indiscriminada na recuperação do ouro em garimpos. Estima-se que cerca de 100 a 130 toneladas anuais desse elemento foram introduzidas na Amazônia pela atividade garimpeira nos últimos anos, onde 40% do montante total foi descartado diretamente nos corpos d'água e 60% foi disperso na atmosfera, sendo, conseqüentemente, trans-

FIGURA 2.1 (VIDE ARQUIVO EM ANEXO NO CD).

portado para outras localidades. Esse metal, segundo Pinheiro et al. (2000), tem se acumulado em peixes oriundos do Rio Tapajós, no Pará, onde os teores de mercúrio se apresentaram acima do permitido para consumo humano.

- A contaminação por outros metais. De acordo com a ANA (2005 apud Fenzl e Mathis, 2003), em 1997 foram descobertas regiões contaminadas por arsênio na Serra do Navio (AP).
- A criação de búfalos e gado de corte e a implantação de matadouros em locais sem infra-estrutura sanitária.
- A mineração industrial de ferro, manganês, cassiterita, cobre e bauxita, dentre outros, o que promove a degradação da paisagem, o surgimento de erosões, o assoreamento dos corpos hídricos e a esterilização de grandes áreas.
- O desmatamento e a queima da biomassa vegetal para a formação de pastagens e expansão da fronteira agrícola, principalmente no tocante ao cultivo de monoculturas como a soja, o que expõe o solo à incidência direta do sol e provoca o seu empobrecimento, a destruição do húmus e da flora de fungos e de outros microrganismos nele existentes, e o carreamento de uma gama de elementos químicos para o leito dos rios.

O que se percebe, portanto, é que a riqueza ambiental da Amazônia e a profunda interação da biodiversidade local com seus recursos hídricos, fazem com que quaisquer ações antrópicas desenvolvidas dentro dos limites dessa região hidrográfica produzam efeitos imediatos sobre a qualidade de suas águas. Dentro dessa ótica, Braga et al. (2002) esclarece a necessidade do entendimento de que a disponibilidade de água não se resume apenas ao quesito “quantidade”, mas também, e principalmente, à qualidade da mesma, uma vez que uma região pode ser relativamente privilegiada no que diz respeito à disponibilidade hídrica; porém, se o volume desse recurso natural estiver poluído, a água perderá seu valor vital e, assim, terá seu uso limitado.

Os seres vivos necessitam de água de qualidade adequada para seus metabolismos. Segundo o MMA (2003), os organismos possuem, nos ambientes aquáticos, uma íntima relação com o meio circundante; por isso, a introdução de substâncias e compostos estranhos à

composição natural desse fluído pode levar à alterações e desequilíbrios profundos na biota. A poluição química promove a diminuição da biodiversidade, provocando a redução do número das espécies intolerantes e o aumento na densidade populacional das espécies tolerantes às substâncias degradantes. É importante ressaltar, portanto, que a qualidade da água depende diretamente de sua quantidade para dissolver, diluir, transportar e transformar as substâncias nela descartadas, o que é chamado de "capacidade de autodepuração", assunto esse que será discutido oportunamente nesse mesmo subcapítulo.

2.1.3 Aspectos qualitativos da água

O consumo de água no mundo não pára de crescer. Para que as necessidades humanas sejam supridas de maneira integral, é preciso que a água seja detentora de uma qualidade mínima. Apesar disso, a constante degradação dos recursos hídricos, aliada ao aumento da população e, consequentemente, de suas necessidades, estão levando a uma crise hídrica mundial que poderá alcançar proporções alarmantes caso medidas que objetivem reverter tal situação não sejam implementadas. A Organização Mundial de Saúde (OMS) afirma que cerca de 70% da população rural e 25% da população urbana do Brasil sofre com a falta de abastecimento com água de qualidade (TUCCI, 2002; REBOUÇAS, 2004).

A qualidade da água, no sentido mais amplo de seu conceito, pode ser entendida como o conjunto das características físicas, químicas e biológicas que esse recurso natural deve possuir para atender aos diferentes usos a que se destina (ARAÚJO e SANTAELLA, 2001; LIMA, 2001; CONAMA, 2005).

Assim, de acordo com Cunha et al. (2001), o conceito de qualidade da água depende do seu uso ou fim, possuindo valor relativo. Tucci (2001) e a SEMA/SP (2000) acrescentam, ainda, que a qualidade, enquanto condição natural, varia de um corpo hídrico para outro, uma vez que esta é diretamente influenciada pelas condições geológicas, geomorfológicas e de cobertura vegetal particulares a cada bacia de drenagem.

A água é um recurso natural que reflete as alterações do meio, sejam elas de origem natural ou antrópica. A grande diferença entre essas duas causas, porém, está não somente nas suas origens, mas também na possibilidade das mesmas em serem revertidas. Fenômenos como a pororoca, por exemplo, apesar de interferirem na qualidade da água de um rio, são naturais e, acima de tudo, temporários, sendo que o ecossistema consegue se adaptar aos mesmos. Já as interferências advindas das atividades antrópicas, o que se convencionou chamar de "poluição", são detentoras de um caráter muito mais singular e delicado, uma vez que introduzem no meio hídrico, na maioria das vezes de forma contínua, algumas substâncias que nunca estiveram ali presentes ou que existiam em quantidades pequenas; além disso, esses elementos, uma vez introduzidos no ambiente, necessitam da interferência humana para serem removidos do mesmo.

A poluição hídrica, segundo Lima (2001), é a decorrência de qualquer mudança na qualidade física, química, radiológica ou biológica da água, causada diretamente pelo homem ou por suas atividades, e que pode ser prejudicial ao uso presente, futuro ou potencial desse recurso natural.

As fontes antrópicas de poluição da água são as mais variadas; logo, produzem efeitos com intensidades distintas. Atualmente, os mananciais, principalmente os situados em áreas urbanas, apresentam-se em quadros preocupantes no que tange aos níveis de poluição hídrica.

A **Tabela 2.1** apresenta os principais poluentes e seus respectivos componentes que atingem as coleções hídricas situadas dentro ou nas proximidades das zonas urbanas. Ao se observar essa tabela, é possível perceber que os efluentes mais degradantes da qualidade da água são os de origem industrial, pois os mesmos são formados por uma grande variedade de substâncias, o que os torna difíceis de serem qualificados.

De acordo com a SEMA/SP (2000) e com a CETESB (2000), a poluição da água está diretamente associada ao tipo de uso e à ocupação do solo na BH. Contudo, é difícil estabelecer, na prática, uma análise sistemática de todos os poluentes que possam estar presentes nos mananciais superficiais.

Tabela 2.1: Categoria dos principais poluentes da água e suas respectivas fontes (LIMA, 2001).

Tipo de Poluente	Fontes Pontuais		Fontes Difusas	
	Esgoto Doméstico	Esgoto Industrial	Escoamento Agrícola	Escoamento Urbano
Material Orgânico	x	x	x	x
Nutrientes	x	x	x	x
Organismos Patogênicos	x	x	x	x
Sólidos Suspensos/Sedimentos	x	x	x	x
Sais	-	x	x	x
Metais Tóxicos	-	x	-	x
Materiais Orgânicos Tóxicos	-	x	x	-
Temperatura	-	x	-	-

Dessa maneira, na tentativa de elencar mecanismos de acompanhamento da qualidade da água de um corpo hídrico, os órgãos ambientais pré-definiram alguns indicadores físicos, químicos e biológicos que, analisados em conjunto, possibilitam verificar os níveis de poluição de um determinado manancial.

Esses indicadores são chamados de parâmetros de qualidade da água. Dessa forma, um monitoramento hídrico objetiva:

- avaliar, de maneira abrangente, a evolução da qualidade das águas dos corpos hídricos;
- identificar trechos de rios onde a qualidade da água possa estar mais degradada, possibilitando o gerenciamento (tomada de ações preventivas e de controle) pelos órgãos ambientais responsáveis;
- subsidiar o diagnóstico da qualidade das águas doces utilizadas para o abastecimento público ou para outros usos;
- identificar as áreas prioritárias no que diz respeito ao controle da poluição dos recursos hídricos; e
- fornecer subsídios técnicos para a elaboração de relatórios que objetivem caracterizar os recursos hídricos de uma determinada região.

Nos subitens que se seguem, fez-se uma breve caracterização dos parâmetros de qualidade da água analisados no presente estudo.

2.1.3.1 Potencial hidrogeniônico

De acordo com Lima (2001), o potencial hidrogeniônico (pH) pode variar seu valor na faixa de sete a quatorze e representa o equilíbrio entre os íons H^+ e OH^-. Se abaixo de sete, a água é tida como ácida; se acima, alcalina; e, caso seu valor se mantenha na faixa de sete, é tida como neutra. O potencial hidrogeniônico é formado pela presença de sólidos e gases dissolvidos no meio hídrico que, por sua vez, são oriundos da dissolução de rochas, absorção de gases da atmosfera, oxidação da matéria orgânica, fotossíntese e, em especial, dos efluentes de origem antrópica. Em termos de concentração de íons H^+, o pH é definido como o logaritmo negativo da concentração molar de íons de hidrogênio, conforme pode ser observado na **Equação 2.1** (LIMA, 2001).

$$pH = -\log\left[H^+\right] \qquad (\mathbf{2.1})$$

2.1.3.2 Condutividade

A condutividade é entendida como a capacidade que a água possui de transmitir uma corrente elétrica. Tal característica está diretamente relacionada à temperatura hídrica e à concentração de íons no meio aquático. Logo, é tida como uma medida indireta de poluição, uma vez que os efluentes podem ser formados por íons.

2.1.3.3 Temperatura da água

A temperatura da água pode ser influenciada por dois fatores: (1) os naturais, como o regime climático de uma região, incluindo principalmente a incidência solar; e (2) os antrópicos, tais como águas provenientes de torres de resfriamento ou mesmo de despejos industriais. É um

parâmetro de fundamental importância no que tange às análises ambientais, pois a solubilidade do oxigênio depende diretamente da temperatura hídrica, que também é responsável pela estratificação térmica vertical do perfil aquático; além disso, esse parâmetro desempenha um importante papel na velocidade de uma série de reações bioquímicas que ocorrem na água (SPERLING, 1996).

2.1.3.4 Transparência

A atividade fotossintética das algas está intimamente ligada à transparência, ou seja, à capacidade que a água possui em permitir com que a luz solar lhe penetre, sendo esse parâmetro, portanto, de grande importância ecológica (MOTA, 2003).

Quanto mais elevada for a presença de sólidos no ambiente, menor será a transparência e, conseqüentemente, menores serão as taxas de oxigênio dissolvido advindo do metabolismo das algas presentes no meio hídrico (em virtude da baixa penetração de luz no perfil hídrico).

Ações antrópicas, tais como o desmatamento e o descarte de efluentes *in natura* nos mananciais, interferem diretamente nos níveis de transparência da água, o que pode afetar a biota local (BRAGA et al., 2002).

3.1.3.5 Sólidos totais e sólidos suspensos

Como já mencionado anteriormente, a presença de sólidos de qualquer natureza na água provoca a elevação da cor e da turbidez e a diminuição da transparência, podendo afetar a biota aeróbia e facultativa devido à diminuição da produção fotossintética e, conseqüentemente, do oxigênio dissolvido no meio hídrico.

2.1.3.6 Coliformes termotolerantes

Os microrganismos desempenham funções de inquestionável importância no ambiente aquático, principalmente no tocante à oxidação da matéria orgânica presente na água. Alguns desses seres podem ser patogênicos. Porém, os ensaios que detectam a presença das bactérias nocivas ao homem não conseguem obter precisão em número de indivíduos, em razão das baixas concentrações desses organismos (SEMA/SP, 2000). Por isso, estabeleceu-se que a determinação da potencialidade de um corpo hídrico ser portador de agentes causadores de doenças seja feita de forma indireta, por meio de seres indicadores de contaminação de origem fecal, o chamado "grupo dos coliformes".

Segundo Sewell (1978) e Rodrigues et al. (2002), os coliformes são seres presentes em elevadas quantidades nas fezes humanas e de animais de sangue quente. Em média, uma pessoa lança, por dia, em suas fezes, cerca de um trilhão desses microrganismos no esgoto. O grande problema, contudo, é que os coliformes também ocorrem, embora em menores quantidades, nos ambientes naturais, principalmente no solo. Por isso, a interpretação desta análise deve ser feita com cautela, para que não sejam tiradas conclusões precipitadas a respeito da poluição hídrica.

2.1.3.7 Nitrogênio

O nitrogênio gasoso possui a maior participação na atmosfera terrestre: 78,08% (NUVOLARI, 2003). De acordo com Pereira e Mendonça (2005), no ciclo desse elemento ocorre a conversão do nitrogênio gasoso em nitrogênio orgânico (proteínas, aminoácidos e uréia). Por meio da amonificação, o nitrogênio orgânico é transformado em amônia que, por sua vez, através do processo conhecido como nitrificação, é convertida a nitrito e, posteriormente, a nitrato (a forma mais comum encontrada no ambiente). A **Equação 2.2** (PEREIRA e MENDONÇA, 2005) ilustra, de maneira resumida, o ciclo do nitrogênio na natureza:

$$N_2 \xrightarrow{\text{Fixação}} N_{org.} + O_2 \xrightarrow{\text{Amonificação}} \text{Amônia} + O_2 \xrightarrow{\text{Nitrificação}} NO_2 + O_2 \xrightarrow{\text{Nitratação}} NO_3 \qquad (\mathbf{2.2})$$

Na água, o nitrogênio pode ser oriundo de fontes naturais, tais como matéria orgânica e inorgânica e chuvas, ou antrópicas, como esgotos domésticos e industriais e defensivos agrícolas. O nitrogênio é um dos responsáveis pelo fenômeno da eutrofização hídrica, uma vez que sendo um nutriente, responde, juntamente com o fósforo, pela aceleração no desenvolvimento das algas (RODRIGUES et al., 2002). As formas em que esse elemento pode ser encontrado na natureza são: amônia (NH_3), nitrito (NO_2), nitrato (NO_3), íon amônio (NH_4), nitrogênio molecular (N_2), óxido nitroso (N_2O), nitrogênio orgânico dissolvido e nitrogênio orgânico particulado. Dependendo da maneira com que o nitrogênio se apresente no meio aquático, é possível perceber o estágio de degradação do manancial; por exemplo: nitrogênio orgânico e amônia estão associados a águas recém poluídas, uma vez que ainda não ocorreu a oxidação dos mesmos. Sua presença no corpo hídrico, principalmente quando no processo de conversão da amônia a nitrito e desse a nitrato, consome oxigênio dissolvido do meio, o que pode afetar negativamente a vida aquática. Segundo Silva e Jardim (2006), a amônia presente em grande quantidade na água pode ser tóxica às comunidades aquáticas, principalmente às populações de peixes e invertebrados, afetando-lhes a capacidade reprodutiva, o crescimento, o comportamento e a formação dos tecidos orgânicos.

2.1.3.8 Cloreto

Em meio natural, o cloreto é oriundo da dissolução de minerais ou mesmo da intrusão de água marinha. Subentende-se que todos os rios, em diferentes proporções, são detentores de íons resultantes dos processos de desgaste das rochas. O cloreto, porém, pode também ser proveniente dos despejos de efluentes domésticos e industriais, ou mesmo de águas utilizadas na irrigação de lavouras (SPERLING, 1996). Os problemas ambientais acarretados pela presença de cloreto na água estão relacionados com o potencial osmótico, que afeta a vida dos seres aquáticos de águas doces (NUVOLARI, 2003). Sua maior desvantagem para o homem é que, em altas

concentrações, agrega gosto salgado à água, podendo provocar efeitos laxativos em quem a ingerir.

2.1.3.9 Demanda bioquímica de oxigênio

A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) é o parâmetro mais comumente utilizado na determinação do oxigênio dissolvido consumido pelos microrganismos aeróbios e facultativos no processo de oxidação da matéria orgânica biodegradável. Quanto mais elevado for a quantidade de matéria orgânica, mais OD será necessário para que os seres decompositores estabilizem a mesma (CHAPRA, 1997; SEMA/SP, 2000; MOTA, 2003).

Segundo Eiger (2003) e Rodrigues (2005), apesar da DBO não servir como única medida para avaliar o impacto do descarte de substâncias orgânicas em um rio, ela possui duas grandes vantagens:

- a possibilidade de diferentes efluentes (provenientes das mais variadas fontes), poderem ter seus respectivos potenciais poluidores (parte orgânica) comparados segundo uma mesma grandeza; e
- o fato de tal parâmetro possibilitar uma avaliação consideravelmente importante do estado da qualidade da água de um rio qualquer, vez que é uma medida indireta do consumo de oxigênio dissolvido do meio hídrico.

É importante salientar que a DBO usualmente referida corresponde ao oxigênio dissolvido consumido durante a decomposição da matéria orgânica carbonácea, da qual resultam, basicamente, três elementos: gás carbônico, amônia e água. A demanda bioquímica de oxigênio, quando na fase carbonácea, é também conhecida como DBO carbonácea (DBO_C). Posteriormente, a oxidação biológica da amônia em nitrato é chamada de nitrificação, sendo que o OD necessário para a efetivação deste processo é quantificado em uma fase denominada de DBO nitrogenada - DBO_N (EIGER, 2003). O tempo para que ocorra a transição da decomposição

da matéria orgânica da fase carbonácea para a nitrogenada é, em média, de cinco dias, podendo variar de um rio para outro.

A **Figura 2.2** ilustra um gráfico genérico que possibilita verificar esse tempo e, conseqüentemente, a demanda bioquímica de oxigênio em um tempo "t" qualquer (DBO_t) correspondente a tal processo.

Na oxidação da matéria orgânica, a demanda bioquímica de oxigênio é sempre inversa à quantidade de oxigênio dissolvido presente no meio hídrico. Esse processo se encontra explicado mais detalhadamente em subitens vindouros.

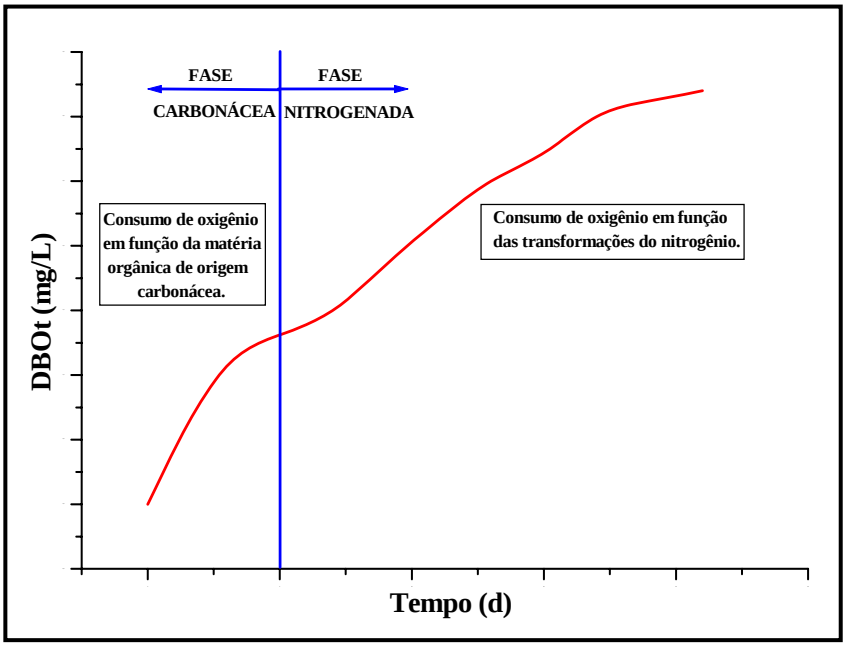


Figura 2.2: Gráfico genérico do tempo de transição da DBO carbonácea para a DBO nitrogenada.

2.1.3.10 Oxigênio dissolvido

O oxigênio dissolvido é um dos constituintes mais importantes do meio aquático, talvez o principal parâmetro utilizado nos estudos de qualidade da água, uma vez que é de necessidade vital para a maioria dos organismos que nela vivem.

O OD é um bom indicador da capacidade que um corpo hídrico tem de promover a autodepuração da matéria orgânica descartada em seu curso. Os fatores que mais influenciam a concentração desse gás no ambiente aquático são (FEPAM, 1996; ANEEL, 1999):

- a temperatura da água (que, quanto mais alta, menor será a concentração de saturação de OD presente no meio hídrico; porém, maior será a capacidade de reaeração do corpo d'água);
- a pressão atmosférica: altitude; e
- a salinidade.

As causas antrópicas que mais contribuem para o decréscimo do oxigênio na água são: as descargas de efluentes e resíduos sólidos orgânicos no leito dos rios e a elevação da temperatura hídrica devido a despejos industriais.

2.1.4 A capacidade de autodepuração dos corpos hídricos

Dentro de um rio, os vários ciclos existentes, tanto de nutrientes quanto de energia, ocorrem de forma contínua e simultânea, obedecendo a mecanismos e processos químicos, físicos e biológicos que interagem entre si; quando isso ocorre de maneira harmônica, sem que haja prejuízo da biota, pode-se afirmar que o sistema está em equilíbrio.

Os ecossistemas aquáticos possuem vários dispositivos que possibilitam a entrada e a saída de compostos da água e que, juntos, promovem um balanço natural entre a quantidade consumida, a quantidade produzida, a quantidade adicionada e a massa resultante no meio. Enquanto fontes naturais introduzem, por exemplo, o oxigênio no volume hídrico, como a reaeração atmosférica na interface ar-água (que é diretamente afetada pela turbulência do escoamento), outras, tais como a respiração da ictiofauna e a demanda bentônica, o absorvem. Edgar e Santos (1999) enfatizam que o oxigênio é um gás pouco solúvel no meio aquático e, devido ao fato do mesmo não reagir quimicamente com a água, sua solubilidade é diretamente proporcional à pressão da atmosfera.

A matéria orgânica biodegradável existe naturalmente no ambiente aquático, sendo originada de fontes como a decomposição da massa vegetal e das fezes de animais. Para alcançar o equilíbrio do meio, os microrganismos ali presentes decompõem essa matéria e, quando isso é feito em condições aeróbicas, ocorre o consumo de oxigênio. Todo curso d'água é, portanto, detentor de uma determinada capacidade de se depurar. Tal capacidade regenerativa é chamada de autodepuração e realiza-se por meio de processos físicos, como sedimentação, diluição, reaeração; químicos, como as reações de oxidação; e biológicos, como a fotossíntese. Todavia, essa capacidade é limitada e depende diretamente: das características do corpo hídrico, da quantidade e natureza da matéria orgânica presente no mesmo, dos microrganismos que promovem a transformação das cadeias orgânicas mais complexas em compostos mais simples, e das condições ambientais (BRAGA et al., 2002; EIGER, 2003).

Com o advento da expansão urbana e do crescimento do setor industrial, um grande volume de matéria orgânica oriunda dos efluentes domésticos e industriais, bem como os resíduos sólidos provenientes das mais variadas atividades humanas e as substâncias advindas da agricultura, são descartados nos corpos hídricos. A matéria orgânica em excesso provoca a proliferação exagerada das bactérias decompositoras aeróbicas e facultativas, o que faz com que o OD existente no perfil d'água seja consumido em quantidades acima do que o sistema consegue repor; isso causa impactos diretos nos seres aquáticos aeróbios, principalmente os de vida superior, que desaparecem, empobrecendo a biodiversidade local. No caso de baixos níveis de oxigênio, passam a existir condições que favorecem os organismos anaeróbios. Assim, não é incomum a existência de corpos hídricos com baixas concentrações de OD, ou mesmo em condições de total anaerobiose. Isso ocorre principalmente em rios situados nas proximidades das grandes cidades, onde a poluição é mais acentuada.

Segundo Sewell (1978), a morte dos peixes devido a esses fatores pode ser seletiva: as trutas, por exemplo, que são mais exigentes em relação aos níveis de oxigênio dissolvido, sucumbem primeiro; em contrapartida, as carpas, mais resistentes, conseguem viver mais tempo. Silva e Jardim (2006) esclarecem que a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), associou as faixas de concentração de oxigênio dissolvido com as respectivas espécies

aquáticas que conseguem sobreviver em cada uma delas, estando as mesmas descritas mais detalhadamente a seguir:

- de 0 a 2 mg/L: insuficiente para manter a vida aquática;
- de 2 a 4 mg/L: somente poucas espécies de peixes conseguem sobreviver, o que caracteriza um ambiente hídrico pobre em biodiversidade;
- de 4 a 7 mg/L: é aceitável para peixes de águas quentes; e
- de 7 a 11 mg/L: é ideal para peixes de águas frias.

Quando as condições hídricas possibilitam a autodepuração equilibrada, as concentrações de oxigênio dissolvido raramente decaem a valores que possam ser prejudiciais aos seres vivos; porém, caso sejam alcançados níveis de ausência de oxigênio, a decomposição da matéria orgânica passa a ser realizada por organismos anaeróbicos, sendo que esse processo se dá por meio de um metabolismo mais lento por parte dos microrganismos decompositores. As condições anaeróbicas provocam o surgimento de maus odores, originados de gases como o sulfídrico.

Os impactos do descarte de efluentes em ecossistemas aquáticos dependem da capacidade de diluição de um corpo hídrico e das reações que ocorrem nesse processo. Esses impactos têm sido estudados há muito tempo (MCAVOY et al. apud SPELLMAN, 2003). De acordo com Netto et al. (2004), a utilização da água como diluidora de efluentes reveste-se de particular importância, uma vez que esse uso, em especial, provoca uma mudança substancial na qualidade hídrica dos mananciais superficiais e subterrâneos, geralmente para condições piores que as atuais.

Como a capacidade de autodepuração varia de um corpo hídrico para outro, torna-se necessário que estudos específicos sejam desenvolvidos, visando conhecer a quantidade de efluentes que cada rio é capaz de receber e diluir sem que suas características naturais sejam prejudicadas.

Almejando assegurar a qualidade de seus recursos hídricos, o Brasil estabeleceu valores mínimos e máximos de parâmetros de qualidade da água e de lançamento de efluentes em

resoluções especialmente elaboradas para essa finalidade. Uma abordagem mais detalhada sobre esse assunto é feita a seguir.

2.1.5 A legislação hídrica brasileira

De acordo com Fink e Santos (2003), o Brasil vivenciou dois momentos distintos no que diz respeito ao gerenciamento de seus recursos hídricos, sendo eles: pré e pós Constituição Federal de 1988 (CF/88). Antes do advento desse instrumento jurídico, além da água ser considerada como bem inesgotável, ela podia ser de propriedade particular. Porém, com a CF/88 e, posteriormente de forma mais clara, com a Lei 9.433 (1997), que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH), uma nova etapa no processo de gestão da água surgiu no país. A partir de 1988, esse recurso natural passou a ser um bem público de domínio federal ou estadual.

Com o advento da Lei 9.433 (1997), também chamada de Lei das Águas, iniciou-se um significativo processo de mobilização social e gestão participativa. O Brasil se deparou com um acervo de fundamentos, objetivos, diretrizes e instrumentos capazes de orientar a população sobre o processo de gerenciamento dos recursos hídricos que está sendo implantado no país. A Lei das Águas se constitui em um conjunto de mecanismos jurídico-administrativos que têm por finalidade colocar em prática a Política Nacional de Recursos Hídricos (MMA, 2004).

Outro importante marco no que tange às primeiras ações do Brasil na tentativa de promover um melhor gerenciamento de seus recursos hídricos foi a criação, pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente, da Resolução 20, de 18 de junho de 1986, hoje substituída pela Resolução 357, de 17 de março de 2005. Essa resolução classificou as águas, segundo a qualidade requerida para seus usos preponderantes, da seguinte maneira: águas doces (divididas nas Classes Especial, 1, 2, 3 e 4), águas salinas (divididas nas Classes Especial, 1, 2 e 3) e águas salobras (divididas nas Classes Especial, 1, 2 e 3). Tal separação teve como objetivo promover a

união entre quantidade e qualidade, visando alcançar metas de enquadramento dos recursos hídricos a curto, médio e longo prazos.

O enquadramento das águas busca relacionar a qualidade que se almeja para os corpos hídricos com seus diferentes usos. Até que o enquadramento de todos os rios brasileiros seja definitivamente efetivado, essa resolução define que as águas doces devem ser consideradas como sendo pertencentes à Classe 2.

Além disso, o CONAMA 357 (2005) também estipulou metas de parâmetros de qualidade da água, tanto para corpos naturais, de acordo com cada classe, quanto para lançamentos de efluentes. O objetivo é garantir não somente a qualidade desse recurso ambiental para a atual e as futuras gerações, mas também o equilíbrio dos ecossistemas hídricos, de forma que os seres vivos não venham a ser prejudicados devido à poluição causada pelas atividades humanas.

Assim, todos esses mecanismos legislativos corroboraram para a criação de organizações em âmbito nacional e estadual que, por sua vez, são fruto tanto da evolução da complexidade dos diversos problemas relacionados aos recursos hídricos, quanto da evolução do quadro político-institucional do país (TUCCI et al., 2001).

Em 1995 surgiu a Secretaria Nacional de Recursos Hídricos (SNRH), ligada ao Ministério do Meio Ambiente (MMA). Em 2000 foi criada a Agência Nacional de Águas (ANA), que tem como principal função a supervisão de todo o sistema de gerenciamento de recursos hídricos.

Concomitantemente foram criadas, em estados como São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Goiás, dentre outros, secretarias e legislações sobre recursos hídricos, bem como alguns comitês de bacia hidrográfica.

No Estado do Amapá, onde está localizado o Rio Araguari, objeto do presente estudo, após longas discussões entre o Governo e a sociedade civil organizada, elaborou-se o Projeto de

Lei 0686, que trata da Política Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Essa lei foi aprovada pela Assembléia Legislativa em 7 de junho de 2002, representando um marco para a gestão sustentável das coleções hídricas amapaenses. Todavia, a implantação de uma política efetiva de recursos hídricos no Amapá ainda está longe do ideal, uma vez que existem muitos entraves que impedem com que um bom gerenciamento seja colocado em prática.

2.1.6 Os usos múltiplos da água

Antigamente, devido à menor demanda pelos recursos hídricos, as necessidades de uso da água podiam ser facilmente atendidas pelas disponibilidades naturais. Hoje a situação é diferente, uma vez que a oferta de água se encontra, em alguns locais do país, menor que a demanda. Atualmente, não é mais admissível que um rio seja utilizado apenas com a finalidade de diluir efluentes, inviabilizando outros usos. De acordo com Netto et al. (2004), até os anos 90 a questão dos recursos hídricos era tratada do ponto de vista setorial, onde o aproveitamento dos grandes rios era ditado majoritariamente pelo setor hidrelétrico.

Com a finalidade de evitar possíveis conflitos e de proporcionar um gerenciamento mais democrático das águas do Brasil, a Lei 9.433 (1997) estabeleceu, em seus fundamentos, que a gestão desse recurso natural deve proporcionar o seu uso múltiplo. Entende-se por uso múltiplo o ato de conciliar as diversas atividades humanas relacionadas aos recursos hídricos, de tal forma que as mesmas possam coexistir de maneira harmônica sem que nenhuma prevaleça sobre as demais e, principalmente, sem que o meio ambiente venha a ser prejudicado em detrimento de outros usos.

Após a criação da Lei das Águas, não é mais possível que um corpo d'água tenha a finalidade apenas de geração de energia elétrica, de diluição de efluentes ou mesmo de lazer. Todavia, Lanna (2002) e Queiroz et al. (2004) esclarecem que o compartilhamento dos recursos hídricos por diversos usuários e setores da sociedade civil exige o estabelecimento de complexas regras operacionais. As decisões devem ser tomadas em conjunto pelo Governo e pela sociedade,

uma vez que onde há interesses distintos não é simples a mediação de possíveis conflitos. Um bom exemplo disso são as discussões ligadas à geração de energia elétrica, um ramo de atividade humana que já traz consigo uma série de questões polêmicas. Geralmente, a população local que será desalojada não faz questão da edificação do empreendimento, querendo permanecer na área onde reside; por outro lado, o restante da sociedade exige a construção da obra, visando o desenvolvimento econômico. Assim, é preciso que as questões relacionadas ao uso da água sejam bem discutidas e esclarecidas, almejando atender, de maneira racional e equilibrada, o maior número de interesses possível.

O país encontra-se na fase inicial de implementação do processo dos usos múltiplos, uma vez que os nove anos de criação da Lei das Águas somam um tempo relativamente curto para que mudanças significativas pudessem ter ocorrido. Por isso, ainda são poucos os exemplos brasileiros onde as discussões sobre a implantação de empreendimentos hídricos geraram resultados concretos.

2.2 Hidrelétricas Brasileiras

A geração de eletricidade, principal uso não-consultivo da água, constitui-se em fator fundamental para o desenvolvimento de um país. O Brasil ainda detém um imenso potencial hidrelétrico a ser explorado, sendo que sua maior disponibilidade hídrica se encontra na região da Floresta Amazônica (BRAGA et al., 2002; ANEEL, 2002; PREFEITO e MAUAD, 2004). A legislação ambiental brasileira considera as hidrelétricas com potência acima de 10 MW como empreendimentos que interferem consideravelmente no meio social, econômico e ambiental onde são edificadas. Sua implantação gera impactos diversos que podem perdurar por curto, médio ou longo prazo. As modificações provocadas por essas obras interferem no meio e criam novas condições naturais, principalmente na área do lago artificial e também a jusante da barragem (MARGULIS, 1996). É necessário, portanto, que se procedam com avaliações prévias de impacto ambiental, visando à minimização dos passivos gerados. Os tópicos a seguir elucidam, de maneira resumida, os assuntos pertinentes à hidroeletricidade no Brasil, bem como os impactos causados por empreendimentos dessa natureza.

2.2.1 O potencial hidrelétrico brasileiro

A energia elétrica é utilizada pelo ser humano há muito tempo no atendimento de demandas da economia (tais como atividades agrícolas, industriais e comerciais), na melhoria do conforto e da qualidade de vida das pessoas e no desempenho do importante papel de integração das áreas mais distantes dos grandes centros urbanos. Por esses motivos ela é consagrada, nos dias atuais, como um dos principais instrumentos geradores de desenvolvimento socioeconômico de um país. Contudo, a disponibilidade de recursos energéticos em uma determinada região nem sempre é igual à necessidade que as pessoas têm da mesma.

Segundo Prefeito e Mauad (2004) e ANEEL (2005), o Brasil, com suas dimensões continentais, mais de sete mil quilômetros de litoral e, acima de tudo, condições climáticas e

físicas favoráveis, tais como radiação solar, ventos e disponibilidade de água, é detentor de um dos maiores potenciais energéticos do mundo, o qual pode ser visualizado na **Figura 2.3**. Seus recursos naturais, se bem explorados, podem garantir a auto-suficiência nacional em termos de petróleo.

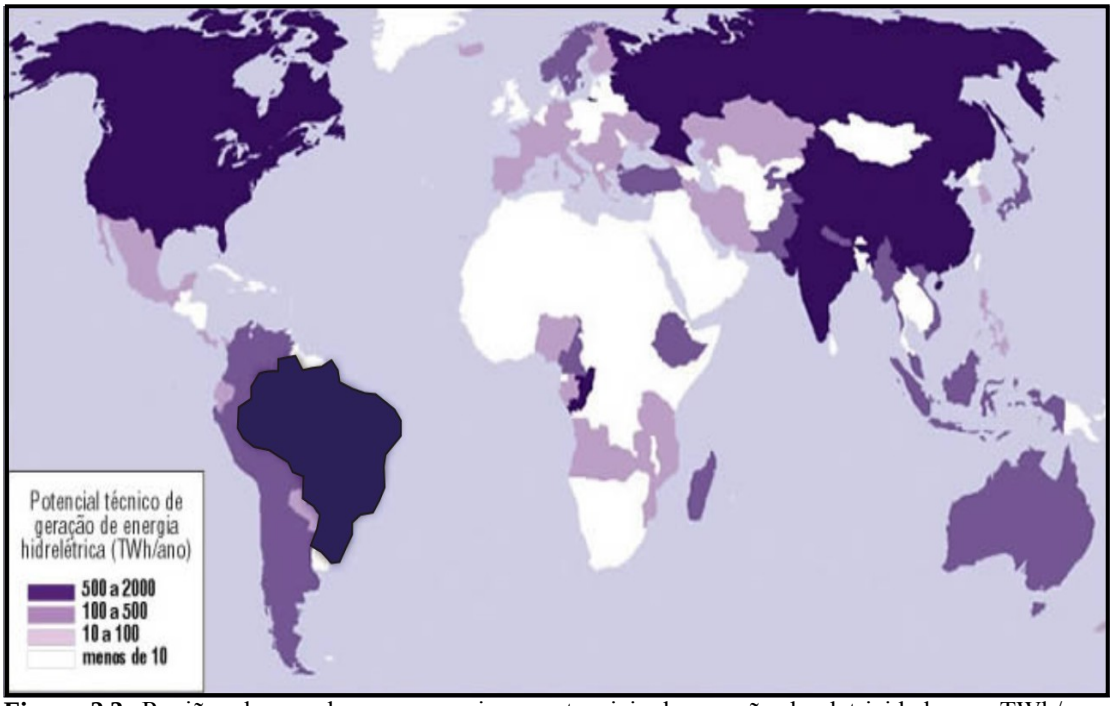


Figura 2.3: Regiões do mundo com os maiores potenciais de geração de eletricidade, em TWh/ano: destaque para o Brasil (ANEEL, 2005).

Todavia, apesar de tamanho potencial, apenas duas fontes de energia são extensivamente exploradas e aproveitadas no território brasileiro: o petróleo e, principalmente, a hidroeletricidade, que é responsável por cerca de 42% da produção total de energia primária do país, conforme pode ser observado na **Figura 2.4**. Tal predominância na matriz energética nacional se deve, basicamente, ao elevado potencial hídrico brasileiro, ao grande rendimento dessa modalidade energética (que gira em torno de 96%), à limitação das reservas de combustíveis fósseis, ao seu caráter renovável e ao seu custo relativamente barato de produção (JANNUZZI et al., 1999; BRAGA et al., 2002, NETTO et al., 2004; QUEIROZ et al., 2004).

A hidroeletricidade resulta da irradiação solar e da energia potencial gravitacional que, juntas, provocam a evaporação, condensação e precipitação hídrica na superfície terrestre, o que possibilita aproveitar a capacidade cinética da água, transformando-a em energia mecânica

através de turbinas acopladas a um gerador. O que define o tipo e o tamanho de uma usina hidrelétrica são, basicamente, dois fatores: a vazão do corpo hídrico na qual ela será edificada e a queda de água disponível (BRAGA et al., 2002, ANEEL, 2005).

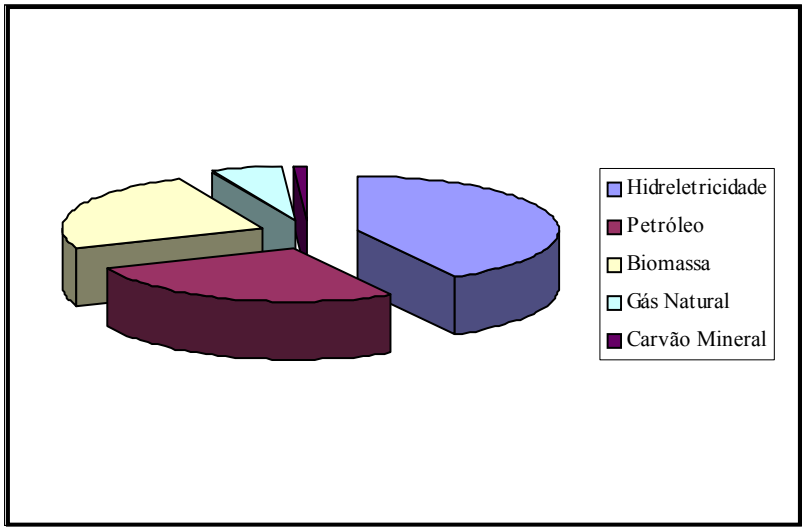


Figura 2.4: Distribuição da energia primária no Brasil (Braga et al., 2002).

De acordo com as Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRAS), a geração hidrelétrica no Brasil é constituída quase que totalmente por empreendimentos de grande porte, sendo que as 23 usinas hidrelétricas (UHEs) com potencial de geração acima de 1.000 MW são responsáveis por cerca de 71,4% da capacidade instalada no país. Jannuzzi et al. (1999) e Braga et al. (2002), elucidam que apesar do investimento do Brasil em outras fontes de energia, como a eólica e a solar, objetivando aumentar a geração de eletricidade advinda de fontes alternativas, tudo indica que as UHEs continuarão sendo, ainda por muito tempo, as principais produtoras de energia elétrica no país, respondendo por cerca de 50% da necessidade de geração. Somando-se a potência nominal de todas as usinas em construção, ampliação, concedidas, autorizadas e em fase de projeto, a energia hidráulica irá adicionar um potencial de 13.213 MW no sistema nacional nos próximos anos. É importante ressaltar que o potencial hidrelétrico brasileiro está estimado em, aproximadamente, 260 GW, dos quais 40,5% se encontram localizados na Região Hidrográfica Amazônica. Apesar disso, a maioria das barragens com fins de produção energética, conforme pode ser visualizado na **Figura 2.5**, estão concentradas na região Centro-Sul do país. A Amazônia ainda é praticamente inexplorada no que diz respeito à hidroeletricidade, uma vez que as usinas ali existentes, além de serem poucas, são de pequeno porte. Segundo Viana (2002),

atualmente só cinco UHEs estão em operação nesse bioma; porém, cerca de cem estão planejadas para serem implantadas na região nos próximos anos.

Figura 2.5: Distribuição das UHEs no território brasileiro: Amazônia ainda pouco explorada (ANEEL, 2005).

A tímida utilização dos recursos hidrelétricos da Região Amazônica se deve a vários motivos. Um deles é o fato de que as UHEs geram impactos ambientais de grandes proporções na floresta. Além disso, em razão do fato da Amazônia ser um ecossistema muito frágil e de grande importância ambiental, ocorre o desencorajamento, mesmo nos dias atuais, da implantação de empreendimentos dessa natureza em seus domínios. Mesmo assim, algumas usinas foram construídas nesse bioma. A primeira delas foi a Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, ilustrada na **Figura 2.6 a** e **b.** Essa UHE está edificada no médio curso do Rio Araguari (AP), nas proximidades do município de Ferreira Gomes, sendo gerida pelas Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A (ELETRONORTE), que, por sua vez, possui uma área de atuação que engloba os

Estados do Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia e parte de Goiás, o que corresponde a 58% do território nacional. A UHECN foi edificada durante 20 anos, tendo sido inaugurada em 13 de janeiro de 1976. Ela possui dez vertedouros e três turbinas, sendo duas com potência de 24 MW e uma de 30 MW, perfazendo um total de 78 MW (PROVAM, 1990; ANEEL, 2005; ELETRONORTE, 2006).

Figura 2.6: a) Vista geral da UHECN; **b)** *Outdoor* comemorativo dos trinta anos da usina (Imagens obtidas durante a 5ª Coleta, em maio/2006).

Para que se realize o aproveitamento de potenciais hidráulicos com a finalidade de geração de energia elétrica, é necessário que sejam empreendidas grandes alterações no meio natural (VIANA, 2002). A inundação de áreas que ocorre, na maioria dos casos, em regiões produtivas e/ou com grande diversidade biológica, é a maior delas. As hidrelétricas são causadoras de uma série de alterações ambientais, muito discutidas por pesquisadores e especialistas da atualidade. O subitem a seguir apresenta algumas das principais modificações provocadas no meio ambiente por esses empreendimentos.

2.2.2 Impactos ambientais causados por hidrelétricas

A Política Nacional de Meio Ambiente (Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981), instituiu a Avaliação de Impacto Ambiental - AIA - como um de seus instrumentos. Posteriormente, o Decreto 88.351, de 1º de junho de 1983, que regulamentou a mencionada lei, vinculou a utilização das AIAs aos sistemas de licenciamento das atividades poluidoras ou modificadoras do

meio ambiente. Contudo, somente mais tarde, quando o CONAMA aprovou a Resolução 001, de 21 de janeiro de 1986, foram estabelecidas as diretrizes gerais para a elaboração de tais avaliações. Essa resolução definiu critérios técnicos, responsabilidades e competências para a condução de trabalhos que objetivassem analisar os impactos ambientais que determinados empreendimentos (dentre os quais se encontram as barragens para fins hidrelétricos com potência acima de 10 MW), pudessem provocar no meio natural. Somente a partir de 1986 é que se tem notícia dos primeiros estudos de impacto ambiental (EIAs) e seus respectivos relatórios de impacto ambiental (RIMAs) desenvolvidos para barragens no Brasil (CONAMA, 1986; SANTOS e NACKE, 1991; TEIXEIRA et al., 1994; IBAMA, 1995). Assim, apesar da necessidade indiscutível de que sejam promovidas AIAs quando na edificação de barragens, nem todas as usinas brasileiras existentes hoje passaram por esse processo. Como exemplo pode-se citar a UHECN, cujos impactos somente agora, quase 31 anos após o início de suas atividades, estão sendo estudados.

Os sacrifícios sociais, econômicos e ambientais advindos da instalação de uma usina hidrelétrica são grandes. Muitas vezes, dependendo das circunstâncias e da localidade em que esse empreendimento será implantado, pode ocorrer a inviabilização do projeto. Mesmo com as companhias elétricas implementando medidas que objetivam mitigar os impactos, esses podem ainda ser significativos. Um curso d'água que não possua a tendência natural de represamento, passará não só a se deparar com ambientes artificiais, mas também mudará sua dinâmica espaço-temporal, principalmente na área da barragem e a jusante da mesma (MARGULIS, 1996). Segundo Junk e Nunes (1987), Kitamura (1994), Lima (2001), Tucci et al. (2001), Viana (2002) e ANEEL (2005), os impactos causados por essas obras, tanto ambientais quanto sociais, são os mais variados possíveis, diferenciando-se de região para região e tendo efeitos de curto, médio ou longo prazos. Alguns exemplos desses impactos são apresentados a seguir.

Sociais/econômicos:

- O isolamento das populações ribeirinhas após o enchimento do reservatório.
- A ocupação irregular e desordenada das áreas contíguas ao lago.
- Os conflitos pelo uso da água.
- O desaparecimento de sítios arqueológicos e a perda de terras férteis.

- A intensificação da atividade madeireira predatória.
- A perda de zonas de pesca a jusante da barragem.
- O reassentamento de populações tradicionais em áreas impróprias para a agricultura.
- O alto índice de abandono e comercialização de lotes.
- A destruição das relações sociais das comunidades indígenas existentes na região.

Ambientais:

- A mortandade de animais devido ao enchimento do reservatório.
- O desmatamento e a destruição de habitats, causando a diminuição da biodiversidade.
- As alterações no microclima local.
- A depleção da qualidade hídrica do rio, uma vez que a criação de um lago artificial provoca alterações nas características químicas, físicas e biológicas da água, principalmente na região do reservatório. De acordo com Queiroz et al. (2004), a qualidade da água no lago está diretamente relacionada ao descarte de efluentes e dos subprodutos das atividades agrícolas.
- A alteração do regime natural de escoamento e da vazão do curso d'água, criando condições adversas que afetam a biota aquática.
- O aumento da quantidade de mosquitos.
- A emissão, a partir da superfície do lago, de gases que provocam o efeito estufa.
- A interrupção do movimento migratório da ictiofauna, sobretudo de espécies que não desovam em águas paradas, provocando o aparecimento de grandes cardumes a montante.
- A proliferação de macrófitas, algas tóxicas e/ou filamentosas e diatomáceas.
- A eutrofização, que interfere no consumo, estética, balneabilidade e navegação (especialmente na região do lago).
- A alteração dos níveis de oxigênio dissolvido na água devido à decomposição da matéria orgânica submersa, gerando gás sulfídrico. Esteves (1988) esclarece que o processo de decomposição da biomassa vegetal consome o OD do meio aquático,

principalmente na região do hipolímnio, sendo que os primeiros anos posteriores à inundação são os mais críticos; assim, caso os níveis de oxigênio atinjam valores muito baixos, pode ocorrer mortandade de peixes e de outros seres vivos aeróbios e facultativos.

- A interferência nos mecanismos de troca gasosa na interface ar-água durante os ciclos de alguns nutrientes, tais como nitrogênio e fósforo, e na produção fotossintética.
- A seleção natural da biota devido às mudanças na qualidade e nas condições hidrodinâmicas da água, favorecendo determinadas espécies, não necessariamente as mais importantes, e prejudicando outras. Esse impacto, em especial, pode ser muito preocupante em regiões onde os índices de endemismo e raridade são elevados.
- A estratificação térmica das águas que formam o lago.
- A modificação do limite entre a zona eufótica e afótica.

Andreazzi (1993), cita os exemplos internacionais das UHEs de Akossombo (Gana) e Assuan (Egito), onde foram observados graves impactos oriundos da edificação das mesmas. Segundo ele, além das alterações de ordem hídrica e biológica, esses empreendimentos provocaram o aumento da esquistossomose mansônica.

É importante ressaltar, ainda, que existe também o perigo do rompimento de barragens e de ocorrência de acidentes de ordem estrutural, que podem provocar problemas das mais variadas dimensões. Um exemplo clássico foi o que ocorreu em Macchu (Índia), no ano de 1979, quando cerca de 2.500 pessoas morreram afogadas devido a uma falha na estrutura da barragem (ELETRONUCLEAR, 2006).

No Brasil, pode-se citar os casos das Usinas Hidrelétricas de Tucuruí e de Balbina, ambas localizadas na Região Amazônica. Segundo Kitamura (1994), os conflitos e discussões relativos à implantação dessas UHEs foram relegados a segundo plano e chegou-se a fechar as comportas sem que as questões relativas ao reassentamento das populações locais fossem resolvidas. Lima (2001) cita o ocorrido na construção da UHE de Manso (MT), quando as

concentrações de OD na água foram tão baixas, devido à decomposição da matéria orgânica oriunda da cobertura vegetal submersa que não havia sido removida, que a mortandade de peixes alcançou níveis alarmantes. A população local chegou a entrar com uma ação civil pública para impedir a continuidade da obra.

Estudos prévios e medidas preventivas de impactos ambientais são de fundamental importância na implantação de um empreendimento hidrelétrico, principalmente no caso brasileiro, onde o maior potencial hidráulico/energético encontra-se na Região Amazônica, uma área muito sensível às pressões antrópicas. É necessário que se proponham medidas mitigadoras que contribuam para abrandar, prevenir ou mesmo evitar problemas dessa natureza. Além disso, é de fundamental importância que ações como desmatamento, inundação de áreas e alteração de microclimas sejam minimizadas, uma vez que todas elas interferem, em maior ou menor grau, na regularidade do ciclo hidrológico, o qual é peça fundamental para a garantia da geração de energia hidrelétrica.

2.3 A Modelagem Matemática como Instrumento de Gestão dos Recursos Hídricos

Esse subcapítulo tem por objetivo apresentar a importância dos modelos matemáticos na análise ambiental e os critérios para escolha dos mesmos. Para tanto, foi feito um breve histórico da evolução do modelo de Streeter e Phelps e do modelo QUAL2E, o mais utilizado não somente no mundo, mas também no Brasil, tendo o mesmo sido empregado nessa pesquisa. São apresentadas, ainda, as características gerais e a formulação interna do QUAL2E.

2.3.1 Importância, conceito e critérios de escolha do modelo de qualidade da água

Apesar da água ainda ser utilizada como receptora final de efluentes na grande maioria das regiões habitadas pelo ser humano, um uso pouco nobre, ela é capaz de se autodepurar. Entretanto, a possibilidade ou não que um determinado corpo hídrico oferece de tal uso deve ser analisada com muita cautela e estudo, pois, como mencionado nos subcapítulos anteriores, caso a capacidade de autodepuração de um corpo d'água seja ultrapassada, o mesmo poderá enfrentar sérios problemas ambientais (BARBOSA, 1997). É preciso, portanto, que o gerenciamento de bacias hidrográficas seja embasado em informações ambientais e características locais.

Os órgãos ambientais de vários países, incluindo o Brasil, realizam o monitoramento da qualidade da água por meio de uma série de parâmetros físico-químicos pré-definidos em suas legislações. Aqui, em especial, a carência de dados que representem as reais condições hídricas sempre foi muito grande.

Visando suprir este déficit, as agências de controle ambiental de vários estados brasileiros investiram em ações que objetivaram estabelecer redes de monitoramento dos parâmetros de qualidade da água, almejando acompanhar a evolução e a tendência dos mesmos através do tempo e do espaço.

A grande questão, porém, é que a maioria dos órgãos ambientais acabou por concentrar seus esforços quase que exclusivamente nos padrões de emissão de efluentes e de qualidade da água, mais simples de ser estabelecidos e mais fáceis de ser monitorados. Assim, sem considerar as características individuais dos diferentes corpos d'água do país, analisando separadamente o poder depurativo de cada rio, estabeleceram-se limites rigorosos, padronizados nacionalmente, a serem seguidos por todos os estados brasileiros. Tal ação, contudo, pode vir a dificultar o desenvolvimento econômico de algumas bacias hidrográficas que, se bem gerenciadas, seriam capazes de absorver diversas atividades humanas sem que existissem riscos para o meio ambiente e para as pessoas em geral, uma vez que as características hídricas variam de um rio para outro, ocorrendo que uma única solução pode sub ou superestimar a capacidade de resiliência dos diferentes corpos d'água. Dessa forma, a gestão dos recursos hídricos no Brasil aconteceu, até pouco tempo, de maneira bastante limitada.

Porém, segundo Litwack et al. (2006), para que se faça uma gestão hídrica de forma eficaz, é necessário que se satisfaçam duas condições básicas: (1) que se tenham disponíveis as séries históricas de dados de qualidade da água, e (2) que existam ferramentas confiáveis para entender e interpretar as mesmas de maneira conjunta (ALBANO e PORTA, 2005).

Os modelos de qualidade da água possibilitam avaliar alternativas no gerenciamento de bacias hidrográficas, já que é humanamente impossível analisar, ao mesmo tempo, de maneira segura e com a menor possibilidade de erro, todas as variáveis envolvidas nas reações que ocorrem dentro de um mesmo corpo hídrico, vez que os rios são sistemas dinâmicos (CUNHA et al. 2001; BELLOS e SAWIDIS, 2005). Atualmente, os modelos são utilizados em larga escala nos estudos de qualidade da água realizados por agências ambientais de várias partes do globo (LUNG e SOBECK, 1999; MANSON e WALLIS, 2000; MUJUMDAR e VEMULA, 2004; MENDONÇA et al., 2005; ROSMAN, 2005).

Dessa maneira, os modelos podem ser encarados como uma evolução natural do gerenciamento dos recursos hídricos que, agora, não se restringe mais à análise isolada de parâmetros, mas sim à correlação entre esses. Segundo Rosman (2005), modelos são "ferramentas integradoras sem as quais dificilmente se consegue uma visão dinâmica dos

processos que ocorrem em sistemas naturais". Eiger (2003), Mujumdar e Vemula (2004) e Rosman (2005) afirmam que dentre todos os modelos existentes, os matemáticos (que fazem uso de equações diferenciais e de condições de contorno para representar, de maneira aproximada, os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem dentro de determinado sistema ambiental que se tem interesse em conhecer), são os mais utilizados na modelagem da qualidade da água.

As alterações nas concentrações dos constituintes de um ambiente aquático, tais como oxigênio dissolvido, nutrientes, matéria orgânica e sólidos, dentre outros, ocorrem devido a mecanismos de transporte (advecção e dispersão) e processos biológicos, químicos e físicos, que determinam o aumento ou a diminuição dos mesmos no meio líquido (RAUCH et al., 1998). Modelos de qualidade da água permitem que se calculem as concentrações de constituintes presentes no corpo hídrico, dadas as suas características hidrodinâmicas, as condições iniciais do sistema aquático e a cinética de reações (BOWIE et al., 1985). Isso possibilita saber porque determinadas alternativas de manejo de bacias hidrográficas são melhores que outras. Dessa maneira, é possível simular "n" cenários futuros e optar pelo que menos impactará o corpo hídrico. De acordo com as características de escoamento e das descargas de poluentes, os modelos são capazes de simular, no que tange às variáveis analisadas, o comportamento da qualidade da água em relação ao tempo e ao espaço (SIQUEIRA, 1996; CUNHA et al., 2001; GASTALDINI et al., 2002). Assim, segundo Eiger (2003) e Mark et al. (2004), eles podem ser utilizados para inúmeros estudos, tais como: em projetos de estações de tratamento de esgoto (ETEs); em análises de disponibilidade de água; na verificação da influência de obras sobre a qualidade do meio aquático; e na demanda e na alocação de empreendimentos poluidores. Na avaliação da abrangência de vazamentos de poluentes e resíduos tóxicos, em especial, os modelos permitem estimar quanto tempo os órgãos responsáveis teriam para contornar a situação.

Tucci (1998) e Porto e Azevedo (2002) definem os modelos como sendo representações simplificadas de um determinado sistema ambiental. Em geral, há um "objeto" sobre o qual se tem o interesse de compreender o comportamento mediante vários estímulos. Por serem os modelos representações aproximadas da realidade, alguns autores questionam a eficácia dos mesmos, afirmando que simplificam os complexos ciclos que ocorrem, por exemplo, dentro do meio hídrico. Isso se dá, porém, porque a modelagem busca considerar apenas a essência do

sistema, ou seja, seus aspectos mais relevantes para a solução desse ou daquele problema ambiental. Porto e Azevedo (2002) afirmam que "modelar e simplificar são conceitos indissociáveis". Porém, os mesmos autores salientam que caso a representação seja conduzida em níveis inadequados, pode ocorrer o comprometimento do modelo para os fins pretendidos.

Cox (2003) realizou um estudo comparativo entre vários modelos utilizados para a modelagem da qualidade da água de rios, chegando à conclusão que todos possuem limitações em graus diferentes, e que as mesmas devem ser levadas em conta caso se pretenda fazer interpretações significativas dos resultados obtidos com as modelagens. Além do mais, cada um deles foi concebido para situações específicas, o que permite compreender que nenhum é, portanto, completo para todas as funcionalidades requeridas.

Apesar disso, cabe ressaltar que o uso dos modelos possui inúmeras vantagens, descritas na **Tabela 2.2**, e que eles ainda são tidos, por pesquisadores do mundo todo, como as mais eficientes ferramentas existentes até então na gestão dos recursos hídricos (COX, 2003; MENDONÇA et al., 2005) e, por isso, vêm sendo melhorados de forma profícua a cada dia, o que permite deduzir que da mesma maneira que já foram muito mais simplificados, com o passar do tempo eles estão se tornando cada vez mais complexos e representativos da realidade do sistema ambiental modelado (RAUCH et al., 1998).

Tabela 2.2: Principais vantagens da utilização de modelos matemáticos de sistemas ambientais (PORTO e AZEVEDO, 2002 - com adaptações).

a) A análise do sistema real, quando possível, é muito mais cara do que a utilização de modelos.
b) Os riscos ambientais são inexistentes quando nas simulações computacionais, uma vez que estudos que envolvem produtos perigosos, por exemplo, não podem ser desenvolvidos *in loco*.
c) O custo ambiental e econômico de cometer erros e/ou realizar experiências com o sistema real é incomparavelmente maior do que o custo de exploração intensiva do modelo.
d) Modelos são ferramentas de aprendizado em que processos de tentativas e erros podem ser "explorados gratuitamente", não contribuindo somente para a melhor compreensão do sistema, mas também para a concepção de novas idéias e linhas de ação.
e) Modelos são instrumentos muito eficientes para treinamento quando desenvolvidos ou adaptados especificamente para esta finalidade.
f) Modelos conferem flexibilidade às análises porque: - "encurtam" o tempo, uma vez que permitem que muitos anos sejam analisados em períodos extremamente curtos; e - diferentes alternativas podem ser analisadas, muitas vezes mediante simples alterações de parâmetros.

O que se deve ter sempre em vista, portanto, é que a qualidade dos dados empregados em uma modelagem computacional, independente do sistema ambiental que estiver sendo estudado e da complexidade do mesmo, deve ser a mais elevada possível, uma vez que, caso assim não seja, erros graves de interpretação podem ser cometidos. Logo, é possível afirmar que a consistência dos dados de saída de um modelo está diretamente ligada à qualidade dos seus parâmetros de entrada.

Quanto mais complexos os sistemas ambientais a serem modelados e mais desafiadoras forem as respostas referentes às condições futuras que se deseja obter, mais úteis são os modelos. O homem tem desenvolvido uma gama de modelos de qualidade da água; todavia, é necessário que o usuário saiba escolher o mesmo, levando em conta não somente o que mais se adequará aos seus objetivos, mas também a disponibilidade de dados para a realização das simulações (MCCUTCHEON e FRENCH, 1989; WALTON e WEBB, 1992).

Tucci (1998) destaca que as principais dificuldades em relação ao uso de modelos computacionais são a obtenção de dados que validem os mesmos e a formulação de processos naturais que ainda não são representados matematicamente, ou que estão primariamente desenvolvidos nos programas. Por isso, de acordo com o que se encontra citado na **Tabela 2.3** por Orens (1984), alguns critérios devem ser levados em conta quando na escolha de um modelo.

Tabela 2.3: Principais critérios que devem ser utilizados na escolha dos modelos de simulação (ORENS, 1984 - com adaptações).

Precisão	É o primeiro fator que se deve analisar. É necessário que o modelo seja capaz de representar, da maneira mais aproximada possível, a realidade.
Simplicidade	Esse critério se refere ao número de parâmetros e variáveis que serão utilizados no modelo, representando, de certa forma, apenas a essência do sistema. Quanto mais parâmetros, mais difícil se tornará, para o usuário, a operação do modelo.
Transparência	Consiste na capacidade que o modelo possui de ser compreendido e manuseado pelo usuário. Modelos mais documentados e utilizados são melhores de ser operados.
Adequação	A transparência será uma característica não muito útil se o modelo não dispuser de formas simples e claras de interação com o operador. Para tanto, é preciso que a interface seja esclarecedora e objetiva, possibilitando ao usuário a correta escolha de parâmetros e a compreensão dos resultados obtidos.

A opção pelo modelo mais adequado à necessidade do usuário é de fundamental importância quando se vai proceder com uma modelagem de qualidade da água (SHANAHAN et al., 2001). Porém, a aplicação efetiva de um modelo exige gastos variados, pessoas capacitadas

para sua utilização, recursos computacionais eficientes e, principalmente, dados confiáveis de qualidade da água condizentes com a realidade hídrica do manancial a ser analisado.

2.3.2 O modelo de Streeter e Phelps

Como mencionado em subcapítulos anteriores, a presença de oxigênio dissolvido na água é vital para todos os organismos aquáticos. Streeter e Phelps, no ano de 1925, desenvolveram e aplicaram as primeiras equações para simular o OD e a DBO, almejando descrever o déficit de oxigênio a montante de um despejo. Tais equações são a base da maioria dos modelos de qualidade da água existentes na atualidade e têm sido melhoradas em vários centros de pesquisa espalhados pelo mundo (BROWN e BARNWELL, 1987; GASTALDINI et al., 2002; BRANDÃO, 2003).

Conforme Tucci (1998), o modelo de Streeter e Phelps foi desenvolvido para rios de regime de escoamento permanente uniforme. Além disso, ele pressupõe mistura imediata, considerando apenas o efeito advectivo do transporte de massa e a fase carbonácea no consumo da matéria orgânica. As principais limitações do modelo são que ele não leva em consideração a demanda bentônica; só funciona em decomposição aeróbia; não considera a sedimentação da matéria orgânica e não inclui a reoxigenação advinda da fotossíntese realizada pela respiração algal.

Apesar de todos esses fatores, entretanto, o mesmo foi o precursor da quase totalidade dos modelos de qualidade da água existentes nos dias de hoje, tendo, por isso, seu mérito reconhecido pela grande maioria da comunidade científica.

A hipótese básica de Streeter e Phelps é de que o processo de decomposição da matéria orgânica no ambiente aquático, assim como o da reaeração, obedecem a uma equação diferencial de primeira ordem, conforme pode ser visualizado nas **Equações 2.3** (EIGER, 2003) e **2.4** (SIQUEIRA, 1996), respectivamente.

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \qquad \textbf{(2.3)}$$

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \qquad \textbf{(2.4)}$$

onde:

D: déficit de oxigênio dissolvido, (mg/L);

K_1: coeficiente de desoxigenação, (d^{-1});

K_2: coeficiente de reaeração, (d^{-1});

L: demanda bioquímica última de oxigênio, (mg/L); e

t: tempo, (d).

Em uma primeira análise durante o estudo de autodepuração de um rio, o modelo de Streeter e Phelps pode ser uma boa ferramenta. Entretanto, atualmente, modelos muito mais robustos (tais como o SIMCAT, SIMOX, TOMCAT, QUAL2E, QUASAR, MIKE-II, WASP e ISIS, dentre outros), estão sendo utilizados nos estudos de modelagem de qualidade da água.

A literatura especializada nesse tipo de modelagem produziu, nos último cinco anos, mais de cem artigos. Porém, a grande maioria deles se refere ao Sistema de Modelagem da Qualidade da Água QUAL2E, desenvolvido pela USEPA, mencionando seu uso nas Américas, Europa, Ásia e Austrália. Segundo MCCUTCHEON e FRENCH (1989), elaboradores do mais completo guia sobre modelos convencionais de análise de poluição de rios, fundamentados em experiências e evidências, o QUAL2E é um dos melhores sistemas de modelagem da qualidade da água disponíveis atualmente.

A seguir, é apresentada uma abordagem mais detalhada sobre o funcionamento do Modelo de Qualidade da Água QUAL2E, incluindo algumas das equações utilizadas em suas simulações internas. É importante ressaltar que informações mais precisas sobre esse modelo podem ser obtidas no seu manual de operação, elaborado e editado pela USEPA (BROWN e BARNWELL, 1987).

2.3.3 O modelo QUAL2E

Após o surgimento do modelo clássico de Streeter e Phelps, estudos mais avançados foram desenvolvidos no ano de 1970 por F. D. Masch e Associados e o Texas Water Development Board. Assim, os processos de nitrificação foram incorporados a esse modelo que, por sua vez, passou a ser chamado de QUAL1. Mais tarde, em 1972, a empresa Water Resources Engineering, contratada pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, fez algumas modificações e ampliações no QUAL1, adicionando os ciclos do fósforo e das algas em sua formulação, sendo esse novo programa denominado de Sistema de Modelagem da Qualidade da Água QUAL2E. O que se percebe, portanto, é que esse modelo, distribuído gratuitamente pela internet, vem sendo desenvolvido e melhorado por inúmeros pesquisadores há mais de 35 anos; atualmente, ele é atualizado pelo Centro para Modelagem de Qualidade de Água, localizado em Athens, nos Estados Unidos (CUNHA et al., 2001; BRANDÃO, 2003).

O QUAL2E é o modelo mais vastamente aplicado em estudos ligados à qualidade da água no Brasil e no mundo (WALTON e WEBB, 1992). Assim, após a realização de uma revisão bibliográfica que objetivou ser a mais abrangente possível, obteve-se a informação de que o mesmo já foi utilizado pelos seguintes pesquisadores:

No Brasil:

- Mendonça (1992): Na determinação do impacto ambiental de uma fábrica de papel e celulose no Rio Doce (MG).
- Fisher (1995): Na determinação do grau de contaminação do Ribeirão do Feijão (SP).
- Bittencourt et al. (1995): Na modelação da qualidade da água do Rio Tietê para preparação do Projeto Tietê (SP).
- Siqueira (1996): Na modelação da qualidade da água do Rio Meia Ponte (GO).
- Nunes (2000): Na avaliação da qualidade da água do baixo Rio Bodocongó (PB).

- Lima (2001): Na modelação integrada para gestão da qualidade da água na BH do Rio Cuiabá (MT).
- Gastaldini et al. (2002): No diagnóstico atual e na previsão futura da qualidade da água do Rio Ibicuí (RS).
- Brandão (2003): Na análise de um mecanismo para implementação de instrumentos de gestão de recursos hídricos (DF).
- Neto (2003): Na análise da qualidade da água do Rio Birigui (PR).
- Palmieri (2004): Na análise da qualidade da água do Rio Corumbataí (SP).
- Araújo et al. (2005): Na simulação da qualidade da água do Rio Jaguaribe (CE), sujeito ao lançamento de efluentes oriundos da carcinicultura.
- Mendonça et al. (2005): No desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão para subsídio à outorga de água na BH do Córrego Sossego (ES).
- Pereira e Mendonça (2005): Na simulação de parâmetros de qualidade da água relacionados com nitrogênio no Rio Santa Maria da Vitória (ES).
- Rodrigues (2005): Na elaboração de uma ferramenta de auxílio para subsidiar a gestão quali-quantitativa dos processos de outorga e cobrança pelo uso da água na Bacia Hidrográfica do Rio Jundiaí (SP).

No mundo:

- Laramie et al. (1989): Na modelagem da qualidade da água do Rio Basin, em Gana.
- Walton e Webb (1992): Na modelagem da qualidade da água dos Rios Charles e Mystic, em Boston.
- Ziegler (1996): Na modelagem da qualidade da água do Rio Broad, nos Estados Unidos.
- Melching e Yoon (1996): Na modelagem da qualidade da água do Rio Passaic, em Nova Jersey.
- Dussaillant et al. (1997): Na modelagem da qualidade da água do Rio Mapocho, no Chile.
- Ghosh e McBean (1998): Na modelagem da qualidade da água do Rio Kali, na Índia.

- Drolc e Koncan (1999): Na modelagem da qualidade da água do Rio Sava, na Eslovênia.
- Mwanuzi (2000): Na avaliação da qualidade da água do Rio Pangani, na Tanzânia.
- Ciravolo et al. (2000): Na avaliação da qualidade da água do Rio Simeto, na região da Sicília, Itália.
- Dai e Labadie (2001): Na modelagem da qualidade da água do Rio Arkansas, no Colorado.
- Ning et al. (2001): Na avaliação de um programa de prevenção de poluição da BH do Rio Kao-Ping, em Taiwan.
- Rodrigues et al. (2002): Na modelação da qualidade da água na BH do Rio Ave, em Portugal.
- Mohamed et al. (2002): Na modelagem da qualidade da água do Rio Sg. Selangor, na Malásia.
- McAvoy et al. (2002): Na análise da poluição das águas superficiais do Rio Balatuin, nas Filipinas.
- Orden e Uchrin (2003): No estudo da dinâmica do oxigênio dissolvido no Rio Whippany, em Nova Jersey.
- Mujumdar e Vemula (2004): Na alocação de cargas residuárias no Rio Tunga-Bhadra, na Índia.
- Lee (2005): No desenvolvimento de estratégias sustentáveis na gestão de efluentes na Bacia Hidrográfica do Rio Chiang-Chu, em Taiwan.
- Stram et al. (2005): Na modelagem da qualidade da água do Rio Chone, nos Estados Unidos.
- Abrishamchi et al. (2005): Na modelagem da qualidade da água do Rio Zayandeh-Rood, no Irã.

O maior número de aplicações desse modelo é na simulação do oxigênio dissolvido. Todavia, além de modelar o OD, o QUAL2E contempla, em qualquer combinação desejada pelo operador, a simulação de até 15 constituintes hídricos (considerando que os mesmos estejam completamente misturados ao volume de escoamento), incluindo temperatura, concentração de biomassa algal sob a forma de clorofila, nitrogênio orgânico, amônia, nitrito, nitrato, fósforo

orgânico, fósforo dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, coliformes, um elemento não-conservativo arbitrário e três elementos conservativos. Aliado a isso, o modelo contempla, ainda, as interações entre os coeficientes de desoxigenação e reaeração atmosférica e seus efeitos no comportamento do oxigênio dissolvido (MELCHING e YOON, 1996; DAI e LABADIE, 2001; MCAVOY et al., 2002; BRANDÃO, 2003; ZEILHOFER et al., 2003; PALMIERI, 2004). A **Figura 2.7** apresenta um esquema da relação entre os componentes que esse modelo é capaz de simular e as interações entre os mesmos. É importante salientar que os elementos não-conservativos e os coliformes não interagem com os demais componentes do sistema, pois são modelados de forma isolada por meio de um decaimento de primeira ordem. Como os elementos conservativos não decaem no tempo e no espaço, eles nunca interagem com os outros constituintes, sofrendo apenas o efeito da diluição. Grande parte das interações não será enfocada no presente trabalho, sendo, portanto, desconsideradas. Os coeficientes utilizados nessa pesquisa encontram-se descritos no Capítulo 3 (Materiais e Métodos).

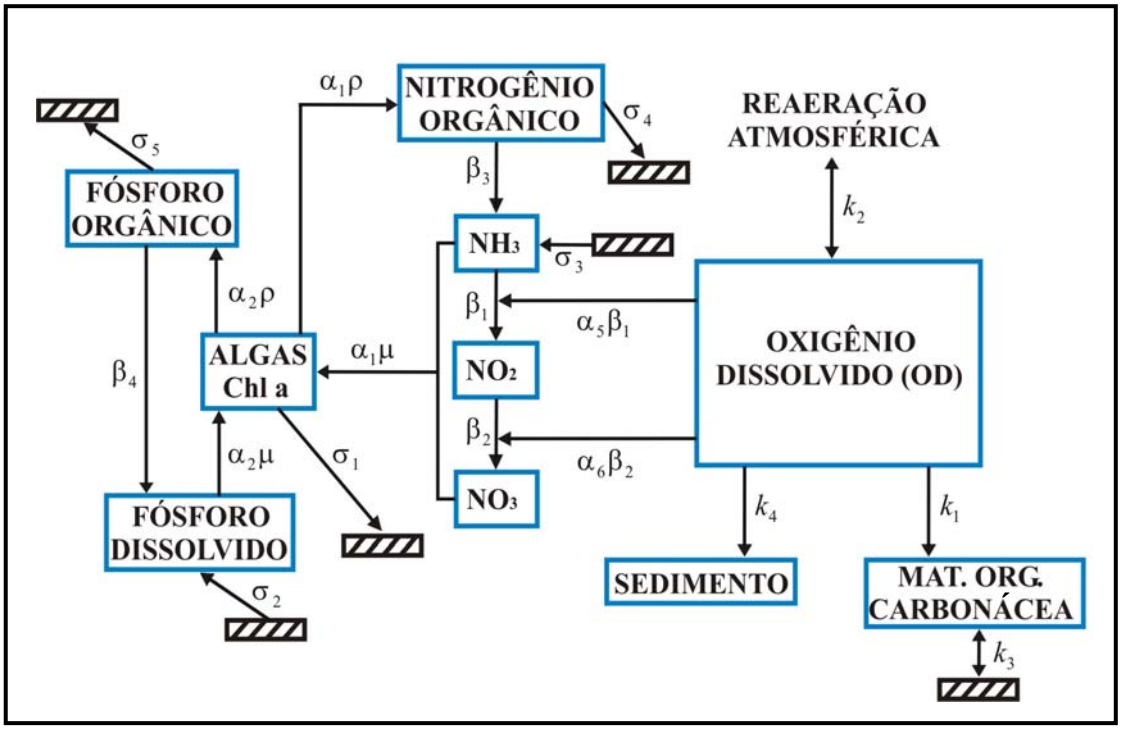


Figura 2.7: Esquema das relações entre constituintes e coeficientes cinéticos no modelo QUAL2E (BROWN e BARNWELL, 1987 - com adaptações).

O QUAL2E foi desenvolvido na linguagem computacional ANSI FORTRAN 77. É um modelo unidimensional de regime permanente, uma vez que considera os mecanismos de

difusão e advecção como significantes apenas no sentido do fluxo principal do canal do rio, ou seja, no eixo longitudinal. Esse modelo é capaz de contemplar descargas pontuais e difusas de resíduos líquidos ou de poluentes, além de pontos de retirada e de introdução de água. Brown e Barnwell (1987) adicionaram no QUAL2E a análise de sensibilidade (MCCUTCHEON e FRENCH, 1989), o que lhe garante uma funcionalidade que poucos modelos possuem. É importante salientar que existem divergências entre os pesquisadores, nos dias atuais, sobre o nome do QUAL2E quando o mesmo inclui a análise de sensibilidade, sendo que alguns o classificam como QUAL2E UNCAS. Nessa dissertação, adotou-se o nome padrão QUAL2E.

No transporte de massa, o QUAL2E baseia-se na solução de equações diferenciais finitas dos mecanismos de transporte e transformação. A **Equação 2.5** (COX, 2003) é a sua fórmula interna básica.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \underbrace{\frac{\partial\left(A_x D_L \frac{\partial C}{\partial x}\right)}{\partial x} dx}_{\mathbf{A}} - \underbrace{\frac{\partial\left(A_x \overline{U} C\right)}{\partial x} dx}_{\mathbf{B}} + \underbrace{\left(A_x d_x\right)\frac{dC}{dt}}_{\mathbf{C}} + \underbrace{S}_{\mathbf{D}} \qquad (\mathbf{2.5})$$

Termos da equação: dispersão **(A)** + advecção **(B)** + reações e interações **(C)** + fontes externas **(D)**

onde:

M: massa, (M);

A_x: área da seção transversal, (L^2);

C: concentração do constituinte, (M/L^3);

x: distância, (L);

D_L: coeficiente de dispersão longitudinal, (L^2/T^{-1});

$\overline{U}$: velocidade média, (L/T);

t: tempo, (T); e

S: fonte ou sumidouro externo, (M/T).

O QUAL2E utiliza a **Equação 2.6** (PALMIERI, 2004) para descrever a mudança da concentração de OD no decorrer do tempo.

$$\frac{dC_O}{dt} = K_2\left(C_S - C_O\right) + \left(\alpha_3\mu - \alpha_4\rho\right)A - K_1L - \frac{K_4}{d} - \alpha_5\beta_1N_1 - \alpha_6\beta_2N_2 \qquad (\mathbf{2.6})$$

onde:

C_o: concentração de oxigênio dissolvido, (mg/L);

C_s: concentração de saturação de oxigênio dissolvido na água, a dada temperatura, (mg/L);

α_3: taxa de oxigênio produzido por fotossíntese por unidade de alga, (mg-O/mg-A);

α_4: taxa de remoção de oxigênio por unidade de respiração algal, (mg-O/mg-A);

α_5: taxa de remoção de oxigênio por unidade de oxidação de amônia, (mg-O/mg-N);

α_6: taxa de remoção de oxigênio por oxidação de nitrito, (mg-O/mg-N);

μ: taxa de crescimento de algas, (d^{-1});

ρ: taxa de respiração algal, (d^{-1});

A: concentração de biomassa algal, (mg-A/L);

L: demanda bioquímica última de oxigênio, (mg/L);

K_1: coeficiente de desoxigenação, (d^{-1});

K_2: coeficiente de reaeração, (d^{-1});

K_4: coeficiente cinético da demanda bentônica do oxigênio, ($g/m^2.d$);

β_1: coeficiente cinético da oxidação de amônia, (d^{-1});

β_2: coeficiente cinético da oxidação de nitrito, (d^{-1});

N_1: concentração de amônia, (mg-N/L);

N_2: concentração de nitrito, (mg-N/L); e

d = profundidade média, (m).

Quando no início de uma simulação, o QUAL2E solicita que o usuário proceda com a divisão esquemática dos trechos do rio em elementos computacionais com as mesmas

propriedades hidrológicas (tais como a seção transversal e a inclinação do canal), e cinéticas (tais como os coeficientes de desoxigenação e reaeração, dentre outros). Logo, o corpo hídrico pode ser encarado como uma seqüência de pequenos reatores acoplados entre si por meio dos mecanismos de transporte de massa.

As principais limitações do QUAL2E são:

- As simulações só podem ser realizadas em regime permanente, tanto em nível de quantidade quanto de parâmetros de qualidade da água.
- Só permite a incorporação de até sete elementos de cabeceira e de até seis elementos de junção.
- O máximo de trechos possíveis de serem modelados é de 25.
- Cada trecho pode ser dividido em, no máximo, vinte elementos computacionais, perfazendo o total de 250 elementos.
- O programa só permite até 25 elementos computacionais de descarga ou captação.

Segundo Brown e Barnwell (1987), para que o QUAL2E realize as simulações, quatro conjuntos de dados de entrada são necessários, sendo eles:

- **Representação do Sistema Hídrico:** Compreende as divisões dos trechos e subtrechos, suas definições enquanto elementos computacionais e suas características hidráulicas, como a vazão na cabeceira e as vazões incrementais em cada trecho.
- **Variáveis Globais:** São parâmetros como as características físicas da bacia e os dados climatológicos e geográficos, dentre outros.
- **Dados para Controle da Simulação:** Diz respeito, por exemplo, à abrangência temporal da modelagem e aos trechos que o usuário deseja simular.
- **Dados Funcionais:** São as informações de entrada que o operador fornece e que determinam o sistema modelado, tais como os parâmetros de qualidade da água, a existência e a localização das captações, dentre outros.

Nas simulações do QUAL2E, o usuário pode optar pela modalidade dinâmica ou de estado constante. No primeiro caso, os dados climatológicos locais são fornecidos em intervalos regulares; desse modo, o balanço de calor apresenta uma resposta diária do sistema hidráulico no que diz respeito às condições de mudança de temperatura. No segundo caso, os dados climatológicos médios são fornecidos pelo usuário apenas uma vez, sendo que os mesmos são utilizados pelo modelo em todas as simulações.

CAPÍTULO 3 - O RIO ARAGUARI

O Estado do Amapá destaca-se por possuir uma considerável malha hídrica, apresentando o terceiro maior potencial de descarga de rios do país (REBOUÇAS, 2002). Em sua região Centro-Leste encontra-se localizado o Rio Araguari, considerado o mais importante do estado. Esse rio nasce na Serra Lombarda e Tumucumaque e deságua no Oceano Atlântico (CUNHA, 2004). É em seu médio curso que está situada a Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, a primeira hidrelétrica que foi implantada na Amazônia. Baseado em dados institucionais e, principalmente, no Programa de Estudos e Pesquisas nos Vales Amazônicos (PROVAM) - publicação editada por meio de uma parceria entre a Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM) e a Organização dos Estados Americanos (OEA), e que caracteriza, de maneira detalhada, os recursos hídricos do Amapá, procedeu-se, nesse capítulo da dissertação, com um detalhamento dos recursos hídricos amapaenses e, em especial, da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari, incluindo alguns dos impactos ambientais de origem antrópica causados nesse corpo d'água, objeto da presente pesquisa. As informações obtidas estão apresentadas a seguir.

3.1 Os Recursos Hídricos do Estado do Amapá

O Estado do Amapá possui uma superfície de, aproximadamente, 143 mil km^2 e uma população estimada, no ano de 2005, em 594.587 habitantes (IBGE, 2006). É formado por dezesseis municípios e encontra-se localizado no extremo Norte Setentrional do país, dentro dos domínios da Floresta Amazônica. Faz limite ao Sul com a foz do Rio Jari, ao Norte com a Bacia Hidrográfica do Oiapoque, a Oeste com o Rio Jari, ao Leste com o Oceano Atlântico, a Noroeste com o Suriname e Guiana Francesa e a Sudeste com o canal do Norte do Rio Amazonas (PROVAM, 1990). É em sua capital, Macapá, localizada às margens do Rio Amazonas, o maior rio em volume de água do mundo, que se encontra localizado o Marco Zero, monumento por onde passa a Linha do Equador.

A maior parte da população do estado não é servida dos serviços de abastecimento público de água (apenas 39% dos habitantes têm acesso à água tratada), e de coleta e disposição final de efluentes domiciliares (apenas 4,42% dos habitantes contam com coleta de esgoto). Por esses motivos, os índices de incidência de enfermidades relacionadas às precárias condições de saneamento são preocupantes. Durante o ano de 1995, por exemplo, a taxa de mortalidade devido a doenças infecciosas e parasitárias no Amapá foi de 27,28%. Em 1996, foram confirmados 19.056 casos de malária (TUCCI et al., 2001).

De acordo com a **Figura 3.1**, a época de maiores precipitações na região está compreendida entre os meses de dezembro e maio, e os menores índices pluviométricos observados ocorrem, geralmente, entre os meses de setembro e novembro. A média total anual de precipitações no Amapá é superior a 3.500 mm, ocorrendo pequenas variações de uma região para outra. O clima predominante no estado é o Equatorial (Super Úmido e Úmido); as temperaturas médias anuais variam de 26,1ºC a 31 ºC; a média anual da umidade relativa do ar está compreendida entre 80% e 90%; a insolação total anual varia de 1.700 a 2.300 horas; a velocidade média dos ventos está compreendida entre 0,7 m/s e 3,6 m/s, e a evaporação total anual é de 600 mm a 1.200 mm (PROVAM, 1990; LEI 0686, 2002; IBGE, 2006).

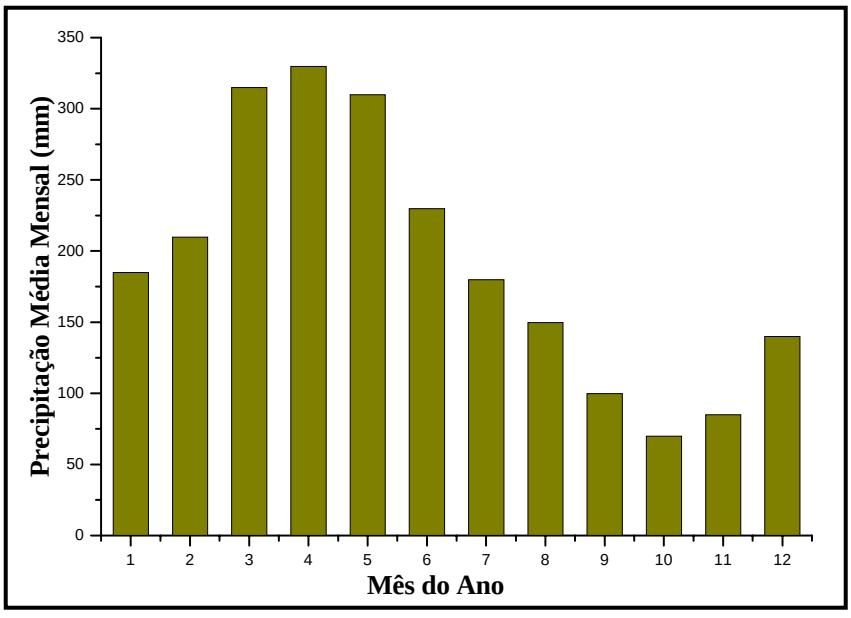


Figura 3.1: Precipitação média mensal no período de um ano no Estado do Amapá (PROVAM, 1990).

Segundo estudo intitulado de Zoneamento Ecológico e Econômico, elaborado para o estado no ano de 1997, o Amapá é composto por 33 bacias hidrográficas, sendo, desse total, vinte estuarinas e treze oceânicas (LEI 0686, 2002).

A rede brasileira de monitoramento hídrico, componente do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), é de importância fundamental para os estudos ligados aos corpos d'água e à hidrologia, uma vez que disponibiliza informações ambientais fundamentais para a modelagem computacional da qualidade da água ou hidrológica. Alguns exemplos são os dados climatológicos, tais como precipitação, temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento, e os hidráulicos, tais como vazão, profundidade e largura do rio. Estações de coleta de dados hídricos implantadas em locais estratégicos, assim como séries históricas bem documentadas, são necessárias para o desenvolvimento de modelos ambientais de qualidade da água.

A **Figura 3.2** fornecida pelo Departamento de Geoprocessamento da Agência Nacional de Águas, ilustra as plataformas pluviométricas e fluviométricas convencionais em operação no estado. É possível observar que algumas dessas estações não são de propriedade da ANA, o que dificulta o acesso aos dados. Apesar do Amapá possuir um número relativamente elevado de estações se comparado a outros estados brasileiros, algumas estão em fase de reativação ou manutenção. Nessa figura ainda não se encontram locadas as três plataformas automáticas de coleta de dados (PCDs) que foram instaladas recentemente no estado (CUNHA, 2004). No trecho do Médio Araguari, onde foram realizados os estudos ora descritos, existe apenas a Estação Fluviométrica de Porto Platon, cujos dados encontram-se listados na **Tabela 3.1**. De acordo com o Sistema de Informações Hidrológicas - HIDROWEB - da ANA, os dados da série histórica de Porto Platon datam de janeiro de 1953.

Atualmente, o Laboratório de Hidrometeorologia (LabHIDRO), pertencente ao Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA), desenvolve previsões do tempo por meio de um programa denominado MESO ETA; um exemplo de previsão climática feita por esse modelo é apresentado na **Figura 3.3**. Esse programa tem auxiliado consideravelmente na previsão meteorológica em todo o estado (CUNHA, 2004).

FIGURA 3.2 (VIDE ARQUIVO EM ANEXO AO CD ROOM).

Tabela 3.1: Informações gerais da Estação Fluv. de Porto Platon (HIDROWEB/ANA, 2005 - com adaptações. Acessado em 28/1/2006, ás 18:30 h).

Informação	Dados da Estação
Código (ANA)	30400000
Rio	Araguari
Estado	Amapá (AP)
Instituição Responsável	ANA
Latitude	00º 42’ 27”
Longitude	51º 26’ 20”
Área de drenagem	29.820,00 km

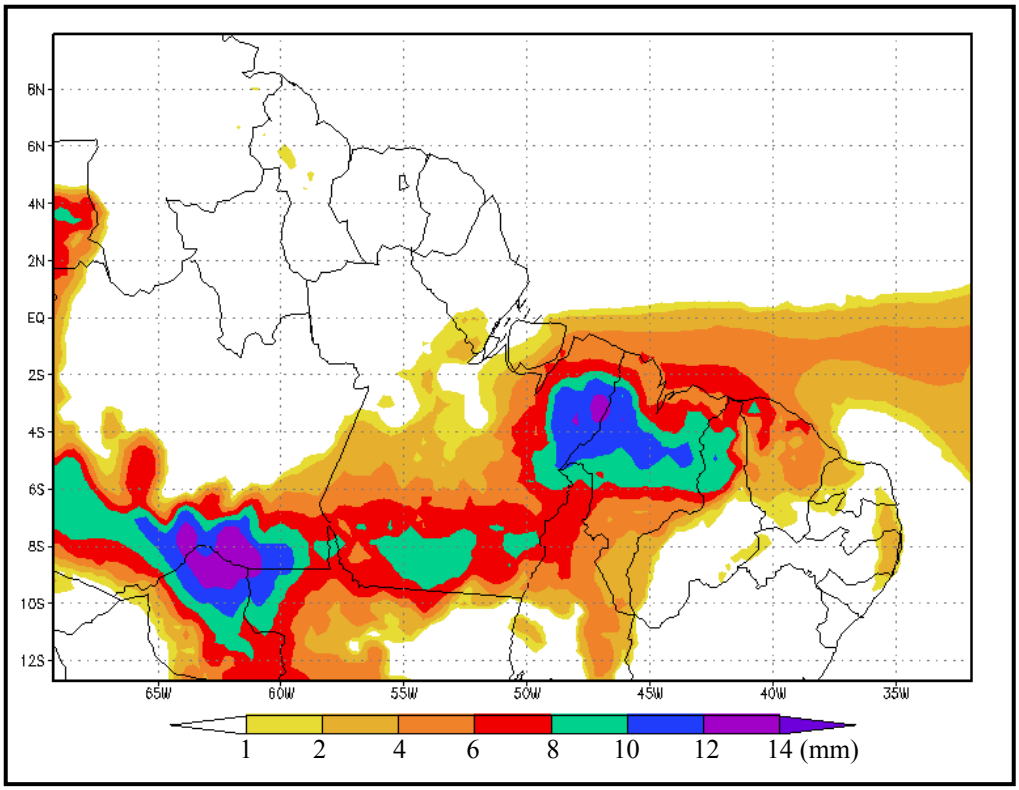


Figura 3.3: Primeira previsão de tempo da história do Estado do Amapá, feita pelo LABHIDRO/IEPA (Cunha, 2004).

3.2 A Bacia Hidrográfica do Rio Araguari

A Bacia Hidrográfica do Rio Araguari está situada no extremo Norte do Brasil, entre os paralelos 02º 28’ N e 00º 25’ N, e os meridianos 53º 02’ W e 49º 53’ W, possuindo uma área de aproximadamente 37.648 km2. Essa BH encontra-se inteiramente localizada, segundo a nova

divisão de bacias hidrográficas do Brasil feita pela Agência Nacional de Águas, nos domínios da Região Hidrográfica Amazônica, mais precisamente nas terras do Estado do Amapá, conforme pode ser observado na **Figura 3.4** a seguir.

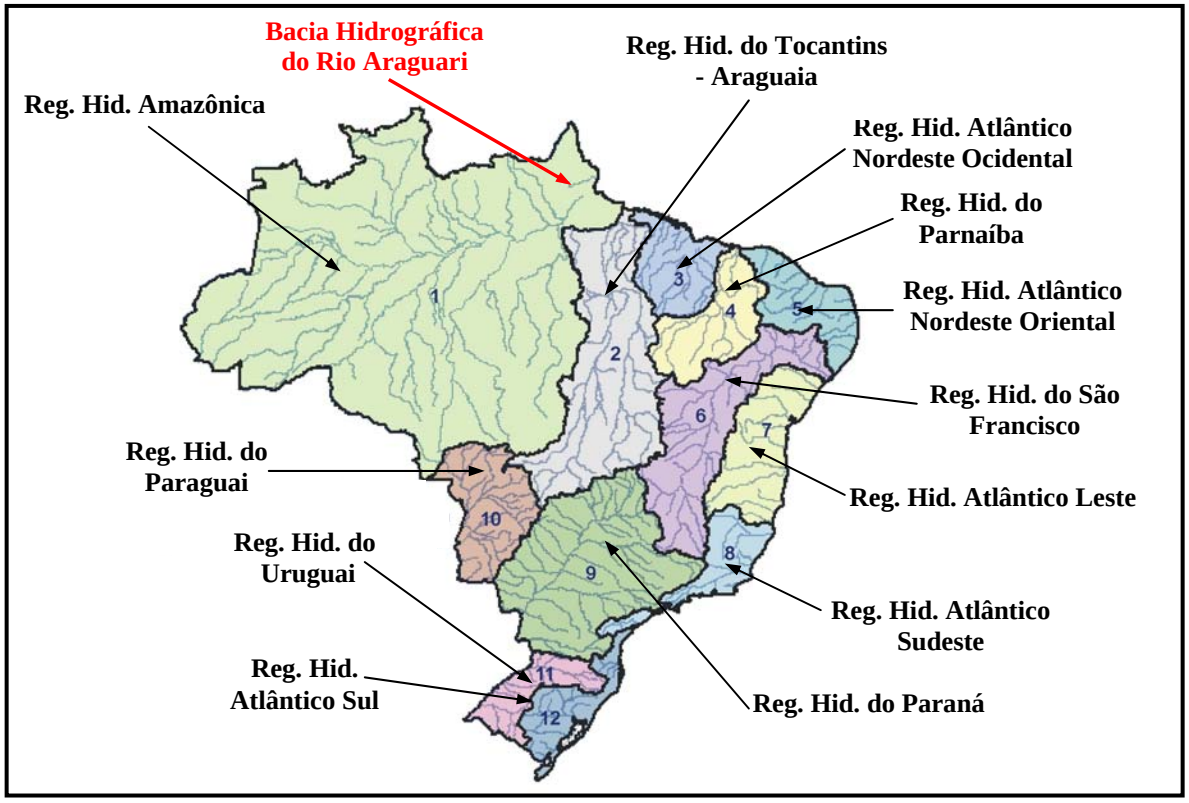


Figura 3.4: Localização da BH do Rio Araguari segundo a nova divisão feita pela ANA (Departamento de Geoprocessamento da ANA, 2006 - com adaptações).

A bacia hidrográfica do Rio Araguari é limitada pela Serra dos Mongubas a Nordeste, Serra da Lombarda ao Norte, Serra de Tumucumaque a Oeste, Serra do Iratapuru a Sudeste e Serra da Pancada ao Sul, podendo ser visualizada na **Figura 3.5**. Seu contorno é formado pelo divisor comum das águas das bacias dos Rios Amapá no Leste, Calçoene no Nordeste, Oiapoque no Norte e Jari a Oeste. De maneira geral, essa BH possui forma geométrica muito irregular, principalmente nas proximidades de sua foz, no Oceano Atlântico. O relevo local é plano, exceto pela presença de algumas regiões colinosas revestidas por florestas pluviais que aparecem junto à borda ocidental da planície de escoamento. No inverno surgem áreas inundáveis que formam lagos intercomunicáveis, o que proporciona uma paisagem de pântano em alguns locais. Essa bacia é a maior do Estado do Amapá e sua porção ocidental é formada por florestas pluviais e re -

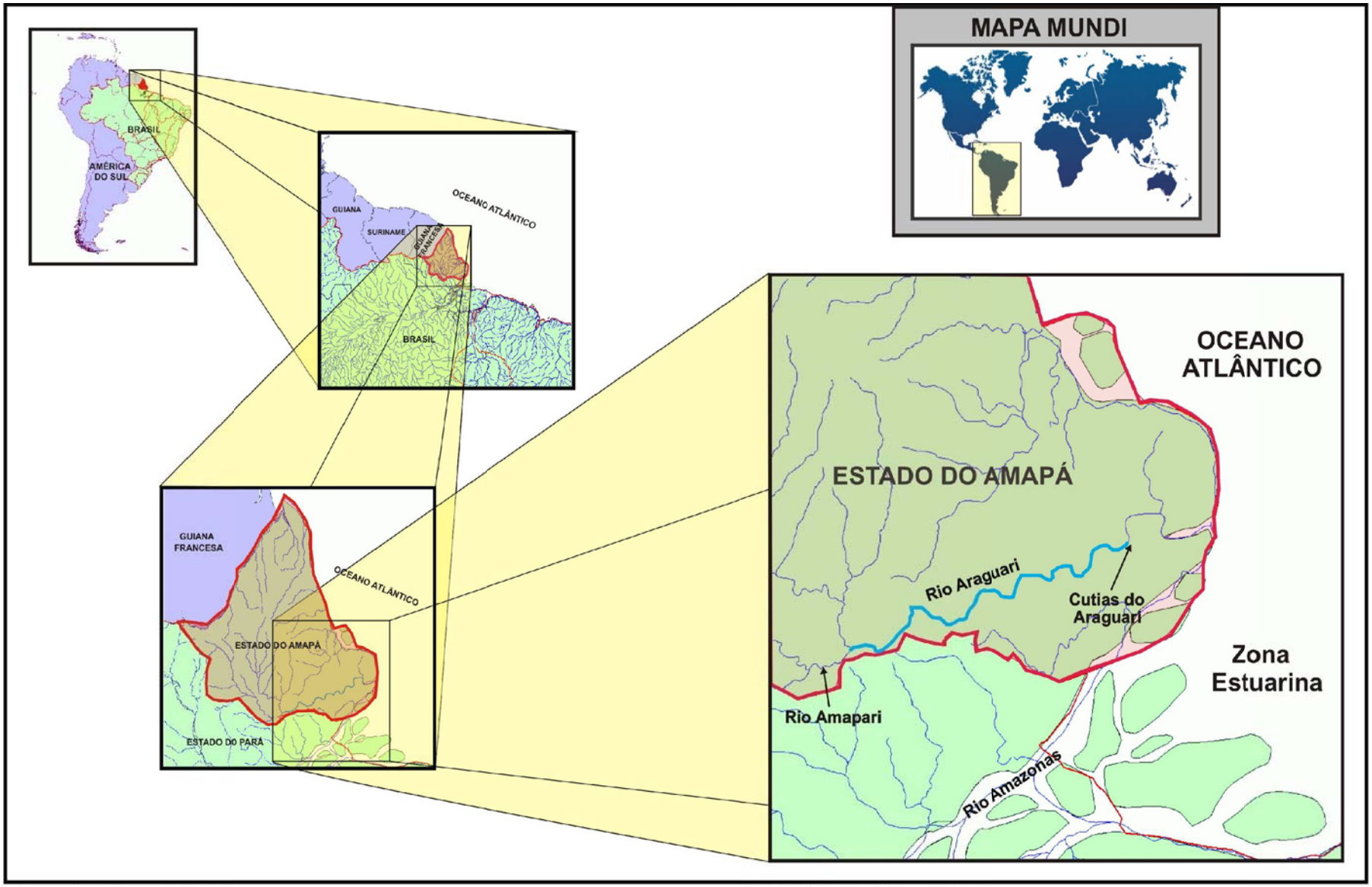


Figura 3.5: Mapa de localização do Rio Araguari (Elaborado pelo autor com imagens oriundas do HIDROWEB/ANA, 2006).

levos irregulares. Na região denominada de Baixo Araguari, a predominância é de uma planície flúvio-marinha, ocorrendo a presença de macrófitas aquáticas nas margens do canal principal do manancial (PROVAM, 1990).

O Rio Araguari nasce ao Sul da Serra Lombarda e Tumucumaque, a cerca de 200 metros de altitude. Ele é formado pela confluência dos Rios Mururé e Amapari, recebendo como afluentes os Rios Tapiti, Mutum, Tajauí, Santo Antônio, Falsino, Jacinto e Aporema; os Igarapés do Eduardo, da Ribeira, Manuel e do Cordeiro; e o Córrego Tracajatuba. Sua extensão aproximada é de 498 km, sendo que o mesmo é dividido em três trechos: (1) Curso Superior ou Alto Araguari (132 km); (2) Médio Curso ou Médio Araguari (161 km), região também conhecida como Paredão, onde se encontra localizada a Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes; e (3) Curso Inferior ou Baixo Araguari (205 km), onde o número de meandros aumenta, diminuindo sua velocidade de escoamento. A declividade média do canal é de 0,50 m/km e as temperaturas variam entre 20,0°C e 40,1°C (PROVAM, 1990; CUNHA, 2003).

Três municípios estão localizados nas margens do Médio Araguari, sendo eles: Porto Grande, Ferreira Gomes e Cutias, com populações estimadas, no ano de 2005, de 14.675, 4.321 e 4.285 habitantes, respectivamente. Próximo de Porto Grande ocorre a confluência do Rio Araguari com o Rio Amapari onde, a partir de então, o primeiro inicia seu trajeto pela planície costeira do Amapá, até desembocar no Oceano Atlântico. As vazões máxima e mínima medidas pela Estação Fluviométrica de Porto Platon até novembro de 2005 foram de 3.857,00 m^3/s, em 7 de abril de 1974, e 121,00 m^3/s, em 10 de dezembro de 1976, respectivamente (PROVAM, 1990; IBGE, 2006).

As águas do Rio Araguari possuem uma tonalidade amarelo-barrenta, com considerável predominância de matéria orgânica, uma vez que, na maioria dos rios amazônicos, a presença de substâncias húmicas é bem acentuada (ANA, 2005). Esse rio sofre os efeitos das marés oceânicas até a altura do município de Cutias, numa cota média de variação de cerca de 0,50 m. No período das chuvas, principalmente, o Araguari vivencia o fenômeno da “pororoca”, quando suas águas se opõem à maré oceânica, fazendo elevar seu nível até o momento em que ocorre a quebra brusca do equilíbrio até então mantido entre esses dois volumes hídricos. Na

maré alta, a onda formada pela água do mar avança sobre o rio, invertendo sua correnteza. O movimento dessa onda provoca elevados ruídos que podem ser ouvidos a longas distâncias (PROVAM, 1990). As **Figuras 3.6** a **3.8** ilustram alguns aspectos gerais do Médio Araguari.

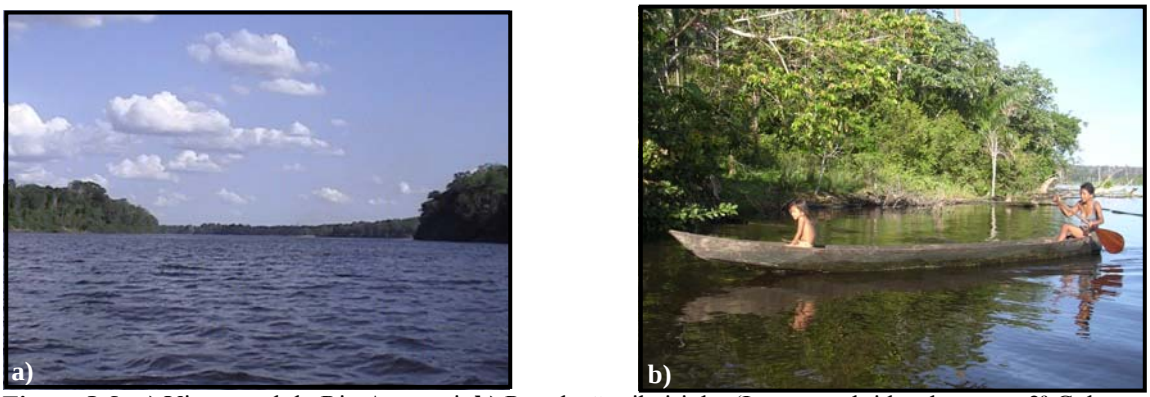


Figura 3.6: a) Vista geral do Rio Araguari; **b)** População ribeirinha (Imagens obtidas durante a 2ª Coleta, em maio/2005).

Figura 3.7: a) UHE de Coaracy Nunes; **b)** Presença de rochas de grandes dimensões na calha principal do rio (Imagens obtidas durante a 3ª Coleta, em novembro/2005).

Figura 3.8: a) Vista geral do reservatório da UHECN; **b)** Criação de búfalos (bubalinocultura) nas margens do Rio Araguari (Imagens obtidas durante a 4ª Coleta, em março/2005).

A geologia da região do Médio Araguari é formada, principalmente, por rochas metamórficas, metassedimentos, gnaisse, granitóide, granulito, migmatito e ortoanfibolito (dentre outras), conforme pode ser visualizado na **Figura 3.9**, que mostra a formação geológica na região de Porto Grande, município situado na parte central do trecho pesquisado.

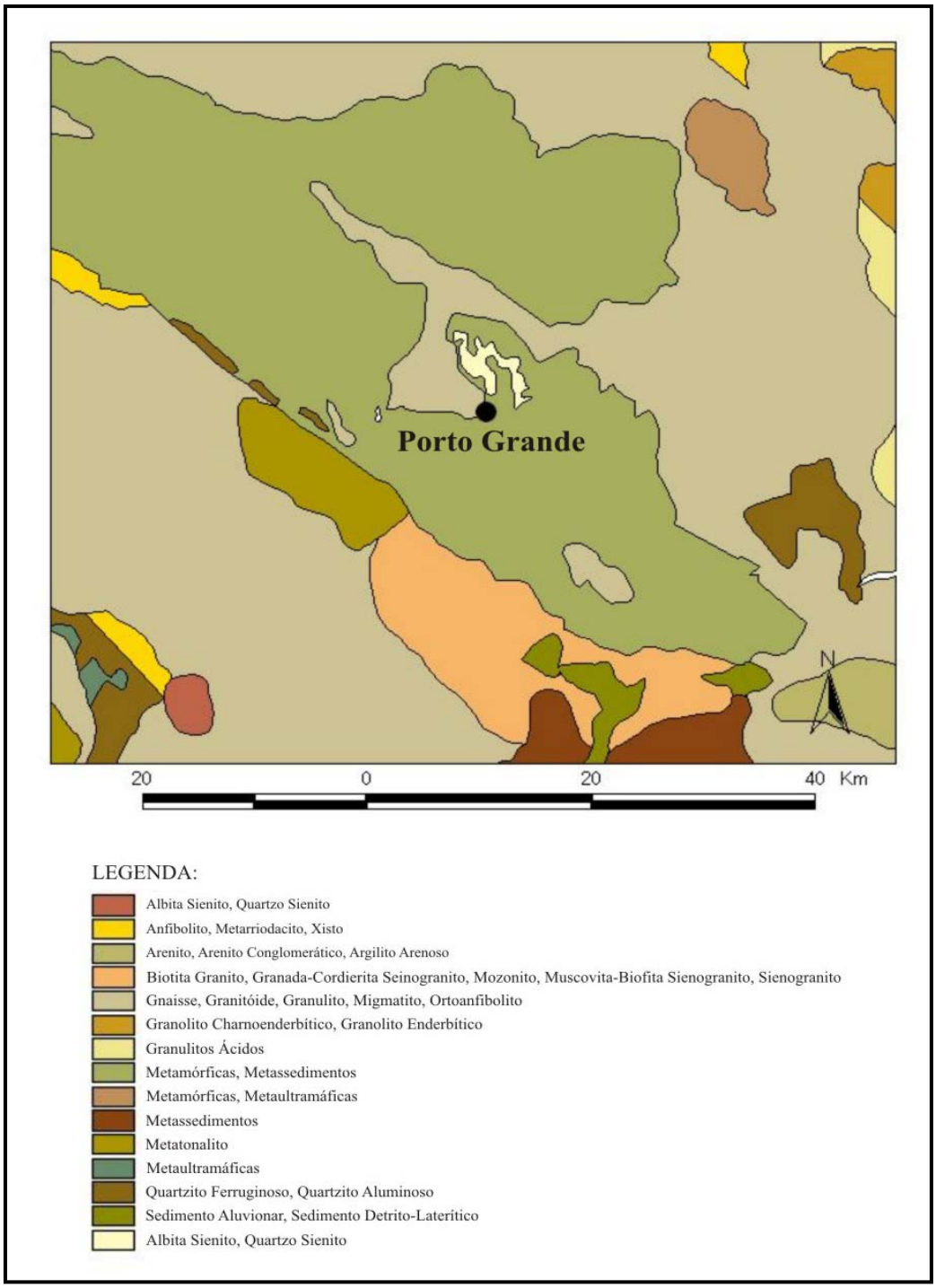


Figura 3.9: Mapa geológico da região do Médio Araguari (ARCVIEW GIA versão 3.1, 2006).

3.3 Pressões Antrópicas no Rio Araguari

De acordo com a Resolução 001, de 23 de janeiro de 1986, do Conselho Nacional de Meio Ambiente, impacto ambiental é toda alteração nas características físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia das atividades antrópicas que, direta ou indiretamente, afetam o equilíbrio ambiental e, conseqüentemente, o bem-estar humano.

O Rio Araguari, em seu médio curso, é utilizado para diversas finalidades, tais como agricultura, pesca artesanal, geração de energia elétrica, bubalinocultura, abastecimento público, exploração de minerais preciosos, navegação, diluição de efluentes domésticos e lazer, dentre outros. Contudo, conforme pode ser observado na **Figura 3.10**, apesar desse curso d'água se encontrar localizado na Floresta Amazônica e de sua região ainda ser detentora de um bom nível de preservação, alguns impactos ambientais oriundos das atividades antrópicas podem ser notados no trecho estudado: a ocorrência de desmatamentos e queimadas para formação de pastagens, dragagem para obtenção de pedras preciosas e seixos, além de extração de rochas com finalidade ornamental.

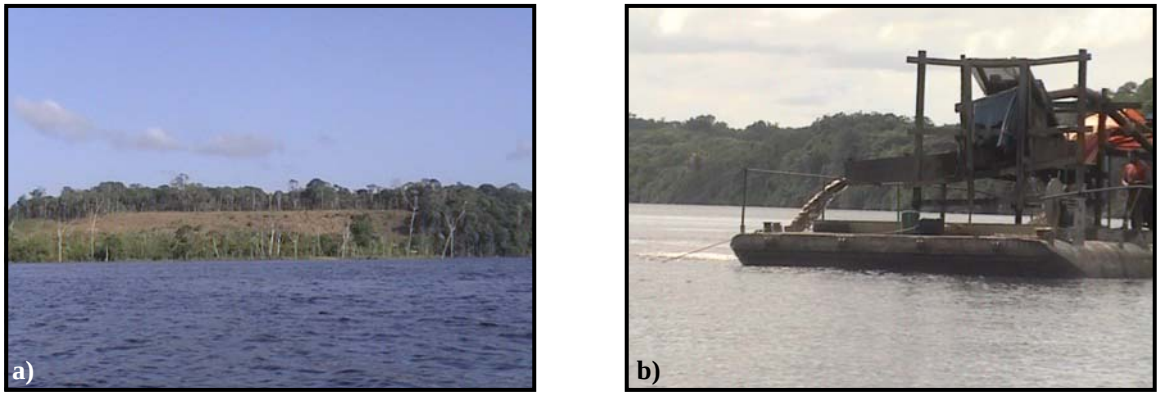


Figura 3.10: a) Desmatamento da mata ciliar no médio curso do Rio Araguari; **b)** Dragagem dos sedimentos de fundo do Rio Araguari (Imagens obtidas durante a 1ª Coleta, em novembro/2004).

Segundo estudo realizado pelo MMA (2000), que objetivou identificar locais com potencial para a criação de unidades de proteção ambiental na Amazônia, a região da BH do Rio Araguari é tida como área de extrema importância para a conservação e uso o sustentável.

CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

Para que a modelagem obtenha êxito ao representar o comportamento de um corpo hídrico, sendo capaz de fornecer respostas satisfatórias e condizentes com a realidade do escoamento natural analisado, é necessário que suas informações de entrada sejam representativas da realidade. Assim, quanto mais dados a serem utilizados nesse processo forem obtidos *in loco*, melhores e mais acuradas serão as respostas fornecidas pelo modelo. Nessa pesquisa, os dados foram obtidos em campo, em registros históricos ou, quando isso não foi possível, foram estimados com base na literatura.

Visando aglutinar informações para a estruturação da modelagem a que objetivou esse estudo, foi desenvolvida uma logística para a obtenção de dados hidráulicos e de qualidade da água relativos ao médio curso do Rio Araguari. Para tanto, fez-se necessário o estabelecimento de parcerias com a Companhia de Água e Esgoto do Amapá (CAESA) e a Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Amapá (SEMA/AP), para realização das análises laboratoriais de qualidade da água; com o Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA), para a disponibilização de técnicos e equipamentos especializados na medição de vazão e de alguns parâmetros de qualidade da água detectáveis por sondas eletroquímicas; e com as Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A (ELETRONORTE), que forneceu o apoio referente ao alojamento, alimentação e condução dos pesquisadores nas campanhas de campo.

Dessa maneira, o presente estudo de modelagem da qualidade da água foi desenvolvido de acordo com a seqüência abaixo descrita:

- definição do trecho a ser modelado e discretização do sistema;
- obtenção de dados hidráulicos e de qualidade da água;
- incorporação de dados no modelo;
- análise de sensibilidade;
- calibração; e
- simulação dos cenários futuros.

São apresentados, a seguir, os fatores que foram levados em consideração durante a escolha do QUAL2E para realização da modelagem, bem como os critérios de divisão dos trechos estudados. Posteriormente, é feita uma abordagem mais detalhada sobre os principais dados de entrada utilizados no modelo, a análise de sensibilidade, o processo de calibração, a simulação dos cenários futuros e a análise multivariada.

4.1 Escolha do Modelo de Qualidade da Água e do Trecho do Rio Araguari a ser Modelado

O modelo escolhido para a realização do estudo foi o QUAL2E, levando-se em consideração o seguinte conjunto de fatores:

- A possibilidade que o QUAL2E possui de subdividir o rio em trechos e, posteriormente, em subtrechos, que são agrupados de acordo com as características hidráulicas e de escoamento do rio, o que permite uma representação mais aproximada da realidade do corpo hídrico a ser analisado.
- O fato do Sistema de Modelagem da Qualidade da Água QUAL2E desenvolver suas simulações em regime unidimensional, exigindo, assim, uma menor quantidade de dados de entrada.
- O fato do QUAL2E ser um dos modelos de qualidade da água mais bem documentados e utilizados no mundo, e pelo mesmo estar sendo desenvolvido e estudado há mais de 35 anos por vários pesquisadores.
- Por ele representar os mais importantes processos de introdução ou supressão de oxigênio dissolvido na água.

A escolha do trecho do Rio Araguari a ser modelado abrangeu as duas principais características de escoamento que ocorrem em seu médio curso, sendo elas: os ambientes que formam os sistemas lóticos (corredeiras), e os que formam os sistemas lênticos (reservatório). Assim, tanto na definição da extensão do trecho a ser pesquisado quanto na localização das seções de medição, consideraram-se os seguintes aspectos:

- O espaçamento relativamente eqüidistante entre os pontos de amostragem.
- A disponibilidade de informações relativas às séries históricas de dados fluvio e pluviométricos, obtidas da Estação Fluviométrica de Porto Platon, o que propiciou a determinação dos coeficientes de descarga.
- Os diferentes tipos de regime de escoamento do Rio Araguari existentes em seu médio curso.
- A posição estratégica da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, um dos focos dessa pesquisa, que ficou localizada praticamente no centro da área estudada.
- A pouca influência marítima sobre a região localizada a jusante da barragem. Esse foi um dos principais motivos da extensão do trecho modelado ter chegado somente até o município de Cutias onde, a partir de então, a maré passa a exercer influência relevante sobre o Rio Araguari. Para os fins do presente estudo, não foi considerada nenhuma influência de maré.
- O fato de existir, na área pesquisada, alguns conflitos pelo uso da água (CUNHA, 2004), principalmente devido à presença da UHECN.
- A facilidade de acesso na realização das campanhas de coleta de dados, uma vez que a logística para uma pesquisa dessa envergadura é complexa e dispendiosa.
- A limitação dos recursos financeiros para se empreender uma campanha mais abrangente.

4.2 Determinação dos Coeficientes de Entrada no Modelo QUAL2E

Com o objetivo de avaliar o comportamento hidráulico e dos parâmetros de qualidade da água no trecho analisado, realizaram-se, durante um período de 1,5 ano, cinco expedições de campo: duas durante a estação de inverno (seca), duas durante a estação de verão (cheia), e uma durante a estação intermediária de verão, conforme pode ser observado na **Tabela 4.1**.

Para a determinação dos coeficientes de descarga, dados de entrada fundamentais no modelo QUAL2E, são necessárias, no mínimo, três medições de vazão em épocas distintas. Para

esse estudo, determinou-se que seriam feitas quatro medições de campo para obtenção dos dados hidráulicos; todavia, devido a imprevistos logísticos, não foi possível realizar esse procedimento na primeira campanha, ficando a mesma restrita apenas aos parâmetros de qualidade da água. Por isso, criou-se a campanha intermediária de vazão, almejando sanar a demanda inesperada no que tange à obtenção dos dados de vazão, profundidade, largura e área da seção transversal do Médio Araguari.

Tabela 4.1: Informações referentes às campanhas de coleta de campo realizadas no Médio Araguari.

Número da Campanha	Data de Realização	Dados Obtidos	Estação Climática
1	1 e 2\11\2004	Qualidade da água	Inverno
2	7 e 8\5\2005	Qualidade da água / Hidráulicos	Verão
3	1 e 2\11\2005	Qualidade da água / Hidráulicos	Inverno
4	2 e 3/3/2006	Qualidade da água / Hidráulicos	Intermediária de Verão
5	14 e 15/5/2006	Qualidade da água / Hidráulicos	Verão

No trecho analisado, ilustrado na **Figura 4.1**, foram demarcadas 23 seções de amostragem cujas coordenadas geográficas podem ser visualizadas na **Tabela 4.2**. O comprimento total pesquisado foi subdividido em dezenove trechos com características hidráulicas semelhantes, sendo que os mesmos foram distribuídos da seguinte maneira: dez a montante da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, três dentro do reservatório da usina e dez a jusante da barragem.

As campanhas de coleta de dados abrangeram o trecho do Médio Araguari, iniciando no local onde ocorre a sua confluência com o Rio Amapari, passando pelos municípios de Porto Grande e Ferreira Gomes e finalizando na cidade de Cutias, perfazendo uma extensão total de 120 km. A **Tabela 4.3** indica o comprimento de cada um desses trechos.

É importante salientar que três afluentes do Rio Araguari tiveram suas vazões incorporadas à presente modelagem, sendo eles: Rio Amapari, Igarapé do Eduardo e Córrego Tracajatuba. A **Figura 4.2** ilustra, de forma esquemática, o protótipo físico de todo o trecho pesquisado, incluindo todos os elementos naturais e antrópicos considerados na modelagem matemática com o QUAL2E.

FIGURA 4.1 (VIDE ARQUIVO EM ANEXO AO CD ROOM).

Tabela 4.2: Coordenadas dos pontos de coleta.

Ponto de Coleta	Coordenadas Geográficas	
1	N 00 43 29,90	W 51 32 50,00
2	N 00 43 17,30	W 51 32 37,30
3	N 00 44 20,30	W 51 31 20,80
4	N 00 44 27,80	W 51 29 38,90
5	N 00 44 32,70	W 51 28 00,20
6	N 00 43 03,70	W 51 27 15,40
7	N 00 43 04,90	W 51 25 34,00
8	N 00 44 04,80	W 51 23 12,50
9	N 00 46 56,40	W 51 21 19,20
10	N 00 46 27,50	W 51 20 53,40
R1	N 00 51 19,80	W 51 17 38,20
R2	N 00 53 35,50	W 51 16 58,20
R3	N 00 53 53,70	W 51 16 41,10
11	N 00 51 30,80	W 51 11 36,80
12	N 00 51 52,70	W 51 09 43,00
13	N 00 49 52,20	W 51 06 28,80
14	N 00 50 52,20	W 51 02 48,50
15	N 00 54 19,90	W 51 01 28,60
16	N 00 56 06,80	W 51 00 13,10
17	N 00 57 22,50	W 50 59 13,20
18	N 00 59 28,90	W 50 56 04,20
19	N 00 57 44,00	W 50 52 24,70
20	N 00 58 27,30	W 50 48 34,60

Tabela 4.3: Comprimento dos trechos.

Trecho	Comprimento (km)	Trecho	Comprimento (km)
1	6,00	11	4,00
2	4,00	12	3,00
3	3,00	13	9,00
4	8,00	14	9,00
5	4,00	15	7,00
6	7,00	16	8,00
7	3,00	17	9,00
8	7,00	18	10,00
9	7,00	19	8,00
10	4,00	**Total:**	**120,00 km**

Os dados de entrada no modelo incluem taxas de reação e variáveis físicas e de qualidade da água, as quais devem ser estimadas ou obtidas *in loco*. Porém, é importante salientar que foi calibrado apenas um modelo para o Rio Araguari; assim procedeu-se devido aos seguintes fatores:

- A não detecção de influência do aumento da vazão do Rio Araguari sobre os valores de K_1.

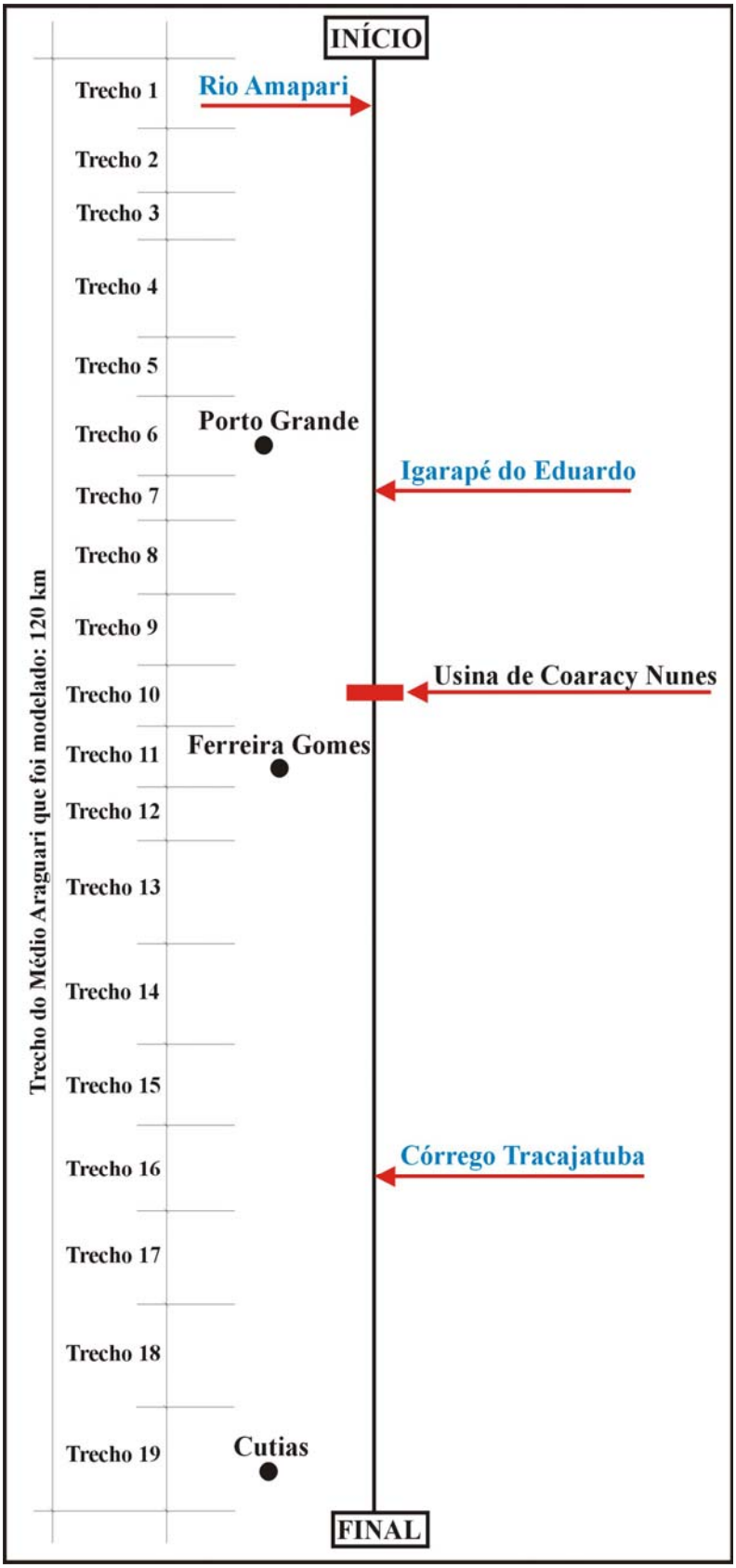


Figura 4.2: Perfil esquemático do trecho modelado.

- O coeficiente de reaeração (K_2) ter apresentado um comportamento relativamente constante nas seções analisadas durante as diferentes estações do ano.
- A ocorrência de alguns problemas logísticos que impossibilitaram uma completa coleta de dados durante todas as variações sazonais.

Nessa pesquisa, assim como Rodrigues (2005), as variáveis selecionadas para a simulação foram oxigênio dissolvido e demanda bioquímica última de oxigênio, sendo que os demais coeficientes e dados de entrada no modelo QUAL2E são apresentados nos itens a seguir. Os termos do modelo relativos à fotossíntese não foram considerados, uma vez que não se percebeu, em nenhuma das cinco campanhas de coleta de campo, um efeito claro desse processo nas concentrações de oxigênio dissolvido presente na água do Rio Araguari.

4.2.1 Coeficiente de desoxigenação e demanda bioquímica última

A decomposição da matéria orgânica presente na água, quando ocorre de maneira aeróbia, é realizada por organismos que utilizam o oxigênio molecular como aceptor de elétrons, consumindo-o do meio aquático quando na realização desse processo. A taxa com que isso se dá é conhecida como coeficiente de desoxigenação (K_1, expresso em d^{-1}). Além disso, a quantidade de OD consumida pelos seres decompositores é conhecida como demanda bioquímica de oxigênio (DBO).

Na modelagem do OD pelo QUAL2E, é necessário que se conheça o valor da demanda bioquímica última de oxigênio, uma vez que, baseado nesse valor e no coeficiente de desoxigenação, é possível obter uma curva (x-y) que é capaz de descrever matematicamente a progressão da demanda bioquímica de oxigênio em função do tempo.

Com base em Streeter e Phelps (1925) e de acordo com Bronw e Barnwell (1987), o QUAL2E caracteriza a reação da demanda bioquímica de oxigênio como de primeira ordem, sendo necessária, portanto, a determinação de K_1 e L.

Nesse estudo, a determinação do coeficiente de desoxigenação e da demanda bioquímica de oxigênio foi feita em três seções do Médio Araguari, sendo elas: 3, 10 e 12, situadas a montante, dentro e a jusante do lago da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, respectivamente. Optou-se apenas por esses três pontos porque além dos mesmos serem representativos dos trechos, não foi possível proceder com a determinação de K_1 em outras localidades do manancial devido às limitações de materiais e reagentes pertinentes ao laboratório parceiro. As **Figuras 4.3** a **4.10**, a seguir, ilustram as curvas encontradas, os respectivos valores de K_1, L e do tempo médio necessário para que ocorra a transição da fase carbonácea para a nitrogenada.

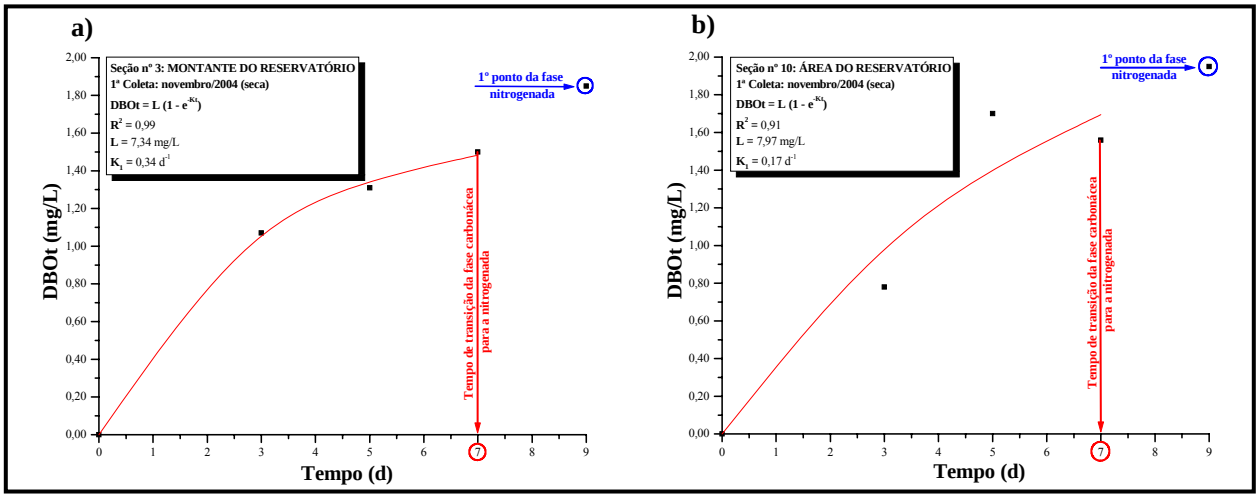


Figura 4.3: Gráficos da determinação de K_1, da L e do tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada: **a)** Seção 3: 1ª Coleta (novembro/2004); **b)** Seção 10: 1ª Coleta (novembro/2004).

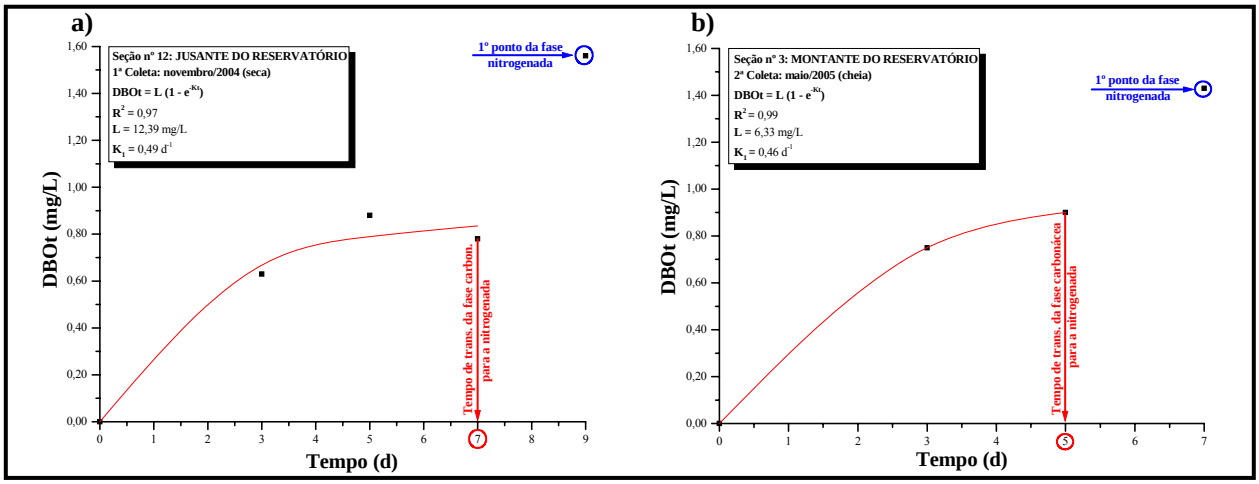


Figura 4.4: Gráficos da determinação de K_1, da L e do tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada: **a)** Seção 12: 1ª Coleta (novembro/2004); **b)** Seção 3: 2ª Coleta (maio/2005).

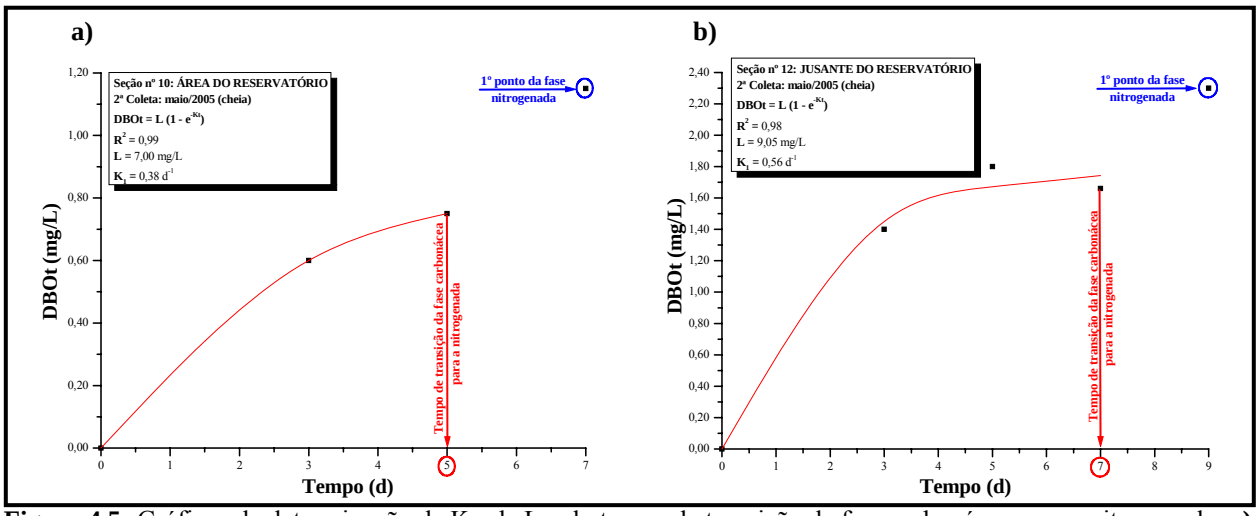


Figura 4.5: Gráficos da determinação de K_1, da L e do tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada: **a)** Seção 10: 2ª Coleta (maio/2005); **b)** Seção 12: 2ª Coleta (maio/2005).

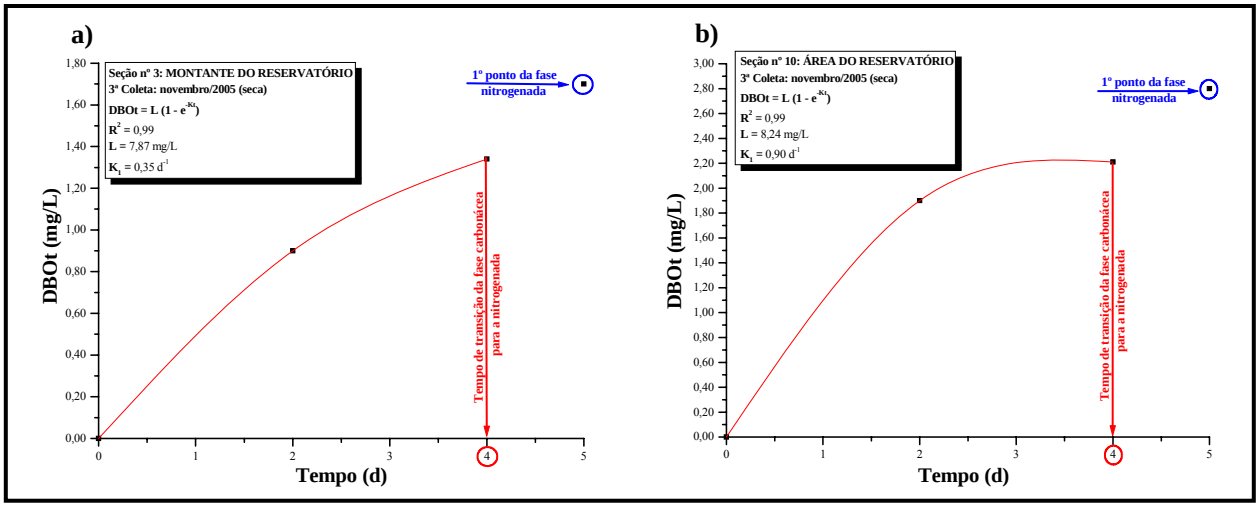


Figura 4.6: Gráficos da determinação de K_1, da L e do tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada: **a)** Seção 3: 3ª Coleta (novembro/2005); **b)** Seção 10: 3ª Coleta (novembro/2005).

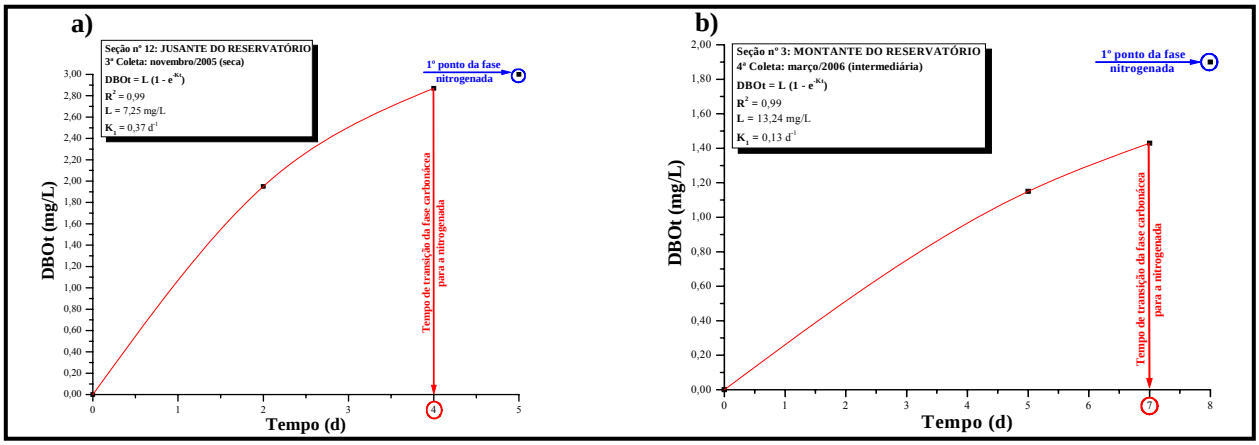


Figura 4.7: Gráficos da determinação de K_1, da L e do tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada: **a)** Seção 12: 3ª Coleta (novembro/2005); **b)** Seção 3: 4ª Coleta (março/2006).

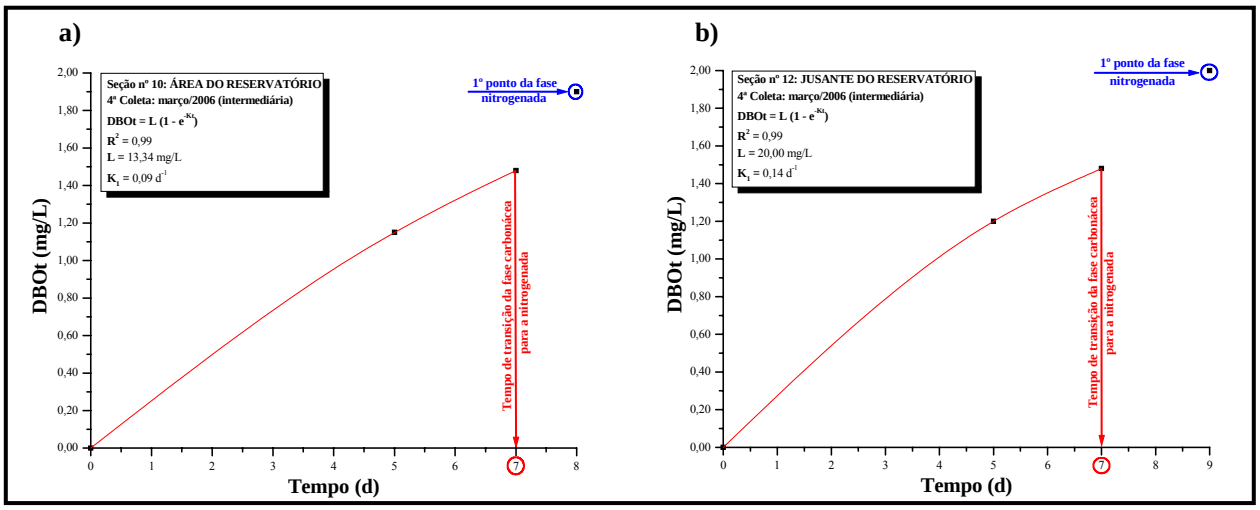


Figura 4.8: Gráficos da determinação de K_1, da L e do tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada: **a)** Seção 10: 4ª Coleta (março/2006); **b)** Seção 12: 4ª Coleta (março/2006).

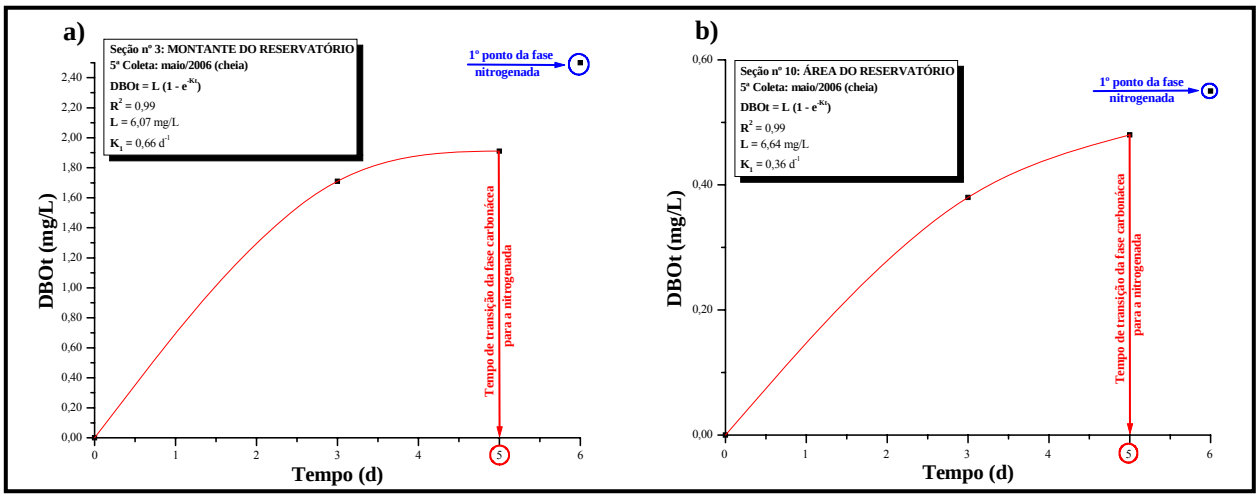


Figura 4.9: Gráficos da determinação de K_1, da L e do tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada: **a)** Seção 3: 5ª Coleta (maio/2006); **b)** Seção 10: 5ª Coleta (maio/2006).

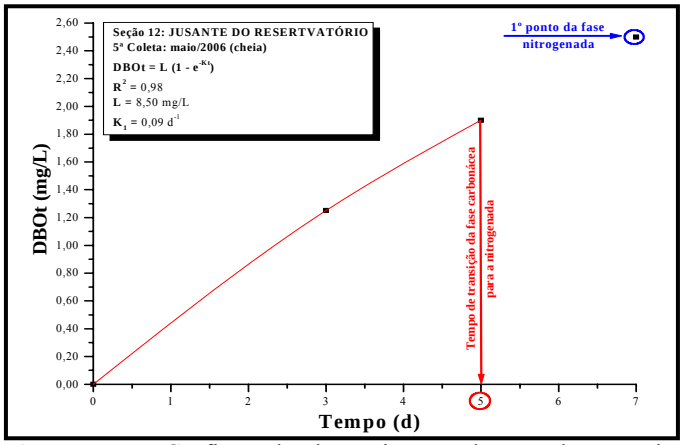


Figura 4.10: Gráficos da determinação de K_1, da L e do tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada: Seção 12: 5ª Coleta (maio/2006).

Após essa etapa, procedeu-se com o cálculo da média dos valores de K_1 que foram utilizados como dados de entrada no QUAL2E, utilizando, para tanto, a **Equação 4.1**:

$$K_1 médio = \frac{n}{\frac{1}{K_{1a}} + \frac{1}{K_{1b}} + ... + \frac{1}{K_{1n}}} \quad (\mathbf{4.1})$$

onde:

n: quantidade de coeficientes de desoxigenação obtidos; e

K_{1a}; K_{1b} e K_{1n}: valores de K_1 medidos.

A **Tabela 4.4** apresenta os valores de K_1 (média) e da L quantificados nesse estudo.

Tabela 4.4: Valores de K_1 (média) e L quantificados para o Araguari.

Trecho	K_1 (d^{-1})	L (mg/L)	Trecho	K_1 (d^{-1})	L (mg/L)
1	0,29	8,17	11	0,21	8,63
2	0,29	8,17	12	0,20	11,43
3	0,29	8,17	13	0,20	11,43
4	0,29	8,17	14	0,20	11,43
5	0,29	8,17	15	0,20	11,43
6	0,29	8,17	16	0,20	11,43
7	0,29	8,17	17	0,20	11,43
8	0,29	8,17	18	0,20	11,43
9	0,21	8,63	19	0,20	11,43
10	0,21	8,63	-	-	

4.2.2 Coeficiente de reaeração

A taxa com que um corpo hídrico absorve o oxigênio presente na atmosfera através de sua interface ar-água é chamada de coeficiente de reaeração (K_2, expresso em d^{-1}). A absorção ocorre como um processo cinético de primeira ordem, sendo que essa taxa é proporcional ao déficit de oxigênio no meio aquático, o que possibilita compreender que o K_2 varia de um rio para outro. Contudo, esse processo depende diretamente da pressão atmosférica, salinidade e temperatura da água (BARBOSA, 1989). Conforme Cunha et al. (2001) e Atkinson et al. (2004), um problema crítico que deve ser resolvido quando na modelagem do oxigênio dissolvido em

águas superficiais é a determinação do coeficiente de reaeração. A sua importância é fundamental não somente no que diz respeito à manutenção dos ciclos de vida existentes nos ecossistemas aquáticos, mas também à capacidade de autodepuração de um rio.

O K_2 pode ser obtido de duas maneiras: (1) por meio de fórmulas empíricas e semi-empíricas vinculadas a dados hidráulicos do sistema; ou (2) por técnicas de medição em campo. De acordo com Bennett e Rathbun (1972), Barbosa (1989) e Barbosa e Giorgetti (1995), existem várias técnicas experimentais desenvolvidas para a determinação do coeficiente de reaeração, sendo que a mais aceita é a dos traçadores gasosos, uma vez que esta possui a vantagem de quantificar o K_2 independente de outras fontes e sumidouros de OD na água, tais como a fotossíntese, a demanda bentônica e a demanda bioquímica de oxigênio. Porém, essa técnica envolve não somente exaustivos trabalhos de campo (RODRIGUES, 2005), mas também laboratório, equipamentos e profissionais especializados. Além disso, a mesma se torna inviável no caso de um rio como o Araguari, detentor de dimensões muito grandes, o que demandaria um elevado volume de gás para ser solubilizado e monitorado em níveis detectáveis pelos equipamentos que o quantificam.

Por esses motivos, na presente pesquisa a determinação do coeficiente de reaeração foi feita utilizando equações existentes na literatura, da mesma forma como procederam vários pesquisadores, tais como: Rutherford (1991), quando no estudo da qualidade da água do Rio Tarawera, na Nova Zelândia; Siqueira (1996), na modelagem do Rio Meia Ponte, em Goiás; Cunha et al. (2001), na modelação do oxigênio dissolvido no Ribeirão do Feijão, em São Paulo; McAvoy et al. (2002), na análise da poluição das águas do Rio Balatuin, nas Filipinas; e Araújo et al. (2005), na simulação da qualidade da água do Rio Jaguaribe, no Ceará, dentre outros.

O QUAL2E oferece oito opções para o cálculo de K_2, sendo seis equações preditivas empíricas e semi-empíricas da literatura, conforme pode ser observado na **Tabela 4.5**, e duas opções para valores medidos ou modelos opcionais.

O cálculo do coeficiente de reaeração no QUAL2E é feito em função da temperatura e dos parâmetros hidráulicos. Nesse programa, a hidráulica pode ser modelada de duas maneiras:

(1) com base nos coeficientes de descarga, originados em medições hidráulicas realizadas no próprio rio; ou (2) no coeficiente de Manning para a seção trapezoidal. Barnwell et al. (2004) recomendam que o método escolhido seja o primeiro, pois existe uma elevada margem de erro no cálculo decorrente da estimativa do coeficiente de Manning para a seção trapezoidal, o que pode invalidar as respostas obtidas com a modelagem. É importante, portanto, que o usuário escolha a opção que melhor lhe sirva, em virtude de evitar interpretações equivocadas da situação ambiental do corpo hídrico que estiver sendo modelado.

Tabela 4.5: Equações utilizadas para estimativa do K_2 (SIQUEIRA, 1996).

Autor	Equação no Sistema Internacional de Unidades	Equação no Sistema Inglês de Unidades
O'Connor e Dobbins (1958)	$3,93\frac{U^{0,5}}{H^{1,5}}$	$12,9\frac{U^{0,5}}{H^{1,5}}$
Churchill et al. (1962)	$5,03\frac{U^{0,969}}{H^{1,673}}$	$11,6\frac{U^{0,969}}{H^{1,673}}$
Owens et al. (1964)	$5,34\frac{U^{0,67}}{H^{1,85}}$	$21,7\frac{U^{0,67}}{H^{1,85}}$
Langbein e Durum (1967)	$5,14\frac{U}{H^{1,33}}$	$7,6\frac{U}{H^{1,33}}$
Trackston e Krenkel (1969)	$\frac{24,9\left(1+F^{0,5}\right)u^*}{H}$	$\frac{24,9\left(1+F^{0,5}\right)u^*}{H}$
Tsivoglou e Wallance (1972)	$86400cSU$	$86400cSU$

onde:

U: velocidade média no trecho, (pés/s) ou (m/s);

H: profundidade média no trecho, (pés) ou (m);

S: declividade do trecho, (pés/pés) ou (m/m);

u^*: velocidade de cisalhamento, (pés/s) ou (m/s);

F: Número de Froude, (adimensional);

Q: vazão, ($pés^3/s$) ou (m^3/s); e

g: aceleração da gravidade, ($pés/s^2$) ou (m/s^2).

No Sistema Internacional de Unidades:

c: 0,177 m^{-1} para 0,42 $m^3/s \leq Q \leq 84,96\ m^3/s$.

No sistema Inglês de Unidades:

c: 0,054 pés^{-1} para 15 pés^3/s ≤ Q ≤ 3.000 pés^3/s.

No Rio Araguari utilizou-se o método dos coeficientes de descarga, que são calculados em função da velocidade, da profundidade e da vazão médias de cada seção analisada, de acordo as fórmulas listadas nas **Equações 4.2** e **4.3** (CUNHA e SIQUEIRA, 2001) a seguir.

$$V = aQ^b \quad (\mathbf{4.2})$$

$$H = cQ^d \quad (\mathbf{4.3})$$

onde:
H: profundidade, (m);
V: velocidade, (m/s);
Q: vazão líquida, (m^3/s); e
a, *b*, *c* e *d*: coeficientes de descarga, (adimensionais).

Para a determinação dos coeficientes de descarga, procedeu-se com a medição de vazão em seis seções do Médio Araguari, sendo elas localizadas nos pontos de coleta 3, 6, R3, 11, 15 e 20. Além disso, foram obtidos os dados hidráulicos oriundos da Estação Fluviométrica de Porto Platon, situada no trecho modelado.

É importante salientar que foram utilizadas apenas essas seis seções para a medição de dados hidráulicos com a finalidade de obtenção dos coeficientes de descarga porque foi somente nelas que se conseguiu proceder com a obtenção desses parâmetros durante todas as quatro campanhas realizadas com esse objetivo. Isso ocorreu porque o rio se ramifica muito em alguns trechos, formando ilhas (o que inviabiliza a realização das medições) e, além do mais, na estação seca o acesso a alguns locais se torna difícil devido às baixas vazões, às corredeiras acentuadas em determinadas regiões e à existência de rochas no canal principal do corpo d'água, o que poderia danificar o equipamento de medição de vazão. Dessa maneira, os valores obtidos foram lançados em dois sistemas gráficos bidimensionais (x-y) onde, posteriormente, procedeu-se com os ajustes não-lineares (**Figuras 4.11** a **4.17**).

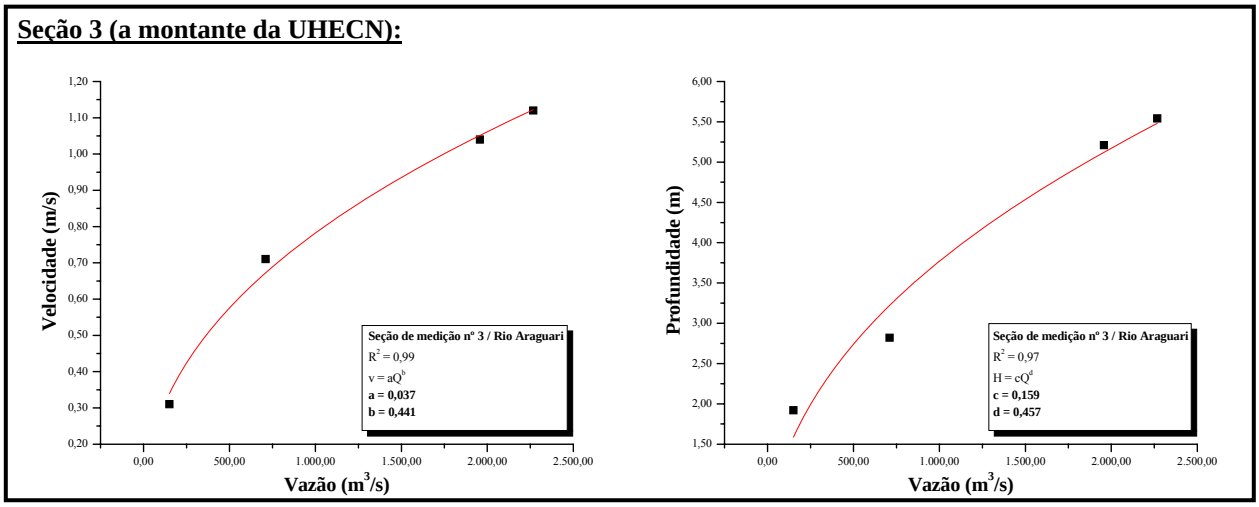


Figura 4.11: Ajuste não-linear para a determinação dos coeficientes de descarga para a Seção 3.

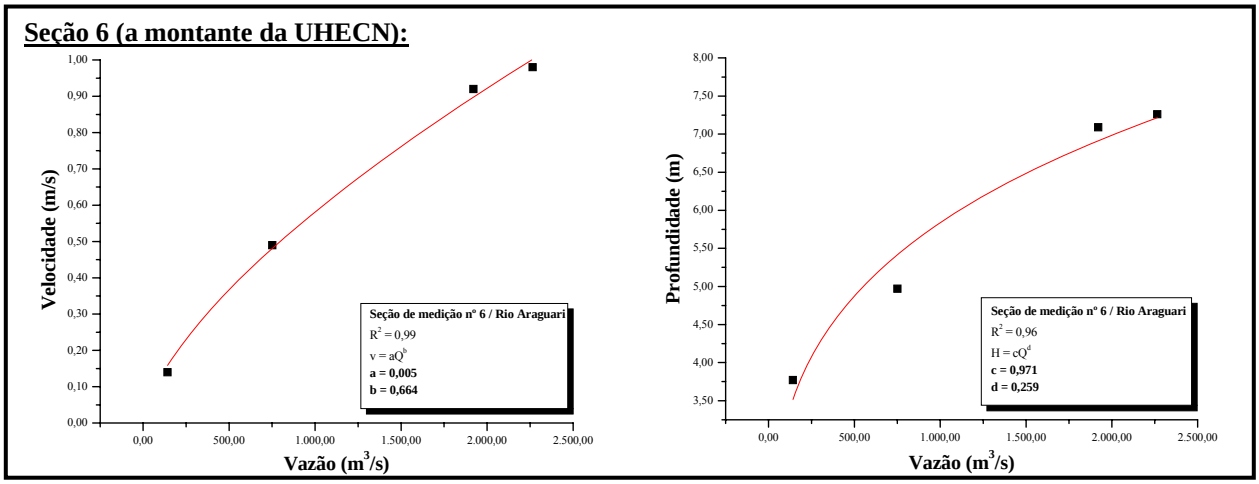


Figura 4.12: Ajuste não-linear para a determinação dos coeficientes de descarga para a Seção 6.

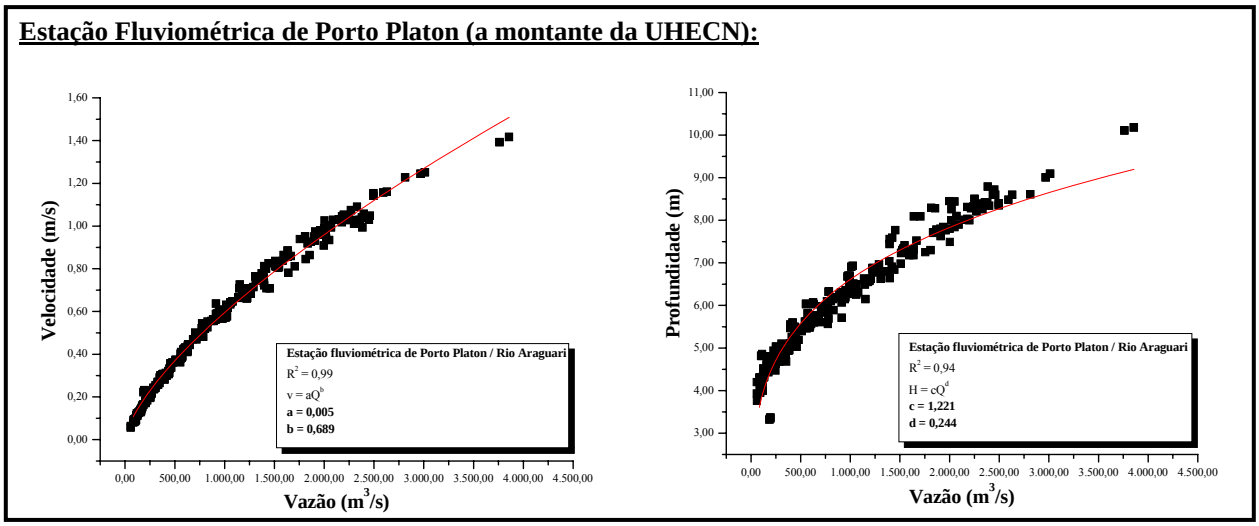


Figura 4.13: Ajuste não-linear para a determinação dos coeficientes de descarga para a Estação Fluviométrica de Porto Platon.

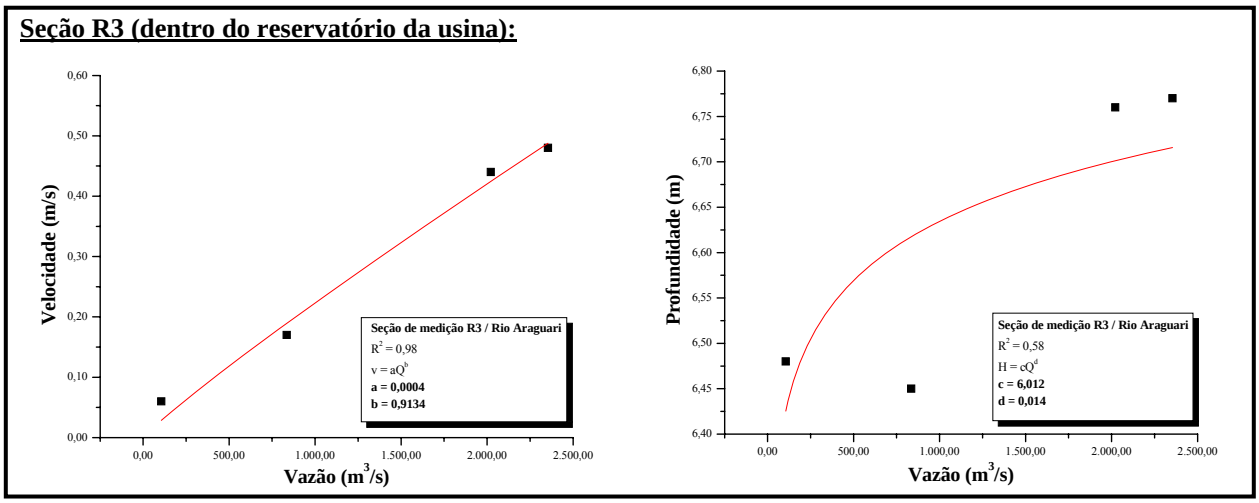


Figura 4.14: Ajuste não-linear para a determinação dos coeficientes de descarga para a Seção R3.

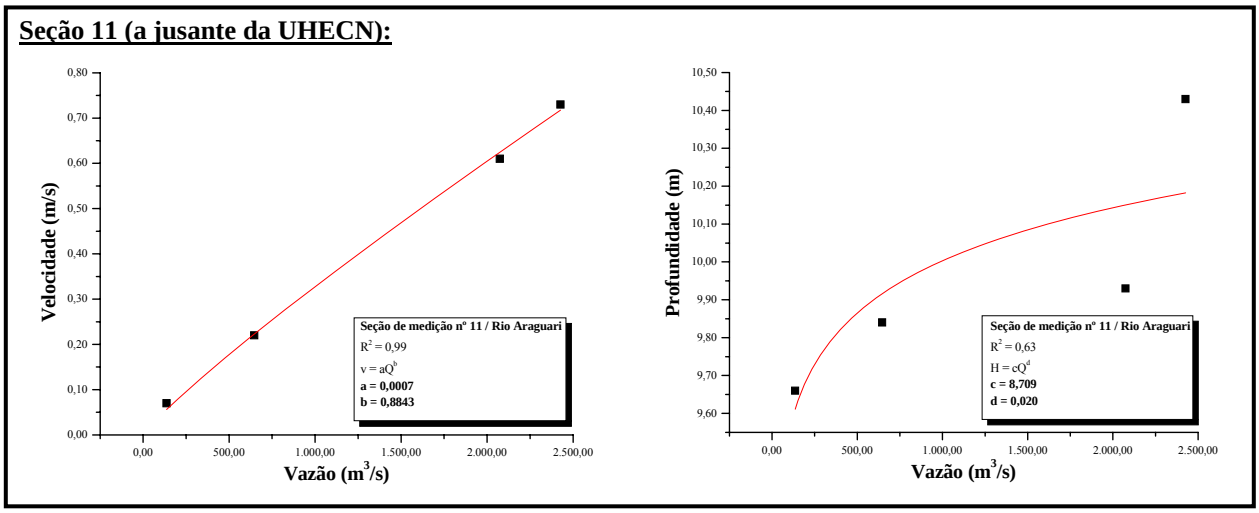


Figura 4.15: Ajuste não-linear para a determinação dos coeficientes de descarga para a Seção 11.

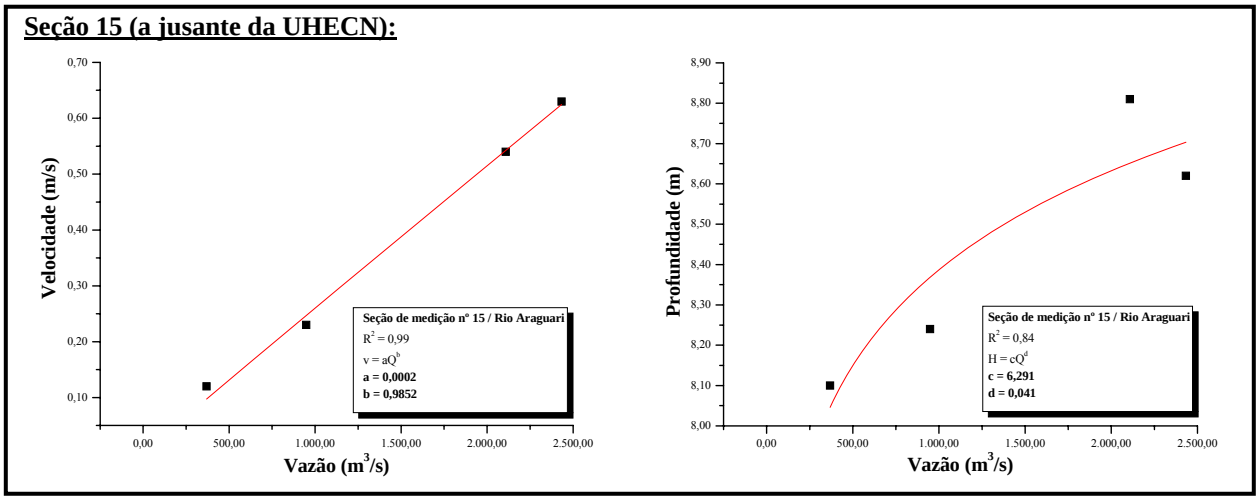


Figura 4.16: Ajuste não-linear para a determinação dos coeficientes de descarga para a Seção 15.

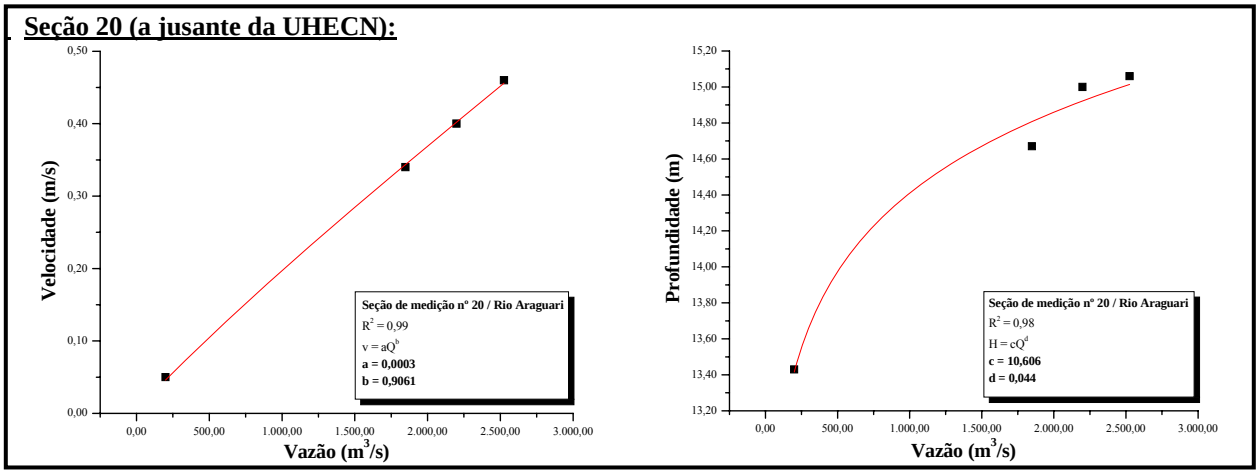


Figura 4.17: Ajuste não-linear para a determinação dos coeficientes de descarga para a Seção 20.

É importante salientar que Cunha (2000) já havia procedido com a determinação desses mesmos coeficientes para a Seção da Estação Fluviométrica de Porto Platon, cujos valores obtidos foram muito próximos aos agora obtidos para a mesma seção. Segundo tal autor, os valores de a, b, c e d foram, respectivamente: 0,003; 0,762; 1,441 e 0,218.

Determinando-se os coeficientes de descarga, conforme esquema da **Figura 4.18**, os quais foram incorporados ao modelo por ocasião da simulação computacional, utilizaram-se as seis equações da literatura listadas na Tabela 4.5 (apresentada anteriormente), para plotar os gráficos de K_2, os quais podem ser visualizados nas **Figuras 4.19** a **4.22**.

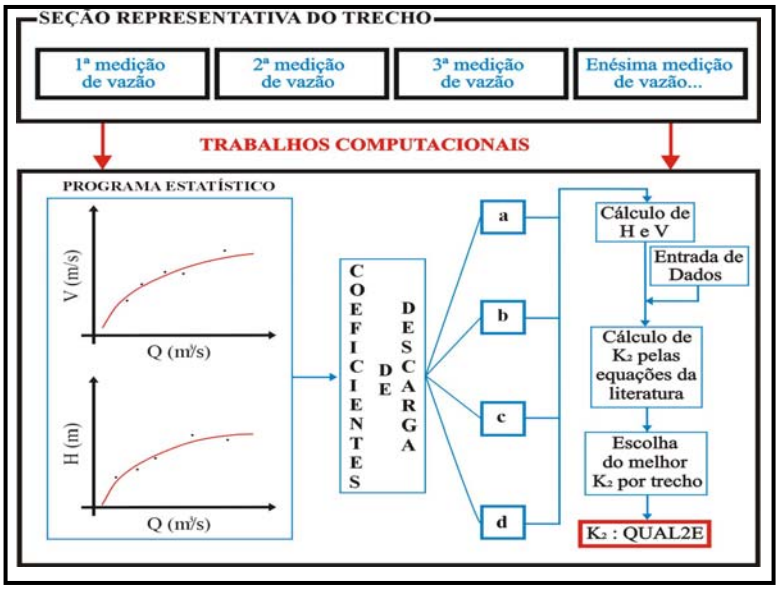


Figura 4.18: Esquema de obtenção dos valores de K_2 (CUNHA et al., 2001 - com adaptações).

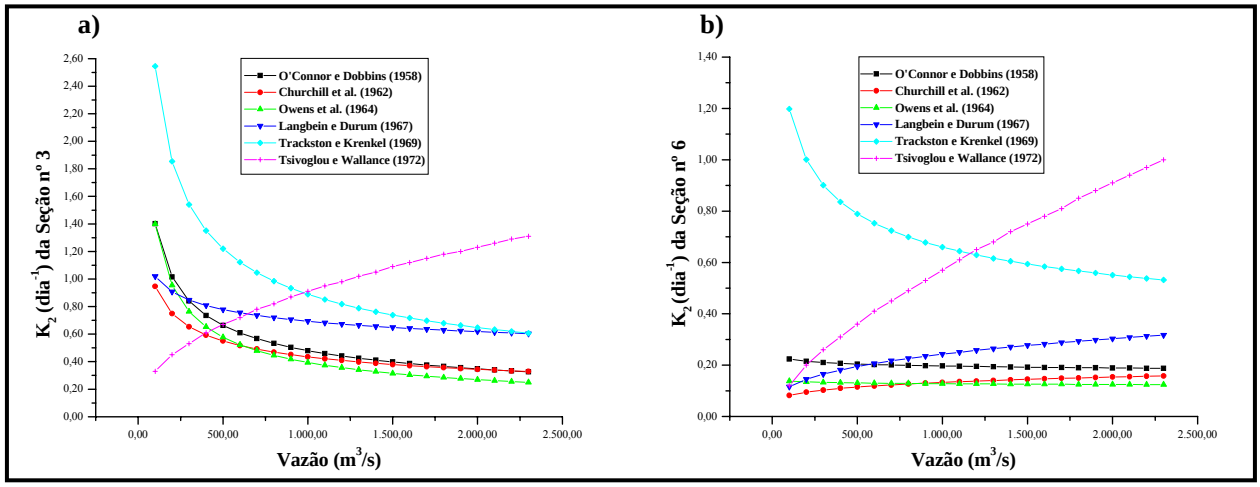


Figura 4.19: a) Gráfico de K_2 na Seção 3 (a montante da UHECN); **b)** Gráfico de K_2 na Seção 6 (a montante da UHECN).

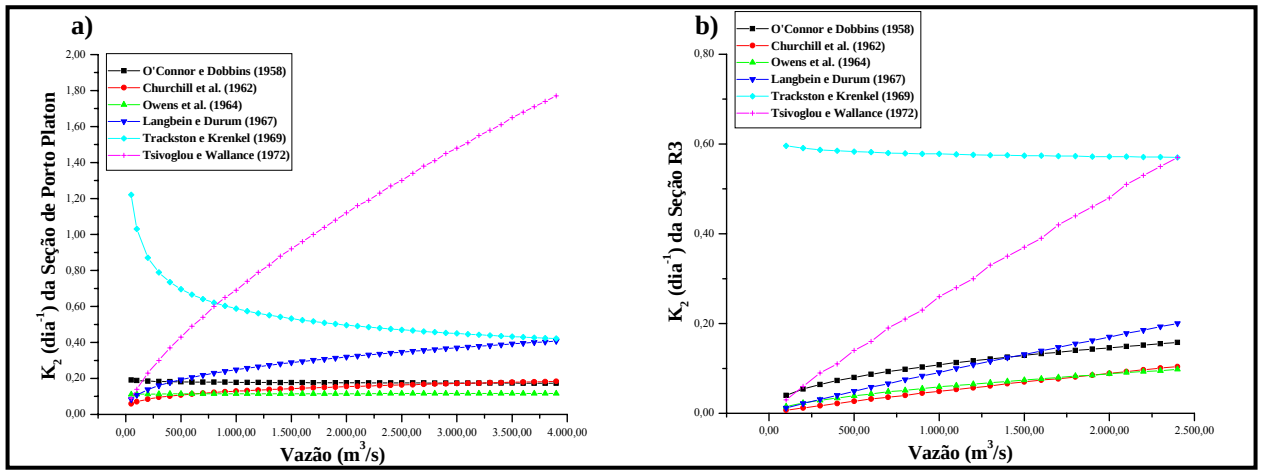


Figura 4.20: a) Gráfico de K_2 na Seção de Porto Platon (a montante da UHECN); **b)** Gráfico de K_2 na Seção R3 (dentro do reservatório da usina).

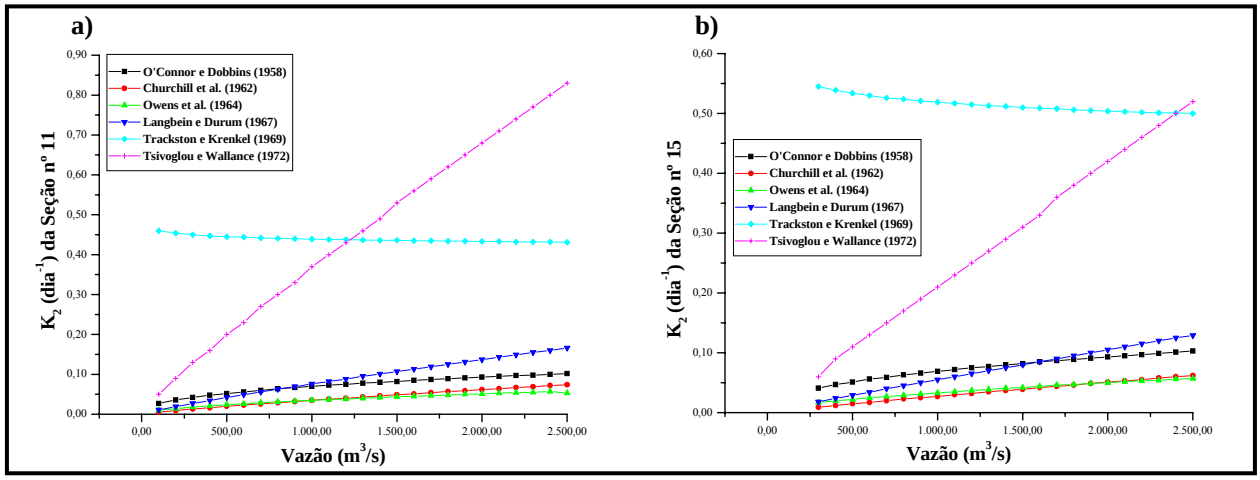


Figura 4.21: a) Gráfico de K_2 na Seção 11 (a jusante da UHECN); **b)** Gráfico de K_2 na Seção 15 (a jusante da UHECN).

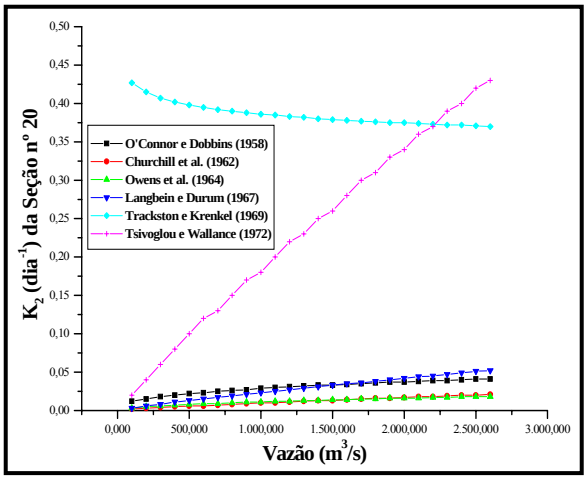


Figura 4.22: Gráfico de K_2 na Seção 20 (a jusante da UHECN).

Assim, para a modelagem ora realizada optou-se, em todos os trechos, pela equação de O'Connor e Dobbins. Essa escolha levou em conta os seguintes fatores:

- Todas as equações foram desenvolvidas para rios específicos e, dentre elas, a de O'Connor e Dobbins foi a única elaborada para um curso hídrico com velocidade de 0,15 m/s a 0,50 m/s e profundidade de 0,30 m a 9,10 m, detentor, portanto, de características hidráulicas parecidas com as do Rio Araguari.
- Quando na plotagem dos gráficos dos coeficientes de reaeração, ilustrados nas **Figuras 4.19** a **4.22**, foi a equação que, em geral, permaneceu localizada na região mediana das variações dos valores encontrados, não tendo apresentado tendências gerais que sub ou superestimaram o K_2.

O que se pôde perceber com esses gráficos é que para o trecho do Médio Araguari, de maneira geral, ocorre uma pequena faixa de reaeração. As equações de Trackston e Krenkel e de Tsivoglou e Wallance apresentaram, na maioria das seções de medição, valores de K_2 discrepantes, chegando a alcançar, em relação às demais fórmulas, diferenças de até 42 vezes.

Apesar do fato da Seção 3 ter apresentado uma faixa de variação considerável de K_2, nas demais seções analisadas as fórmulas da literatura demonstraram, de maneira geral, que esse coeficiente possui um comportamento bem mais homogêneo ao longo do rio. Outra observação

que pode ser feita é que o aumento da vazão não provocou alterações marcantes nos valores dos coeficientes de reaeração obtidos.

4.2.2.1 Séries históricas

As séries históricas da Estação Fluviométrica de Porto Platon, a única existente e em operação na região estudada, foram obtidas no Sistema de Informações Hidrológicas da ANA. Essa estação encontra-se em funcionamento desde janeiro de 1953, contando, até novembro de 2005, quando foram plotados os gráficos dos coeficientes de descarga, com 637 medições.

4.2.3 Parâmetros de qualidade da água

Nessa pesquisa foram realizadas análises laboratoriais e medições de campo dos parâmetros de qualidade da água listados na **Tabela 4.6**, os quais foram comparados com a Resolução 357/2005 do CONAMA.

Tabela 4.6: Resumo das análises realizadas para obtenção dos dados de qualidade da água do Rio Araguari.

Parâmetro	Método Analítico Utilizado/Equipamento	Local de Realização da Análise
Temperatura	Aparelho Multisonda Horiba U-10	*In loco*
Transparência	Disco de Secchi	*In loco*
Potencial Hidrogeniônico	Aparelho Multisonda Horiba U-10	*In loco*
Oxigênio Dissolvido	Método de Winkler / Método Eletroquímico	CAESA/*In loco*
Demanda Bioquímica de Oxigênio	Método de Winkler	CAESA
Coliformes Termotolerantes	Técnica dos Tubos Múltiplos em Meio A_1	SEMA/AP
Condutividade e Nitrato	Aparelho Multisonda Horiba U-10	*In loco*
Sólidos Totais e Sólidos Suspensos	*Standard Methods of Water and Wastewater* - SMEWW	SEMA/AP
Amônia	Nitrogênio Amoniacal - 0 a 2,50 mg/L NH_3-N - Método 8038 (Nessler Method, adaptado do SMEWW)	CAESA
Cloreto	Método de Mohr	SEMA/AP

Para a realização das análises, foram feitas parcerias com os órgãos CAESA, SEMA/AP, IEPA e ELETRONORTE. As amostras de água cujas análises não podiam ser executadas em campo foram coletadas de maneira adequada e acondicionadas em recipientes térmicos exclusivos, de acordo com o especificado pelo SMEWW (1992), objetivando a preservação das mesmas até a chegada aos respectivos laboratórios. As expedições de campo permitiram a obtenção de dados de entrada no QUAL2E e a caracterização do atual estado da qualidade da água no médio curso do Rio Araguari da seguinte maneira:

- Espacialmente: observou-se a concentração dos parâmetros de qualidade da água ao longo de 23 pontos de coleta, verificando, também, a interferência da UHECN na qualidade da água desse rio.
- Sazonalmente: a análise sazonal objetivou verificar as diferenças nas concentrações dos parâmetros de qualidade da água nas principais estações do ano, inverno e verão, durante um período de 1,5 ano, compreendido entre novembro/2004 e maio/2006.

Alguns parâmetros de qualidade da água foram medidos com aparelhos portáteis, tais como o Oxímetro MO/845 e a Multisonda Horiba U-10. Essa última, por sua vez, é uma sonda eletroquímica capaz de quantificar, ao mesmo tempo, vários parâmetros de qualidade da água, sendo que sua calibração é feita constantemente pelos técnicos do IEPA. As **Figuras 4.23** a **4.25** ilustram alguns aspectos gerais das coletas de campo e das análises laboratoriais realizadas.

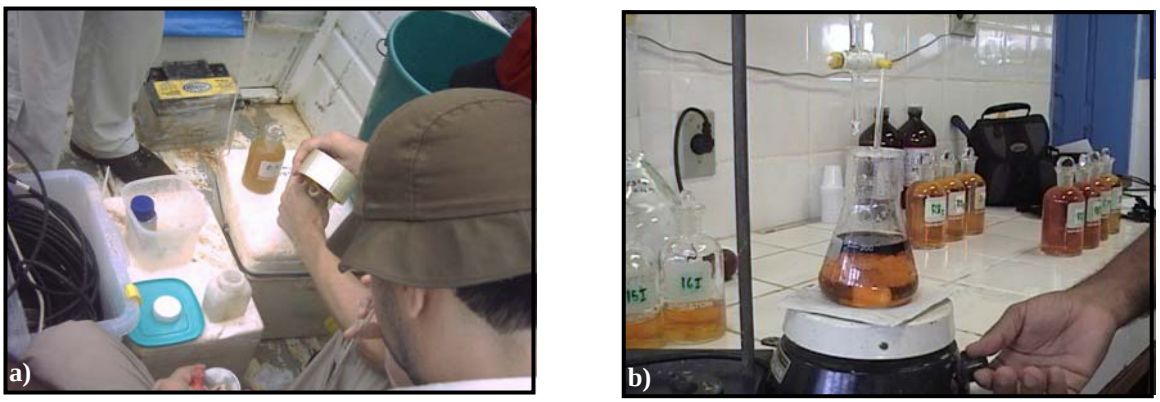


Figura 4.23: a) Momento da vedação do frasco de Winkler com o oxigênio dissolvido fixado; **b)** Titulação do oxigênio dissolvido no laboratório da CAESA: início da análise laboratorial de oxigênio dissolvido conforme o Método de Winkler (Imagens obtidas durante a 2ª Coleta, em maio/2005).

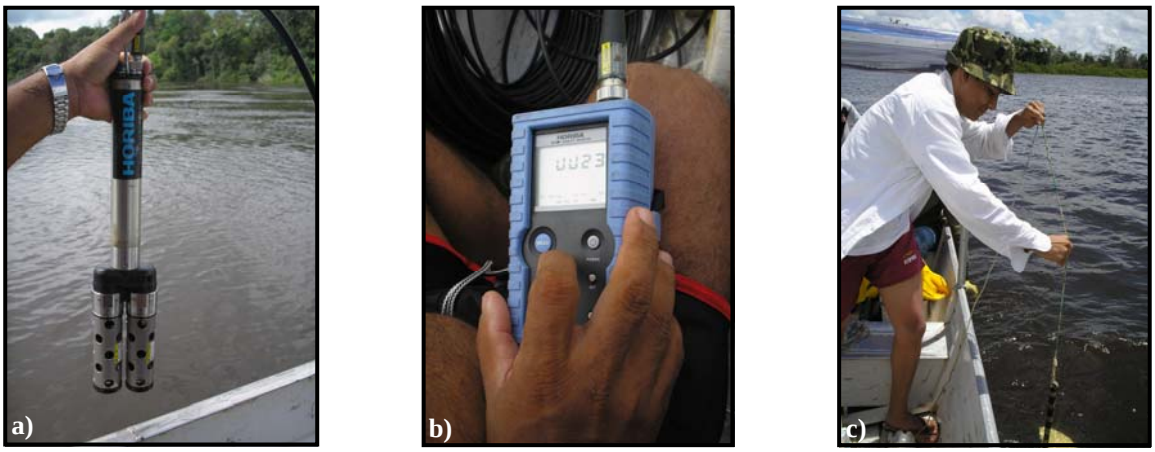


Figura 4.24: a) e **b)** Leitura de parâmetros de qualidade da água na Multisonda Horiba U-10; **c)** Medição de transparência com o Disco de Secchi (Imagens obtidas durante as três últimas expedições de campo: novembro/2005, março e maio/2006).

Figura 4.25: a) e **b)** Frascos de oxigênio dissolvido sendo preparados para a titulação; **c)** Amostras de água para realização da análise de amônia (Imagens obtidas durante a 5ª Coleta: maio/2006).

4.2.3.1 Oxigênio dissolvido

Atualmente, são dois os métodos mais utilizados para detecção do oxigênio dissolvido na água: o Eletroquímico e o de Winkler (ou Iodométrico). O primeiro se baseia na taxa de difusão molecular do oxigênio através da membrana de um eletrodo; o segundo, na propriedade de oxidação do OD (SIQUEIRA, 1996). Nessa pesquisa foram utilizados os dois métodos; entretanto, no que tange ao Eletroquímico, devido a um conjunto de imprevistos logísticos, tais como indisponibilidade e manutenção de equipamentos, foi necessário que se fizesse uso, durante as cinco expedições de campo, de três oxímetros diferentes, apesar de não ser essa a intenção inicial. Aliado a isso, só foi possível determinar a curva de calibração, ilustrada na **Figura 4.26**, do primeiro equipamento (que era de posse da Universidade Federal de Goiás - UFG), uma vez que os demais aparelhos estavam disponíveis apenas no último instante, o que

não possibilitava a realização da metodologia de calibração antes da saída para o campo. Dessa maneira, os oxímetros utilizados foram:

- Oxímetro da UFG (Handylab OX1, da marca SCHOTT): Utilizado durante a 1ª Coleta.
- Oxímetro da ELETRONORTE (AT/140, da marca ALFAKIT): Utilizado durante a 2ª Coleta.
- Oxímetro da SEMA/AP (MO/845, da marca INSTRUTEMP): Utilizado durante as três últimas coletas.'

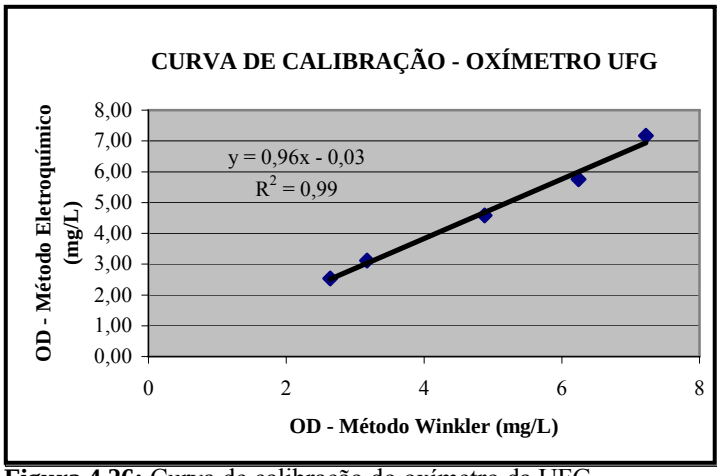


Figura 4.26: Curva de calibração do oxímetro da UFG.

No que diz respeito à **Figura 4.26**, o que se percebeu é que o ajuste entre os dois métodos foi bastante coerente. Todavia, após a obtenção final dos dados de oxigênio dissolvido das quatro últimas coletas de campo, fornecidos pela CAESA, foi observada uma certa incoerência dos mesmos. Muitos deles se apresentaram acima da concentração de saturação (Cs) calculada para o Rio Araguari tomando-se por base a temperatura da água e a pressão atmosférica.

Por esses motivos optou-se, para fins do presente estudo, pelos valores de OD medidos com as sondas eletroquímicas, uma vez que eles se mostraram mais coerentes que os dados obtidos pelo Método Iodométrico, mesmo ocorrendo, em algumas seções, a superação da faixa de saturação de oxigênio; porém, em menor proporção que os dados obtidos pelo Método

de Winkler. Contudo, na primeira coleta, as medições de OD feitas com a sonda eletroquímica se apresentaram bem coerentes com o método realizado no laboratório da CAESA.

As **Figuras 4.27** a **4.29** ilustram os gráficos onde foram plotados os valores de oxigênio dissolvido medidos pelos dois métodos mencionados, juntamente com as respectivas concentrações de saturação obtidas em cada coleta. A metodologia de cálculo das concentrações de saturação se encontra descrita no item a seguir. As medições de OD da primeira coleta realizadas com as sondas eletroquímicas, em geral, foram bastante coerentes com o Método de Winkler, o que não se verificou nas demais campanhas de campo.

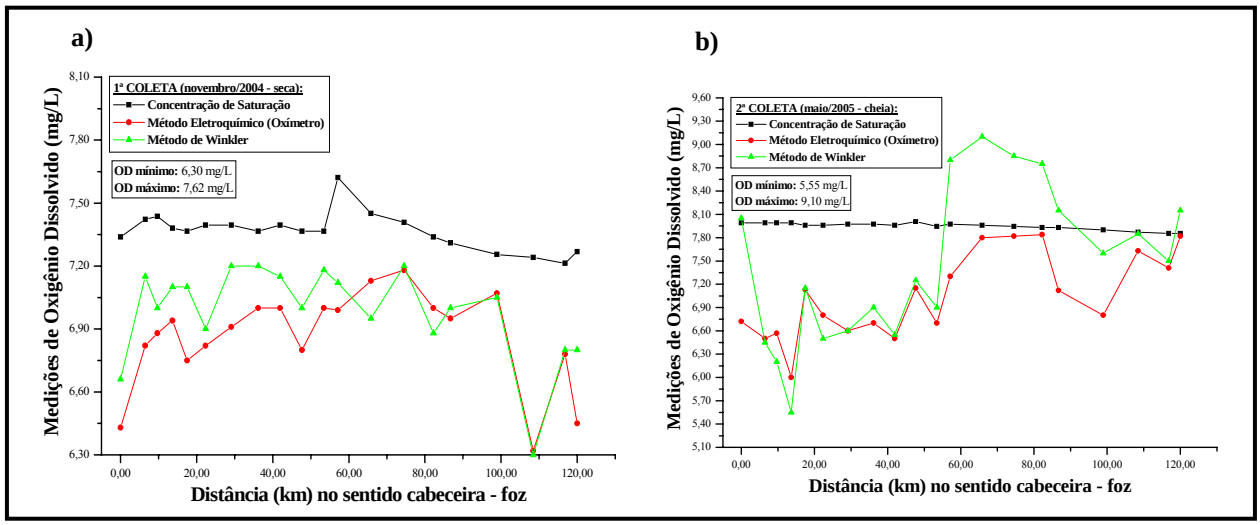


Figura 4.27: Valores de oxigênio dissolvido: concentração de saturação, Método Eletroquímico e Método de Winkler: **a)** 1ª Coleta (novembro/2004); **b)** 2ª Coleta (maio/2005).

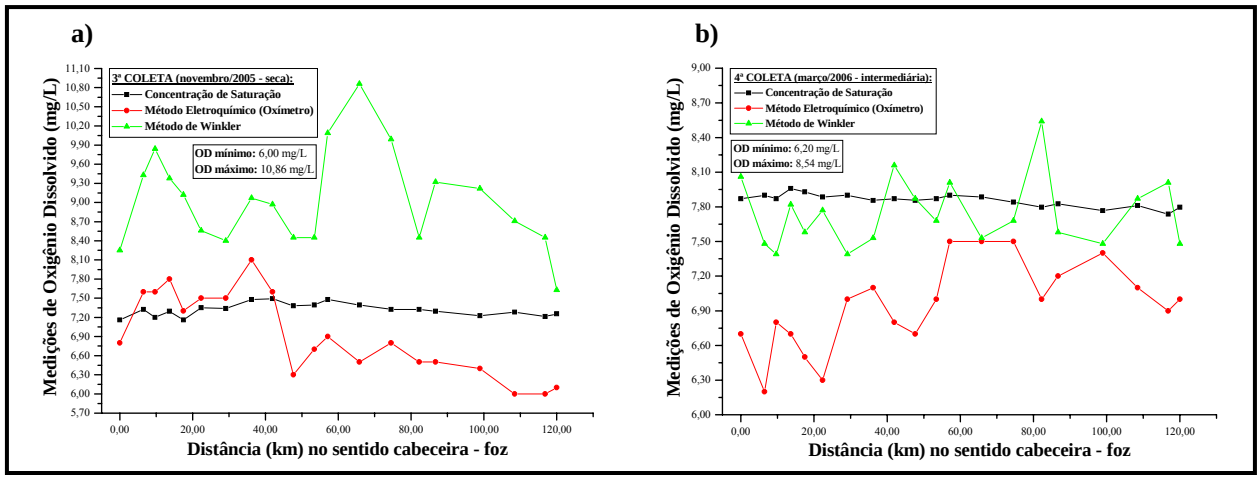


Figura 4.28: Valores de oxigênio dissolvido: concentração de saturação, Método Eletroquímico e Método de Winkler: **a)** 3ª Coleta (novembro/2005); **b)** 4ª Coleta (março/2006).

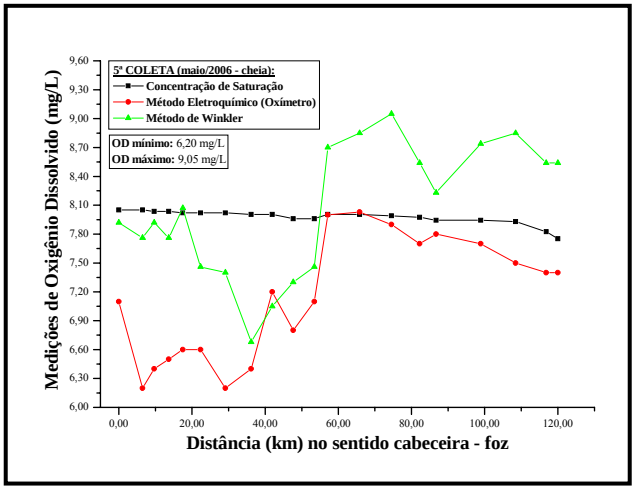


Figura 4.29: Valores de oxigênio dissolvido: concentração de saturação, Método Eletroquímico e Método de Winkler: 5ª Coleta (maio/2006).

Tal incoerência experimental pode ter ocorrido devido aos seguintes fatores:

- As titulações podem ter sido feitas por técnicos diferentes, o que provavelmente causou um erro humano na leitura dos valores de oxigênio dissolvido.
- Erros durante a preparação das soluções.
- Os reagentes utilizados pelos técnicos podem estar vencidos ou em concentrações diferentes das desejadas.

Na modelagem a que se propôs essa pesquisa, foram utilizados os valores de oxigênio dissolvido (detectados pelos oxímetros), da seguinte maneira: OD mínimo: menores valores medidos em cada ponto durante as cinco coletas; OD máximo: maiores dados medidos em cada ponto dentre as cinco coletas; e OD médio: média aritmética entre o OD mínimo e OD máximo.

4.2.3.1.1 Concentração de saturação de oxigênio dissolvido

A concentração de oxigênio na água é influenciada, basicamente, por três fatores: pressão atmosférica, salinidade e temperatura da água. Quando o valor de OD presente no meio aquático atinge sua concentração máxima, é dito, então, que a água está saturada desse gás.

Como no Rio Araguari as medições de salinidade não acusaram leitura, o efeito desse parâmetro foi desconsiderado. Dessa maneira, utilizando a **Equação 4.4** (TUCCI, 1998), procedeu-se com o cálculo da Cs.

$$C_S = 14{,}652 - 0{,}41022T + 0{,}00799T^2 - 0{,}000077774T^3 \quad (\mathbf{4.4})$$

onde:
Cs: concentração de saturação de oxigênio dissolvido, (mg/L); e
T: temperatura, (ºC).

Após a obtenção das concentrações de saturação pela **Equação 4.4**, os valores foram corrigidos para a pressão atmosférica local por meio da **Equação 4.5** (TUCCI, 1998).

$$C_S = C_{S'}P \quad (\mathbf{4.5})$$

onde:
$C_{S'}$: concentração de saturação de oxigênio dissolvido conforme as condições locais, (mg/L); e
P: pressão atmosférica local, (mbar).

4.2.4 Coeficiente de dispersão longitudinal

Segundo Barbosa (1997), a dispersão longitudinal é o processo físico responsável pelo espalhamento de um poluente na água, sendo que o mesmo é influenciado, principalmente, pela velocidade do fluído. De acordo com Pereira e Teixeira (1999) e Mendonça et al. (2005), os resultados do modelo QUAL2E são pouco sensíveis ao coeficiente de dispersão longitudinal (E_L). Nesse trabalho, o E_L foi calculado utilizando a **Equação 4.6** (BARBOSA, 1997), onde se obteve um valor de 31, o qual foi utilizado para todos os trechos.

$$\frac{E_L}{uh} = \alpha \quad (\mathbf{4.6})$$

onde:

u: velocidade média da água, (m/s);

h: profundidade média do canal, (m); e

α: coeficiente, (adimensional).

4.2.5 Dados hidráulicos

Para a determinação dos valores dos parâmetros hidráulicos do trecho analisado do Rio Araguari, foram realizadas medições de campo conjuntamente com as campanhas de coleta de dados de qualidade da água. Para tanto, utilizou-se um Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), ou seja, Perfilador Doppler-Acústico de Corrente, ilustrado na **Figura 4.30**. O ADCP é mundialmente conhecido no meio hidrológico como o mais adequado para medições de descarga em grandes rios, sendo capaz de medir vazões em tempo real.

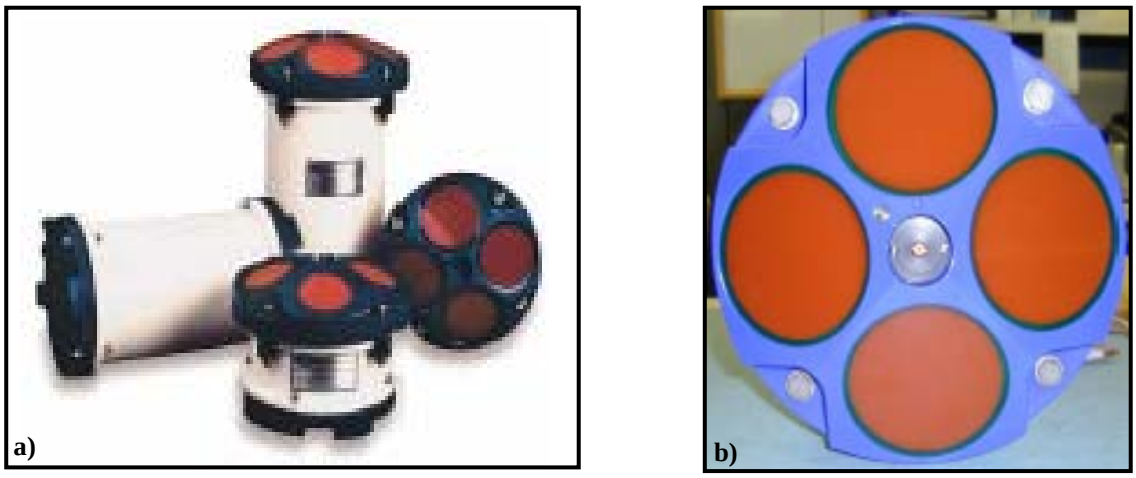


Figura 4.30: a) Alguns modelos de Acoustic Doppler Current Profiler existentes atualmente; **b)** Detalhe das células tradutoras do ADCP (Rdinstruments, 2005).

O equipamento é composto por uma sonda conectada a quatro tradutores, além de um "*deck box*", que tem a função de filtrar os sinais e repassá-los para um microcomputador dotado de um *software* específico, o *WinRiver Mode*, conforme pode ser visualizado na **Figura 4.31**. O *software* coordena as ações de todo o sistema, recebendo os dados e disponibilizando-os para o usuário em forma de gráficos, tabelas e outros.

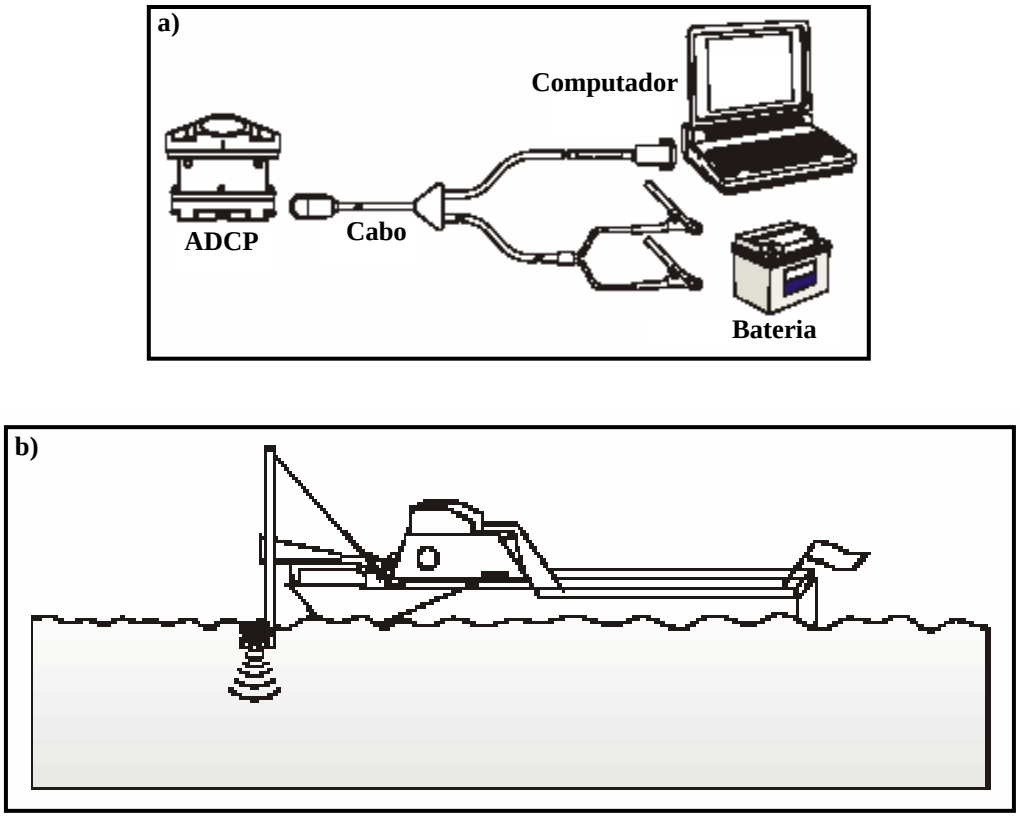


Figura 4.31: a) Esquema das conexões para funcionamento do ADCP; **b)** Uma forma de acoplamento do ADCP à embarcação (Rdinstruments, 2005).

O funcionamento do ADCP se baseia na emissão de ondas sonoras pré-estabelecidas, com freqüências de 75, 300, 600 ou 1200 kHz. O equipamento é capaz de medir seu deslocamento e altura da lâmina d'água em relação ao fundo do rio, traçando um contorno de intensidade de eco do som rebatido pelo material em suspensão na água nas diferentes profundidades do canal, o que possibilita com que o mesmo construa um perfil vertical da coluna hídrica, oportunamente ilustrado na **Figura 4.32**.

O constante movimento das partículas presentes no meio aquático provoca variações na freqüência do eco (efeito Doppler); então, o ADCP mede essas variações como uma função da profundidade, o que possibilita obter a velocidade da corrente em até 128 posições diferentes na coluna d'água. Além disso, esse equipamento registra algumas informações adicionais, tais como temperatura da água, posicionamento e oscilações da embarcação, horários das medições e outras (FILIZOLA et al., 1999).

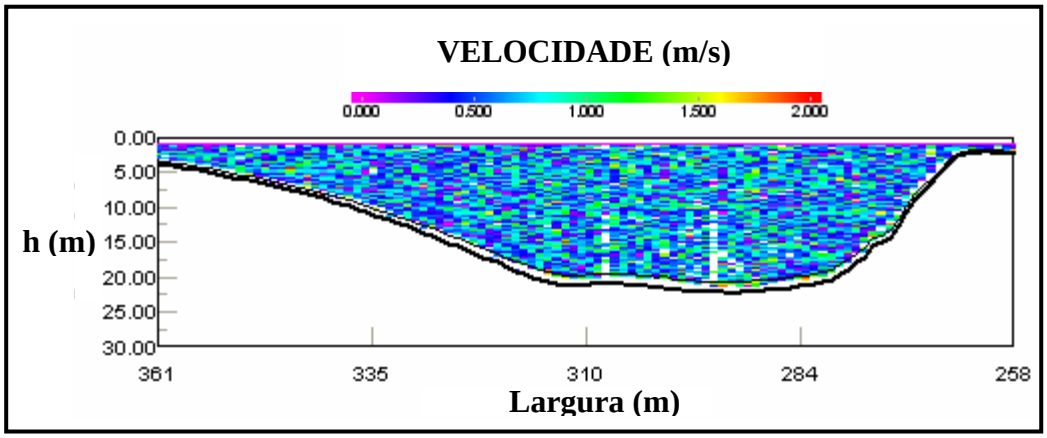


Figura 4.32: Gráfico de saída do programa *WinRiver Mode*.

Nessa pesquisa utilizou-se um ADCP com freqüência de 600 kHz. O mesmo foi acoplado a uma estrutura devidamente conectada ao barco. As medições foram feitas em seis seções de medição (também chamadas, nesse trabalho, de seções transversais), sendo elas: 3, 6, R3, 11, 15 e 20. As medições de vazão eram feitas no mínimo três vezes em cada seção, calculando-se, posteriormente, a média aritmética dos dados obtidos.

A **Figura 4.33** apresenta um "resumo esquemático ilustrado" das seis seções analisadas, objetivando mostrar as imagens do ADCP em funcionamento e algumas das saídas gráficas das seis seções transversais medidas com o auxílio do programa *WinRiver Mode*. É importante ressaltar que foi utilizada como dado de entrada no QUAL2E a vazão oriunda da média entre cheia e seca.

4.2.6 Dados climatológicos e geográficos

Os dados climatológicos e geográficos utilizados nesse estudo encontram-se listados na **Tabela 4.7**. Esses valores foram obtidos de três fontes diferentes: do PROVAM (1990); de medições em campo; e do Modelo Regional MESO ETA. Quando não era possível obter os parâmetros climáticos de nenhuma dessas fontes, optou-se pelos valores usuais estabelecidos no manual do QUAL2E. É importante ressaltar que os parâmetros ligados ao clima não influenciam consideravelmente o modelo ora utilizado (ARAÚJO et al., 2005).

FIGURA 4.33 (VIDE ARQUIVO EM ANEXO AO CD ROOM).

Tabela 4.7: Caracterização dos dados climatológicos e geográficos.

Tipo	Faixa*	Valor Usual*	Valor Utilizado	Unidade	Tipo	Faixa*	Valor Usual*	Valor Utilizado	Unidade
Latitude	0 a 90	23	0	Graus	Coeficiente de Atenuação de Poeira BE	$3,2*10^{-6}$ a $5,5*10^{-6}$	$3,2*10^{-6}$	$3,2*10^{-6}$	(m/hr)/mbar-m/s
Longitude	0 a 180	43	52	Graus	Temperatura de Tempo Seco	2 a 50	15	31	ºC
Meridiano Padrão	0 a 180	75	75	Graus	Temperatura de Tempo Úmido	2 a 55	20	22	ºC
Elevação da Bacia	(-120) a 3650	1.000	40	m	Cobertura de Nuvem	0 a 1	0	0	-
Coeficiente de Atenuação de Poeira	0,01 a 0,13	0,06	0,06	-	Pressão Barométrica	900 a 1.100	1.017	1.017	mbar
Coeficiente de Evaporação AE	$5*10^{-6}$ a $62*10^{-6}$	$94*10^{-6}$	$94*10^{-6}$	(m/hr)mbar	Velocidade do Vento	0 a 36	0	5	m/s

*: Valores obtidos de Rodrigues (2005).

A **Figura 4.34** ilustra as medições da temperatura do ar feitas na 1ª e 3ª Coletas.

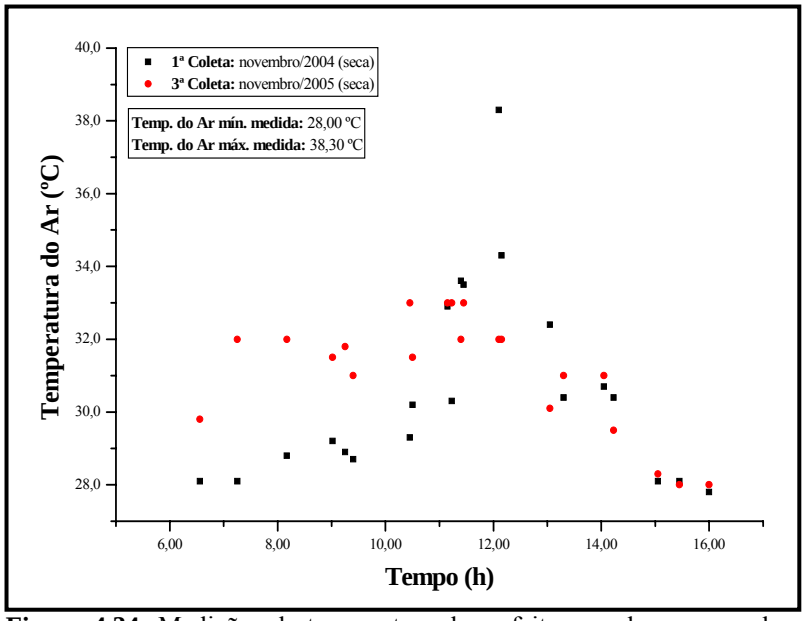


Figura 4.34: Medições da temperatura do ar feitas em duas campanhas de coleta de dados no Rio Araguari.

É possível notar um claro aumento da temperatura entre as 10 e as 13 horas, no momento do dia em que ocorre a maior incidência solar na região. Os valores obtidos ficaram compreendidos entre 28,00 ºC e 38,30 ºC, ambos detectados durante a 1ª Coleta, em novembro do ano de 2004. Percebe-se que há uma variação acentuada desse parâmetro nas diferentes estações do ano.

4.2.7 Nitrogênio orgânico e nitrito

Os parâmetros de amônia e nitrato foram quantificados durante as pesquisas de campo, conforme descrito nesse mesmo capítulo. Todavia, não foi possível realizar as análises de nitrito e nitrogênio orgânico. Dessa maneira, foi necessário estimar, com base na literatura, esses dois parâmetros.

No que diz respeito ao nitrito, segundo levantamento realizado por Viana (2002), os Rios Jamari e Candeias, ambos localizados no Estado de Rondônia, apresentaram, respectivamente, valores de NO_2 de 1,27% e 1,01% do total de nitrato encontrado em suas águas. Como esses corpos hídricos são rios também situados na Floresta Amazônica, adotou-se, para o Rio Araguari, uma porcentagem de nitrito de 1,14% (média entre os dois valores obtidos pelo mencionado autor) do total de nitrato.

Em se tratando do nitrogênio orgânico, a estimativa dos valores se baseou em outros autores. De acordo com Metcalf e Eddy (1991), a quantidade de proteínas que compõem a parcela orgânica de águas residuárias varia de 40% a 60%. Todavia, Oliveira e Calijuri (1996), afirmam que nos Rios Itaqueri e Lobo, ambos localizados no Estado de São Paulo, a porcentagem de matéria orgânica é de cerca de 32,07% da parcela biodegradável total. Entretanto, como a ANA (2005) esclarece que os rios da Região Hidrográfica Amazônica são ricos em matéria orgânica, nessa pesquisa utilizou-se 35% do valor da média da DBO5/20 das cinco campanhas de campo para estimar as concentrações de nitrogênio orgânico do Rio Araguari.

4.2.8 Demais dados utilizados na modelagem do Rio Araguari

Os demais dados de entrada utilizados no modelo QUAL2E, listados na **Tabela 4.8**, foram oriundos do seu manual de operação e da literatura em geral, uma vez que não foi possível obtê-los *in loco* ou com base em outras pesquisas dessa natureza realizadas no Brasil.

Tabela 4.8: Variáveis utilizadas como dados de entrada no modelo QUAL2E para o Rio Araguari.

Variável	Faixa*	Valor Usual*	Valor Utilizado	Unidade
Coeficiente de Manning	0,001 a 0,10	0,02	0,02	-
Consumo de OD pela Oxidação da Amônia	3,00 a 3,50	3,43	3,43	mg O_2/mg N - NH_3
Consumo de OD pela Oxidação do Nitrito	1,00 a 1,20	1,14	1,14	mg O_2/mg N - NH_3
Coeficiente de Inibição da Nitrificação	0 a 10,00	10,00	10,00	-
Coeficiente de Inibição da DBO5/20 para L	-	0,23	0,23	-
Decaimento da DBO	0 a 10,00	0	0	d^{-1}
Sedimentação da DBO	0 a 10,00	0	0	d^{-1}
Taxa de Consumo de OD pelo Sedimento (Demanda Bentônica)	0 a 10,00	0	0,07	g/m^2 - d
Taxa de Hidrólise do N - Orgânico	0 a 10,00	0	5,20	d^{-1}
Sedimentação do N - Orgânico	0 a 10,00	0	1,00	d^{-1}
Oxidação da Amônia	0 a 10,00	0	0,86	d^{-1}
Oxidação do Nitrito	-	2,00	2,00	d^{-1}
Coeficiente de Reaeração ADAM da Barragem	0,65 a 1,80	-	1,80	-
Coeficiente de Reaeração BDAM da Barragem	0,05 a 1,05	1,80	1,05	-

*****: Valores obtidos de Rodrigues (2005).

O valor utilizado para a Taxa de Consumo de OD pelo Sedimento, ou seja, Demanda Bentônica, foi obtido do livro de coeficientes cinéticos da EPA (1985), que esclarece que para rios como o Araguari, localizados em regiões onde a predominância é de solos minerais, o valor médio desse parâmetro é de 0,07 g/m^2 - d.

Realizou-se uma ampla pesquisa bibliográfica que objetivou descobrir uma referência científica sobre a Taxa de Hidrólise do Nitrogênio Orgânico de algum rio brasileiro; contudo, não foi obtido sucesso nesse sentido. Apesar disso, descobriu-se que McAvoy et al. (2002) utilizaram, para o Rio Balatuin (Filipinas), uma taxa de 5,20 d^{-1}, a qual também foi adotada nesse estudo.

Os dados de Sedimentação do Nitrogênio Orgânico, Oxidação da Amônia (que, segundo pesquisas realizadas em vários rios do mundo e listadas pela USEPA, os valores variam de zero a 9 d^{-1}), e Oxidação do Nitrito (cujo qual, de acordo com a USEPA, varia entre 0,10 d^{-1} a 6,60 d^{-1}), foram obtidos com base em Ning et al. (2001), que realizaram pesquisas no Rio Kao-Ping, situado em Taiwan. Esses valores foram, respectivamente: 1,00 d^{-1}, 0,86 d^{-1} e 2,00 d^{-1}, sendo os mesmos utilizados na modelagem do Rio Araguari.

Apesar das mencionadas taxas não terem sido oriundas de pesquisas realizadas em rios brasileiros, essas foram as únicas referências encontradas pelo autor para estimar tais variáveis.

4.3 Análise da Sensibilidade

Na análise de sensibilidade o usuário identifica, tomando por base um parâmetro de saída do modelo, as variáveis de entrada a serem perturbadas, especificando a magnitude da variação em cada uma delas. Nesse estudo, procedeu-se com a análise de sensibilidade de todos os parâmetros utilizados, variando os mesmos em 10%, objetivando verificar a quais deles o modelo era mais sensível no que diz respeito ao oxigênio dissolvido. A **Figura 4.35** apresenta os resultados obtidos.

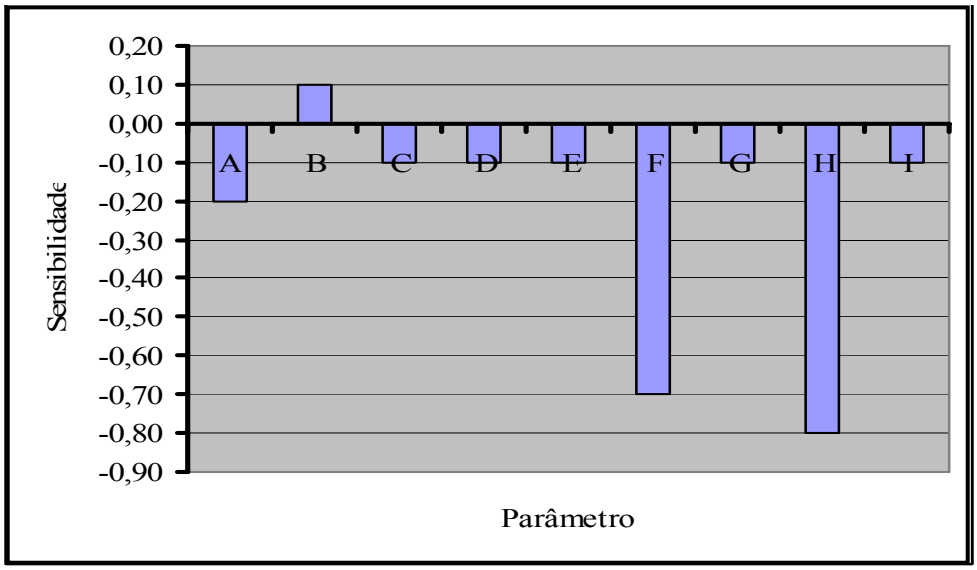


Figura 4.35: Parâmetros que acusaram maior influência, em termos de OD, no modelo QUAL2E.

onde:

A: coeficiente de desoxigenação, (d^{-1});

B: vazão na cabeceira, (m^3/s);

C: nitrito na cabeceira, (mg/L);

D: temperatura da água na cabeceira, (ºC);
E: taxa de consumo de oxigênio dissolvido pela oxidação do nitrito, (adimensional);
F: taxa de oxidação da amônia, (adimensional);
G: taxa de hidrólise do nitrogênio orgânico, (adimensional);
H: coeficiente de reaeração; e
I: taxa da demanda bentônica, (adimensional).

Dessa maneira, foi observado que o oxigênio dissolvido era mais influenciado pelos seguintes parâmetros: coeficiente de desoxigenação, taxa de oxidação da amônia e coeficiente de reaeração.

4.4 Calibração

A calibração consiste no operador acurar o seu modelo, aproximando ao máximo os valores obtidos *in loco* com os calculados pelo programa de modelagem que estiver sendo utilizado. Esse procedimento deve ser feito de forma paulatina, objetivando verificar as respostas do modelo frente às alterações que o usuário promova nos valores e faixas dos parâmetros pré-definidos pela análise de sensibilidade, de tal forma que a calibração seja otimizada.

Desta maneira, após várias simulações de calibração, é possível chegar ao "melhor modelo". Cada parâmetro deve ser modificado levando em consideração suas faixas de variação e a coerência da modelagem. Na presente pesquisa, a calibração foi feita considerando-se apenas o oxigênio dissolvido. Para tanto, após uma análise inicial foram selecionados os três parâmetros pré-definidos na análise de sensibilidade que mais influenciaram os resultados de OD do QUAL2E, sendo eles: coeficiente de desoxigenação, taxa de oxidação da amônia e coeficiente de reaeração. Assim, os mesmos foram variados até que se conseguiu aproximar do aceitável as respostas do modelo. Após cada simulação era calculado o erro do programa. Antes da calibração, o QUAL2E acusava uma variação média entre valores medidos e calculados de oxigênio dissolvido de 1,44 mg/L. Após quinze simulações, conseguiu-se diminuir a diferença

para 0,28 mg/L quando, então, deu-se o modelo como calibrado (**Figura 4.36**). Os valores de OD utilizados nessa calibração foram oriundos da média aritmética dos dados das cinco coletas.

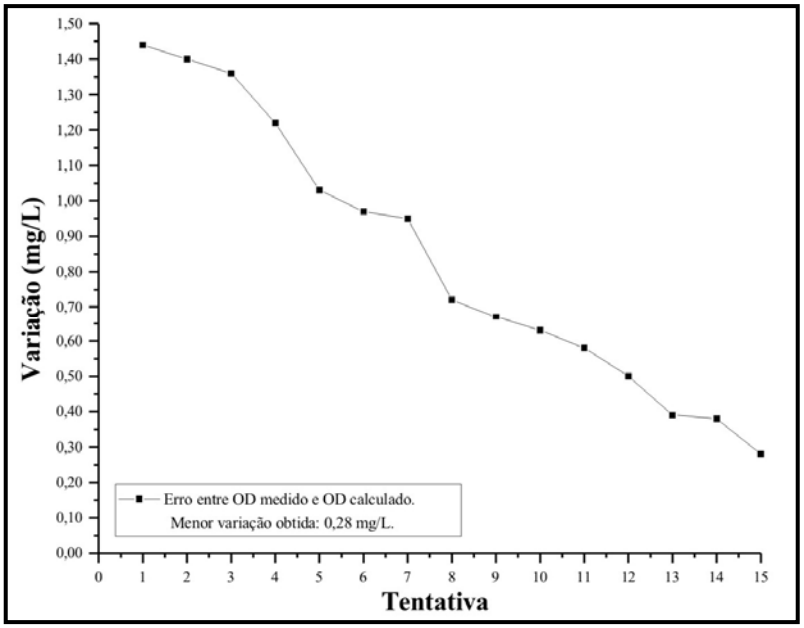


Figura 4.36: Minimização da variação entre OD medido e OD calculado na calibração do QUAL2E.

Ao se proceder com as simulações para a calibração, foi observado que à medida em que eram diminuídos os valores do coeficiente de desoxigenação, menor era o erro obtido. Dessa maneira, para a calibração do QUAL2E foram utilizados os coeficientes de desoxigenação descritos na **Tabela 4.9**.

Tabela 4.9: Valores de K_1 utilizados na calibração do QUAL2E.

Trecho	Faixa de K_1 (d^{-1}) Obtida nas Análises Laboratoriais	Valor de K_1 (d^{-1}) Utilizado na Calibração	Trecho	Faixa de K_1 (d^{-1}) Obtida nas Análises Laboratoriais	Valor de K_1 (d^{-1}) Utilizado na Calibração
1	0,13 a 0,66	0,13	11	0,09 a 0,90	0,09
2	0,13 a 0,66	0,13	12	0,09 a 0,56	0,09
3	0,13 a 0,66	0,13	13	0,09 a 0,56	0,09
4	0,13 a 0,66	0,13	14	0,09 a 0,56	0,09
5	0,13 a 0,66	0,13	15	0,09 a 0,56	0,09
6	0,13 a 0,66	0,13	16	0,09 a 0,56	0,09
7	0,13 a 0,66	0,13	17	0,09 a 0,56	0,09
8	0,13 a 0,66	0,13	18	0,09 a 0,56	0,09
9	0,09 a 0,90	0,09	19	0,09 a 0,56	0,09
10	0,09 a 0,90	0,09	-	-	-

No que diz respeito à taxa de oxidação da amônia, percebeu-se que à medida em que se diminuía o valor desse parâmetro, menor era o erro do modelo. Nesse sentido, como sua faixa de variação é de 0 d^{-1} a 10 d^{-1}, utilizou-se o valor de 0,01 d^{-1}.

Com base na faixa do coeficiente de reaeração obtida conforme a equação de O'Connor e Dobbins, foram gerados, com o auxílio do aplicativo EXCEL, vários números aleatórios desse parâmetro. A melhor calibração se deu com os dados apresentados na **Tabela 4.10** a seguir.

Tabela 4.10: Valores de K_2 utilizados na calibração do QUAL2E.

Trecho	Faixa de K_2 (d^{-1}) Obtida pela Equação de O'Connor e Dobbins	Valor de K_2 (d^{-1}) Utilizado na Calibração (número aleatório)	Trecho	Faixa de K_2 (d^{-1}) Obtida pela Equação de O'Connor e Dobbins	Valor de K_2 (d^{-1}) Utilizado na Calibração (número aleatório)
1	0,30 - 1,40	0,34	11	0,04	0,04 - 0,08
2	0,30 - 1,40	0,34	12	0,04	0,04 - 0,08
3	0,30 - 1,40	0,34	13	0,04	0,04 - 0,08
4	0,18 - 0,22	0,18	14	0,05	0,03 - 0,09
5	0,19 - 0,20	0,19	15	0,05	0,03 - 0,09
6	0,19 - 0,20	0,19	16	0,05	0,03 - 0,09
7	0,19 - 0,20	0,19	17	0,05	0,03 - 0,09
8	0,05 - 0,17	0,08	18	0,02	0,02 - 0,04
9	0,05 - 0,17	0,08	19	0,02	0,02 - 0,04
10	0,05 - 0,17	0,08	-		-

A **Figura 4.37** apresenta o comportamento do modelo antes e após a calibração.

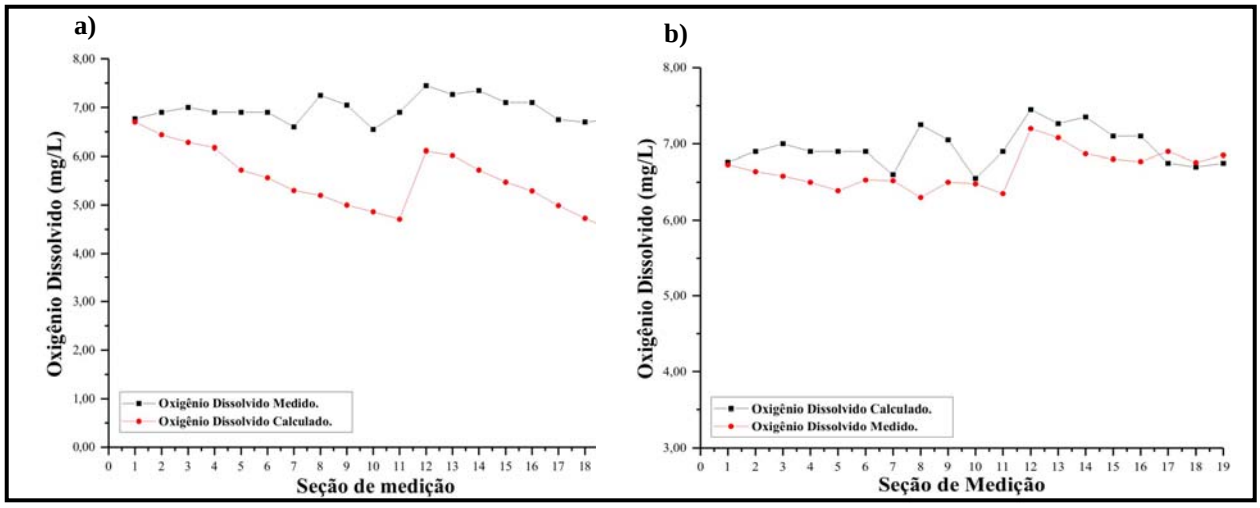


Figura 4.37: a) Gráfico da diferença entre OD medido e OD calculado no modelo QUAL2E: antes da calibração; **b)** Gráfico da diferença entre OD medido e OD calculado no modelo QUAL2E: após a calibração.

4.5 Simulações dos Cenários Futuros

As simulações dos cenários futuros são feitas com o modelo calibrado. O usuário pode, de acordo com o interesse existente, estabelecer várias situações para a realização das simulações. Nessa pesquisa foram criados três cenários hipotéticos para o Rio Araguari, sendo eles:

- **CENÁRIO 1:** O acréscimo de mais uma barragem com altura de 35,00 m, para fins de geração de energia elétrica a montante da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes. Esse cenário justifica-se devido ao fato da existência de previsões de edificação de muitas UHEs nos domínios da Floresta Amazônica.
- **CENÁRIO 2:** O crescimento populacional dos municípios de Porto Grande e Ferreira Gomes, cidades localizadas nos Trechos 6 e 11, respectivamente. Nesse cenário foi adotada a vazão média entre as estações de cheia e seca (1.131,65 m^3/s), ou seja, uma vazão alta; além disso, considerou-se que os efluentes domésticos seriam descartados no Rio Araguari sem nenhum tipo de tratamento. A vazão total de esgoto gerado pelos municípios foi calculada com base na taxa de crescimento populacional de 1,7% ao ano (NETO, 1997), visando um horizonte de vinte anos. A **Equação 4.7** (SPERLING, 1996) apresenta a fórmula utilizada para a quantificação da vazão de efluentes. A **Tabela 4.11** apresenta um resumo geral idealizado para os dois municípios.

$$Q_{máx.} = \left(\frac{C.P.q_m.K_d.K_h}{86400} \right) \qquad (\mathbf{4.7})$$

onde:

C: coeficiente de retorno, (adimensional);

P: população a ser atendida, (hab.);

q_m: consumo efetivo de água por habitante por dia, (m^3/hab/d);

K_d: coeficiente de variação máxima diária, (adimensional); e

K_h: coeficiente de variação máxima horária, (adimensional).

Tabela 4.11: Resumo dos dados do Cenário 2 no modelo QUAL2E.

Município	Tipo do Efluente	População Atual*	População Futura	Vazão Total (m^3/s)
Porto Grande	Urbano	14.675,00	20.559,00	0,054
Ferreira Gomes	Urbano	4.321,00	6.100,00	0,016
TOTAL:				**0,07 m^3/s**

***** No ano de 2005 (IBGE, 2006).

Na **Tabela 4.12** encontram-se listados os dados de oxigênio dissolvido, demanda bioquímica última de oxigênio, temperatura, nitrogênio orgânico, amônia, nitrito e nitrato utilizados na simulação do Cenário 2. Esses valores foram baseados em Fernandes (1997) e Jordão e Pessôa (1995).

Tabela 4.12: Dados de qualidade do efluente utilizados na simulação do Cenário 2.

Fonte Geradora de Efluentes	OD (mg/L)	L (mg/L)	Temperatura (ºC)	Nitrogênio Orgânico (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Nitrato (mg/L)
Porto Grande	0,00	434,00	25,00	50,00	65,00	0,25	0,55
Ferreira Gomes	0,00	434,00	25,00	50,00	65,00	0,25	0,55

- **CENÁRIO 3:** Nesse cenário utilizaram-se os mesmos dados empregados no CENÁRIO 2, alterando apenas a vazão do rio, ou seja, adotando o valor medido na estação seca: 105,62 m^3/s.

4.6 Análise Multivariada

Essa análise teve por objetivo verificar qual a influência dos parâmetros de qualidade da água e hidráulicos sobre o coeficiente de desoxigenação. Fez-se uso, para tanto, do programa estatístico PC-ORD. Para que o mesmo consiga realizar sua rotina interna de cálculos, é necessário que o usuário forneça todos os dados logaritmizados, de acordo com a fórmula descrita na **Equação 4.8** (PC-ORD, 2006).

$$Variável = \log\left(n^* + 1\right) \quad \textbf{(4.8)}$$

onde:

n^**:* valor correspondente ao dado de uma determinada variável.

O programa não consegue realizar seus cálculos internos quando os dados não sofrem nenhum tipo de variação ou quando existem falhas nas seqüências de valores obtidos. Assim, procedeu-se com essa análise com os parâmetros que foram medidos em, no mínimo, três campanhas de coleta de dados, sendo eles: demanda bioquímica de oxigênio, amônia, oxigênio dissolvido, sólidos totais, sólidos suspensos, temperatura da água, condutividade, cloreto, potencial hidrogeniônico, nitrato, vazão, largura, profundidade, área da seção transversal e velocidade.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos na pesquisa ora realizada, sendo eles: caracterização espacial e sazonal da qualidade da água (incluindo uma análise multivariada e a razão entre a demanda bioquímica de oxigênio e a demanda bioquímica última de oxigênio) e hidráulica do Médio Araguari, bem como as simulações computacionais dos cenários hipotéticos com o modelo QUAL2E.

5.1 Caracterização Espacial e Temporal da Qualidade da Água do Médio Araguari

Para todos os parâmetros analisados durante a pesquisa, elaborou-se um gráfico que objetivou ilustrar o comportamento dos mesmos em relação ao espaço (nos 120 km modelados) e às variações sazonais (estações de seca e cheia durante o período de 1,5 ano), em 23 pontos de amostragem. Foram locados, nesses gráficos, os municípios de Porto Grande, Ferreira Gomes e Cutias; os afluentes Amapari, Igarapé do Eduardo e Córrego Tracajatuba; e a Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, uma vez que todos esses elementos encontram-se situados dentro dos limites do trecho modelado.

Procedeu-se, também, com a verificação da possível existência de uma relação entre os parâmetros de qualidade da água com a vazão do Rio Araguari. Aqueles que demonstraram uma tendência clara dessa relação tiveram seus gráficos plotados. Além disso, nos gráficos cujos parâmetros de qualidade da água o Conselho Nacional de Meio Ambiente, por meio da Resolução 357, de 18 de junho de 2005, estabelece padrões específicos para os rios de Classe 2, os limites também foram sinalizados.

Algumas análises de qualidade da água não puderam ser realizadas nas cinco coletas de campo feitas durante a pesquisa, em virtude de problemas logísticos e de acesso a todos os pontos de coleta de dados. Porém, os valores obtidos encontram-se apresentados nos subitens a seguir.

5.1.1 Potencial hidrogeniônico

As medições de pH ao longo do Médio Araguari podem ser visualizada na **Figura 5.1**. É possível perceber que nas variações sazonais, o menor valor observado foi de 4,70 (5ª Coleta: cheia), e o maior foi de 7,60 (3ª Coleta: seca). Notou-se uma tendência clara de acidificação da água quando no aumento das vazões do rio durante as cheias.

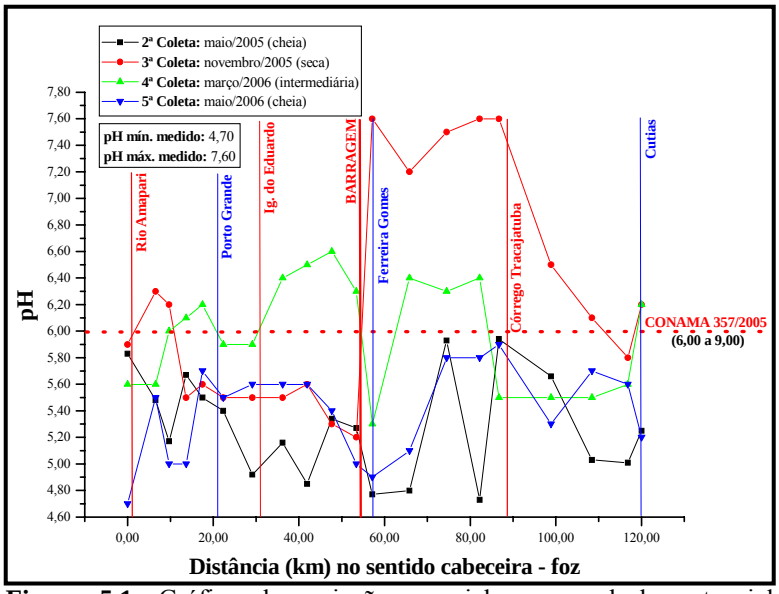


Figura 5.1: Gráfico da variação espacial e sazonal do potencial hidrogeniônico da água do Rio Araguari.

Aparentemente, após os municípios de Porto Grande e Ferreira Gomes ocorre a alteração do potencial hidrogeniônico, principalmente durante as estações de cheia. Isso pode ter alguma ligação com o descarte de efluentes nas águas desse rio, ou mesmo com alguma outra atividade antrópica.

Foi possível perceber que durante as estações onde a vazão do Rio Araguari é mais elevada, a barragem causa uma acentuada acidificação a jusante do lago; todavia, a maior intervenção dessa obra em relação à variação do pH foi verificada durante a 3ª Coleta, em plena estação seca, quando esse parâmetro subiu de 5,20 para 7,60. Os indícios são de que quanto menor a vazão do Araguari, maior é a influência da Usina de Coaracy Nunes na alteração do pH a jusante da mesma.

O CONAMA 357/2005 estipula que para os rios pertencentes à Classe 2, o potencial hidrogeniônico deve estar compreendido entre 6,00 e 9,00. Se comparado com esse padrão, o Rio Araguari estaria, na maior parte do ano, fora do limite estabelecido por essa resolução, uma vez que seus valores foram, em grande parte, menores que 6,00, o que poderia ser indício de alguma interferência antrópica. Porém, os rios amazônicos possuem um comportamento singular em relação à grande maioria dos corpos hídricos brasileiros no que tange aos padrões de qualidade da água, principalmente no caso desse parâmetro. Segundo a ANA (2005), os cursos d'água situados na Floresta Amazônica geralmente acusam pH ácido, variando de 3,80 a 4,90. Viana (2002) obteve, em pesquisas realizadas no Rio Candeias (Rondônia), valores de pH em torno de 5,81.

5.1.2 Condutividade

Esse parâmetro apresentou variações sazonais consideráveis (de aproximadamente treze vezes), independente da estação do ano, conforme pode ser observado na **Figura 5.2**.

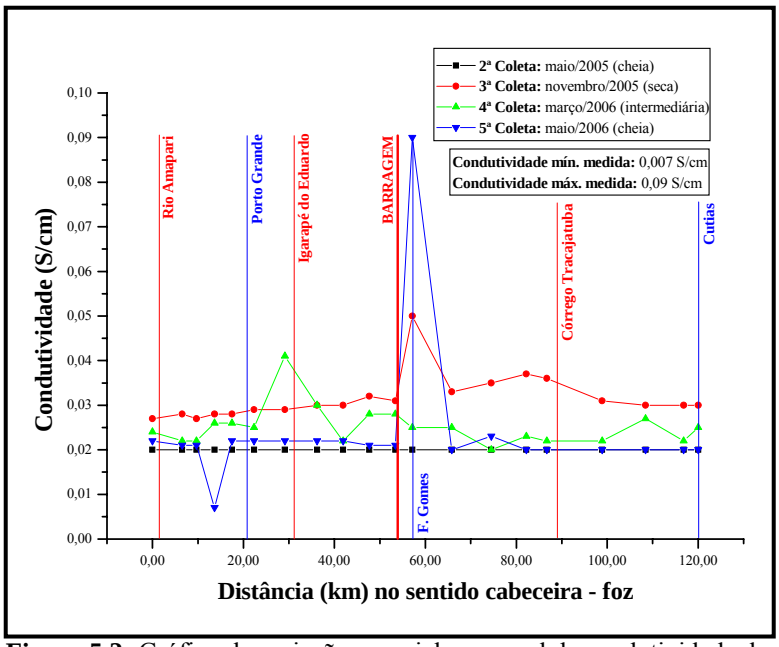


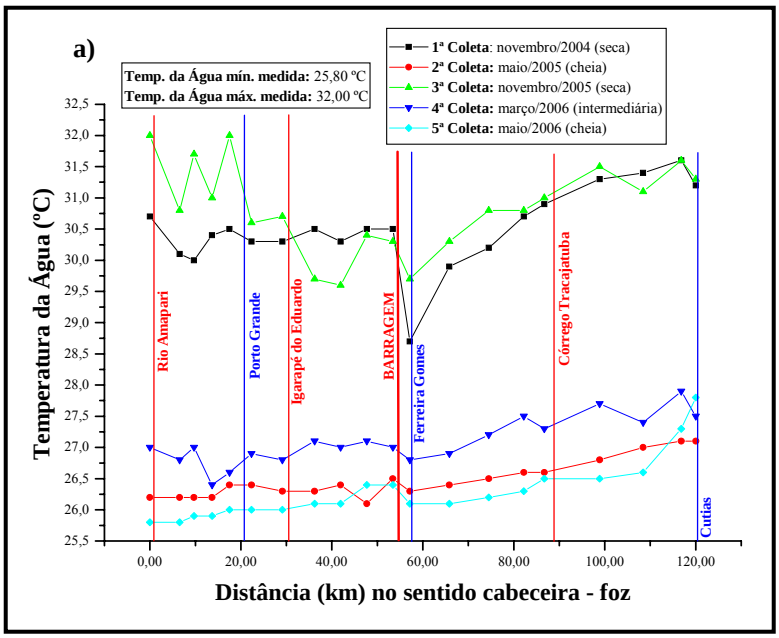
Figura 5.2: Gráfico da variação espacial e sazonal da condutividade da água do Rio Araguari.

Seus valores ficaram compreendidos entre 0,007 S/cm e 0,09 S/cm, ambos detectados na 5ª Coleta, ou seja, época de cheia. A jusante da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, situada nas imediações do município de Ferreira Gomes, o comportamento da condutividade foi variado: aumentou na 3ª e 5ª Coletas, diminuiu na 4ª Coleta e permaneceu estável na 2ª Coleta. Como essas oscilações ocorreram nas proximidades da mencionada cidade, isso pode ser indício da poluição hídrica originada de seus efluentes, descartados *in natura* no leito do Rio Araguari.

Ao que tudo indica, a barragem contribui para o aumento da oscilação da condutividade, principalmente a jusante do seu lago, o que pode estar sendo causado pela elevação de íons na água devido a processos de transformação de compostos dentro do reservatório.

5.1.3 Temperatura da água

Na ilustração da **Figura 5.3** é possível verificar que a menor temperatura hídrica registrada foi de 25,80 ºC (5ª Coleta: cheia), e a maior foi de 32,00ºC (3ª Coleta: seca).



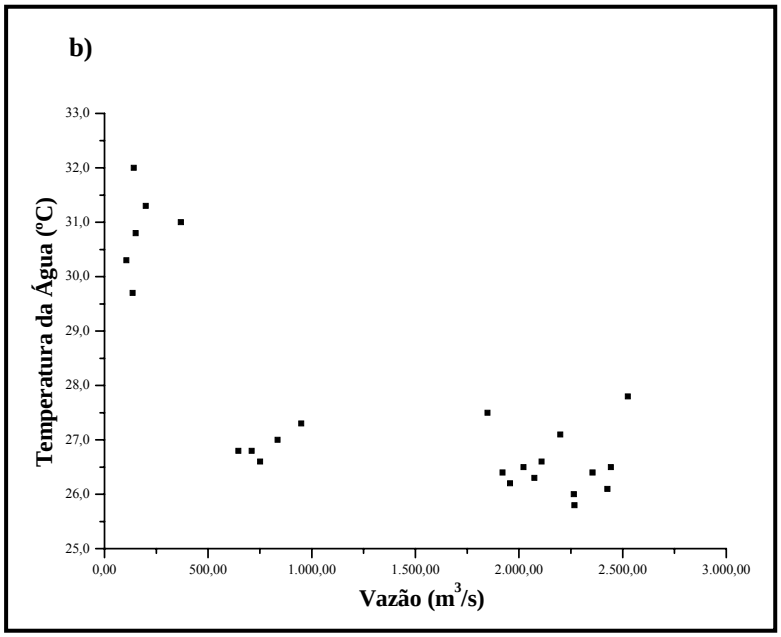


Figura 5.3: a) Gráfico da variação espacial e sazonal da temperatura da água do Rio Araguari; **b)** Gráfico da variação da temperatura da água em função da vazão.

Foi observado que ocorre uma grande variação sazonal desse parâmetro. Além disso, em todas as medições realizadas notou-se a diminuição da temperatura hídrica imediatamente após a barragem.

Como os lagos, em geral, sofrem o processo de estratificação térmica (BRAGA, 2002), esse comportamento é justificado na barragem da UHECN, uma vez que a água é captada pela usina nas camadas mais profundas do perfil hídrico, ou seja, no metalímnio e hipolímnio, onde as temperaturas são mais baixas. Se feita uma comparação entre as diferenças de temperatura medidas na época de estiagem com as obtidas nas estações de cheia e na estação intermediária, será possível notar, durante as secas, uma variação maior desse parâmetro logo a jusante da barragem.

Isso provavelmente ocorreu porque, nas épocas de estiagem, a água armazenada no lago escoa apenas pelas turbinas, sendo oriunda única e exclusivamente das regiões do metalímnio e hipolíminio, ou seja, onde as temperaturas são menores. Esse fato não se repetiu durante as cheias, quando, além da vazão turbinada (formada por água mais fria), ocorre o

extravasamento do volume vertido, que é mais quente, o que promove uma mistura da água e, conseqüentemente, diminui a variação de sua temperatura a jusante do lago. Esse parâmetro cresceu no sentido da foz.

Outra constatação que pode ser feita ao se analisar a **Figura 5.3** é que a vazão interfere consideravelmente na variação da temperatura da água do Rio Araguari: quanto maior a descarga hídrica, menores são os valores desse parâmetro.

5.1.4 Transparência

Os dados de transparência oscilaram entre 0,90 m (5ª Coleta: cheia) e 1,70 m (3ª Coleta: seca). É possível perceber, analisando-se a **Figura 5.4**, que no verão houve pouca variação espacial desse parâmetro. Sua maior oscilação foi percebida durante a época de estiagens, onde notou-se uma tendência de aumento da transparência no sentido da foz do Rio Araguari.

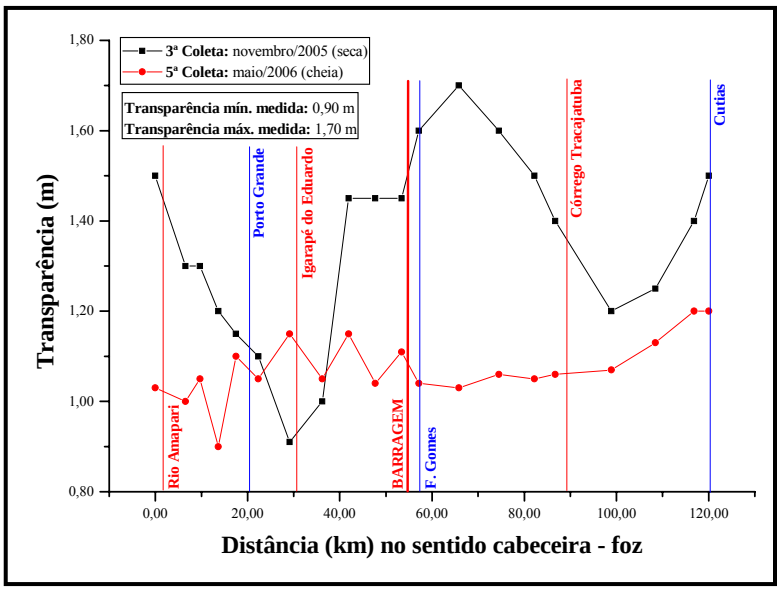


Figura 5.4: Gráfico da variação espacial e sazonal da transparência da água do Rio Araguari.

5.1.5 Sólidos totais

Esse parâmetro apresentou uma elevada variação: mínimo de 1,60 mg/L (5ª Coleta: cheia) e máximo de 3.480,00 mg/L (3ª Coleta: seca). É possível verificar, na **Figura 5.5**, que as maiores oscilações ocorreram durante as estações de seca, provavelmente em virtude do aumento das concentrações de sólidos na água, uma vez que, nessa época, as vazões do Rio Araguari se fazem menores.

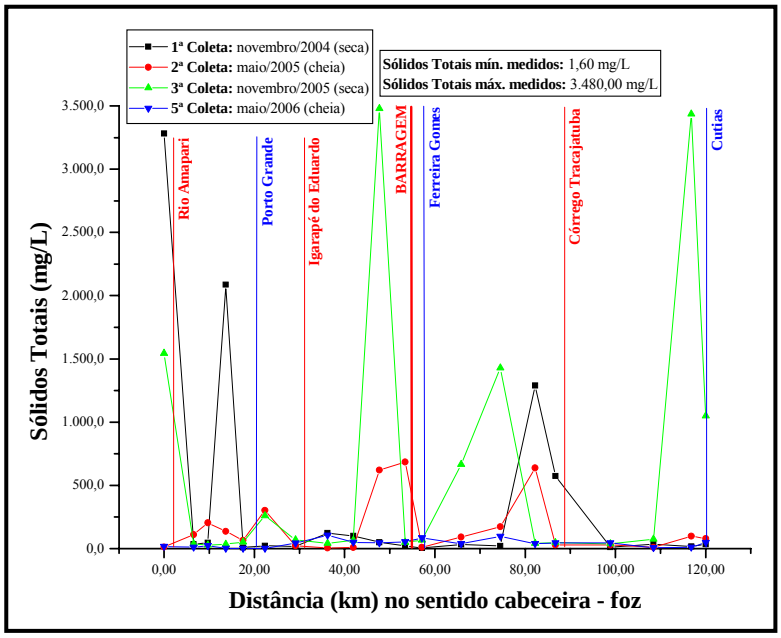


Figura 5.5: Gráfico da variação espacial e sazonal dos sólidos totais da água do Rio Araguari.

Percebeu-se, em todas as coletas onde os sólidos totais foram quantificados, que a jusante das cidades de Porto Grande e Ferreira Gomes, esse parâmetro acusou aumento nos valores de suas concentrações, indicando efeito da urbanização. O lançamento de efluentes sem tratamento nas águas do Rio Araguari parece estar promovendo um aumento na quantidade da matéria orgânica presente no meio hídrico.

Outra observação que pode ser feita ao se analisar a figura acima é que a Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes parece contribuir para o aumento da quantidade de sólidos totais, principalmente na região do reservatório, o que pode ser entendido devido à diminuição da

velocidade hídrica nesse local, propiciando a sedimentação, dentro do lago, da matéria presente no meio aquático.

5.1.6 Sólidos suspensos

Os valores de sólidos suspensos, ilustrados na **Figura 5.6** a seguir, ficaram compreendidos entre o mínimo de zero (1ª e 5ª Coletas: seca e cheia, respectivamente), e o máximo de 190,00 mg/L (1ª Coleta: seca), sendo que as maiores variações ocorreram entre os quilômetros 75 e 100.

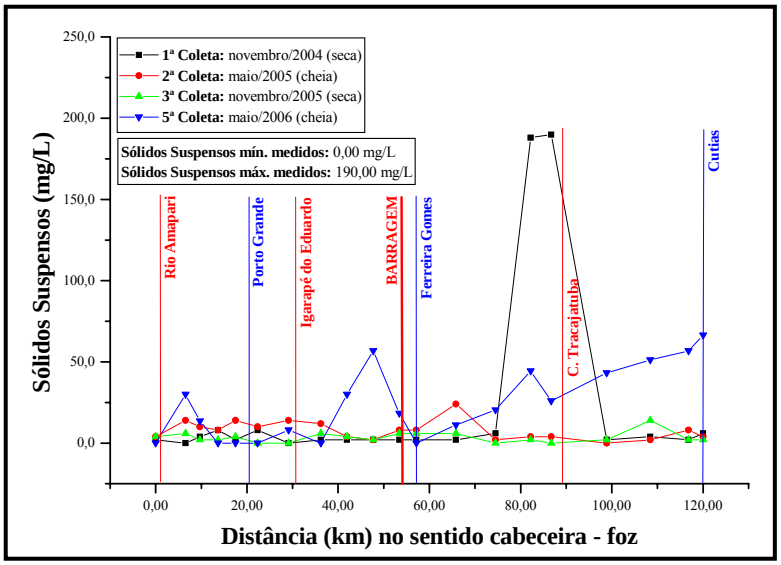


Figura 5.6: Gráfico da variação espacial e sazonal dos sólidos suspensos da água do Rio Araguari.

Na 5ª Coleta, a região do reservatório indicou uma concentração elevada de sólidos suspensos, o que pode se justificar pelo mesmo motivo já elucidado no que diz respeito aos sólidos totais (subitem anterior). Em linhas gerais, no que tange à variação sazonal, o comportamento desse parâmetro foi relativamente homogêneo, ocorrendo, contudo, algumas variações bruscas. Os "picos" nas concentrações desse parâmetro durante a 5ª e a 1ª Coletas podem estar sendo causados pela operação das comportas. Além disso, os efluentes oriundos da cidade de Ferreira Gomes parecem propiciar o aumento desse parâmetro.

5.1.7 Coliformes termotolerantes

A grande variação espacial da presença de coliformes termotolerantes pode ser verificada na **Figura 5.7**. Os valores mínimo e máximo obtidos foram de, respectivamente: 10,00 NMP/100 mL (nas três coletas) e de 2.200,00 NMP/100 mL (3ª Coleta: seca). É possível perceber que em todas as campanhas de campo em que se quantificou esse parâmetro, foi observado que seus valores se apresentaram elevados a jusante do Rio Amapari, principalmente durante as duas estações secas, o que pode ser indício de contaminação a montante desse local, originada de alguma cidade ou mesmo de excretas de animais em geral (pecuária e fauna regional).

Outro aspecto possível de ser notado ao se analisar a **Figura 5.7** é o fato de que no ponto posterior ao município de Porto Grande e no exato local onde está situada a cidade de Ferreira Gomes (quilômetros 22 e 57, respectivamente), o número de coliformes termotolerantes também aumentou; isso, entretanto, era esperado, pois essas cidades lançam seus efluentes diretamente no Rio Araguari, sem dispensar nenhum tipo de tratamento aos mesmos. A jusante desse último município também foi possível verificar que ocorreu um aumento da presença desses microrganismos, embora em menor proporção, o que pode ser justificado pela presença acentuada de ruminantes nessa área. Também notou-se, em todas as coletas onde esse parâmetro foi quantificado, que a UHECN provoca o aumento do número de coliformes termotolerantes logo após sua barragem. Outra conclusão obtida ao se analisar a **Figura 5.7**, é que há uma tendência geral de decaimento nas concentrações desses seres à medida em que a vazão do Rio Araguari aumenta.

Em alguns pontos analisados, principalmente a jusante do Rio Amapari e nas proximidades de Ferreira Gomes, ocorreu o desatendimento desse parâmetro à Resolução 357/2005 do CONAMA, uma vez que os valores de coliformes termotolerantes ultrapassaram o limite estabelecido por esse instrumento jurídico (que é de 1.000 NMP/100 mL para os rios de Classe 2). Contudo, é importante salientar que a presença de coliformes na água pode ter origem também na biota. Entretanto, não se descarta o fato da poluição advinda de esgotos domésticos.

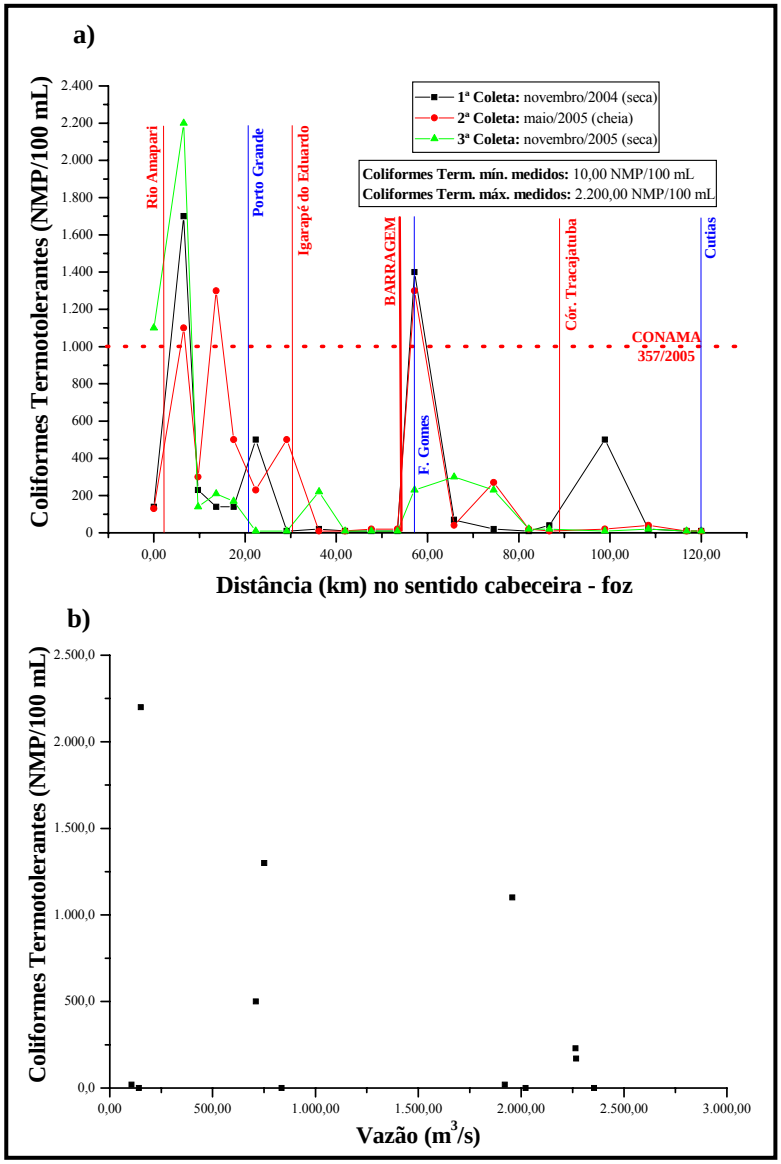


Figura 5.7: a) Gráfico da variação espacial e sazonal dos coliformes termotolerantes presentes na água no Rio Araguari; **b)** Gráfico da variação dos coliformes termotolerantes em função da vazão.

5.1.8 Amônia

Verifica-se, na **Figura 5.8**, que os dados de amônia permaneceram relativamente constantes durante as estações climáticas analisadas, exceto no caso da seca de 2004, quando esse parâmetro acusou valores maiores que os medidos nas outras campanhas de campo

(principalmente a jusante da cidade de Porto Grande). Os valores mínimo e máximo de amônia foram de 0,07 mg/L e 1,39 mg/L, respectivamente (ambos observados durante a 1ª Coleta: seca). Em todas as expedições de campo em que esse parâmetro foi quantificado, notou-se que o mesmo se manteve abaixo do limite estabelecido pelo CONAMA, que é de 3,70 mg/L.

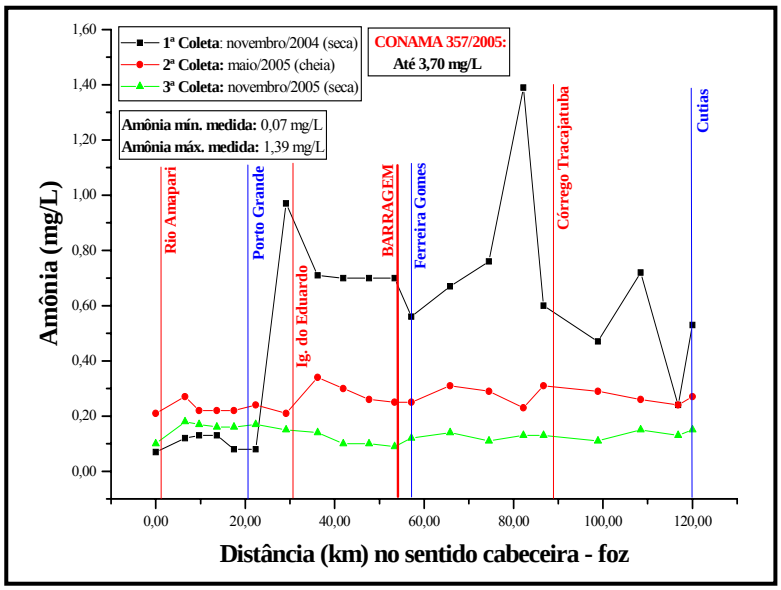


Figura 5.8: Gráfico da variação espacial e sazonal da amônia da água do Rio Araguari.

Em geral, a jusante dos municípios de Porto Grande e Ferreira Gomes, houve um aumento da amônia; todavia, esse mesmo comportamento não foi verificado na região do lago da usina, onde os níveis de NH_3, se comparados com os valores obtidos em Porto Grande, decresceram. Isso pode estar acontecendo devido ao consumo da amônia na região do lago pelas algas ali existentes.

A barragem não parece estar favorecendo a ocorrência de amônia na água. Porém, cabe salientar que esse parâmetro é originado durante os processos de decomposição da matéria orgânica biodegradável e, como na época da edificação da UHECN, há mais de trinta anos, não foi feita a remoção prévia da cobertura vegetal existente, os níveis de NH_3 devem ter sido muito altos nos anos subseqüentes ao enchimento do reservatório (quando a decomposição da biomassa é mais intensa), vez que até hoje é possível verificar a presença de inúmeras árvores mortas dentro do lago da usina. A matéria orgânica oriunda da flora submersa e da água do corpo hídrico em questão que, por sua vez, é rica em matéria em decomposição devido à própria ciclagem de

nutrientes desenvolvida pela floresta para sua sobrevivência, pode ter provocado a elevação da amônia a níveis muito altos. Logo, o que se percebe é que esse é um tipo de impacto não mais possível de ser detectado nos dias atuais, em toda a magnitude que já possa ter ocorrido.

5.1.9 Nitrato

A **Figura 5.9** ilustra os gráficos de variação espacial e temporal do nitrato.

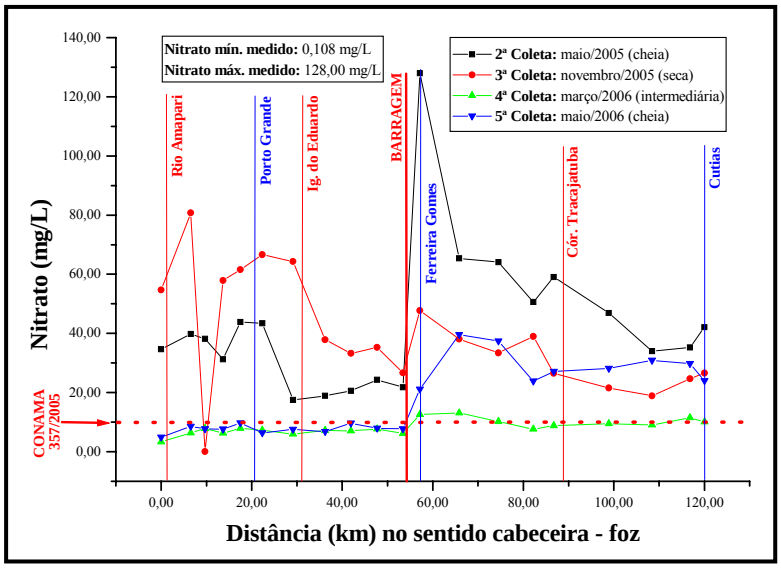


Figura 5.9: Gráfico da variação espacial e sazonal do nitrato da água do Rio Araguari.

Os valores encontrados durante as pesquisas de campo demonstraram uma variação grande que, por sua vez, ficou compreendida entre o mínimo de 0,108 mg/L (4ª Coleta: intermediária) e o máximo de 128,00 mg/L (2ª Coleta: cheia). Na 4ª Coleta verificou-se um comportamento mais homogêneo do nitrato ao longo da seção analisada, o que não ocorreu nas demais campanhas.

Imediatamente após a barragem e as cidades de Porto Grande e Ferreira Gomes, foi observado que houve uma elevação brusca do nitrato, seguida de um decaimento do mesmo, principalmente durante a 2ª Coleta. A UHECN, em especial, parece favorecer o aumento das

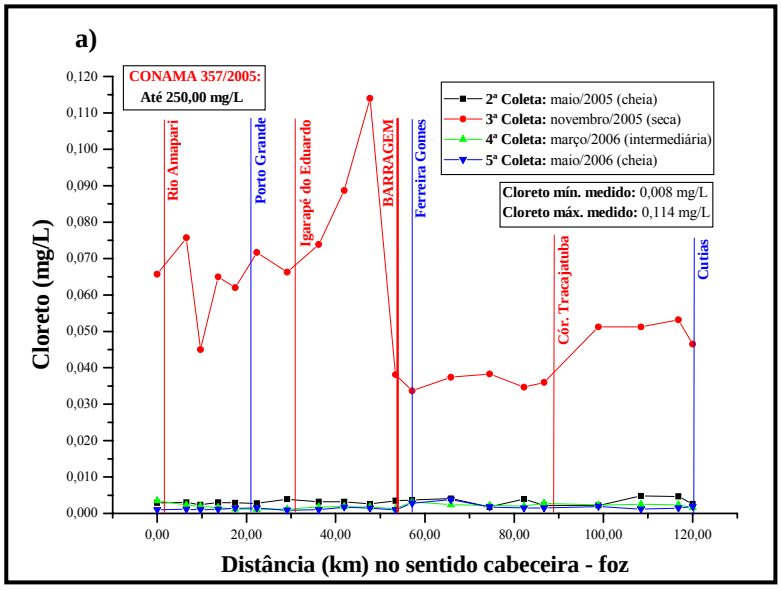
concentrações desse parâmetro a jusante do seu lago; isso provavelmente se dá devido ao fato da hidrelétrica promover operações que propiciam o aumento do oxigênio dissolvido no meio aquático que, em conjunto com a matéria orgânica ressuspendida pela água que escoa pelas turbinas (juntamente com a que é oriunda dos efluentes urbanos), acaba favorecendo os processos de nitrificação nessa região.

Analisando o limite estabelecido pela Resolução 357/2005 do CONAMA para nitrato, que é de até 10,00 mg/L, o Rio Araguari está, na maior parte do ano, em desacordo com a mesma. Isso pode estar ocorrendo não somente devido à poluição de origem antrópica, mas também devido às características naturais específicas desse manancial.

Novas pesquisas devem ser empreendidas para que se consiga obter um retrato mais claro dos processos que envolvem o ciclo do nitrogênio nesse rio.

5.1.10 Cloreto

A **Figura 5.10** mostra a grande variação de cloreto ao longo do trecho analisado e sua relação com a vazão do manancial. O valor mínimo obtido foi de 0,008 mg/L (5ª Coleta: cheia), e o máximo foi de 0,114 mg/L (3ª Coleta: seca).



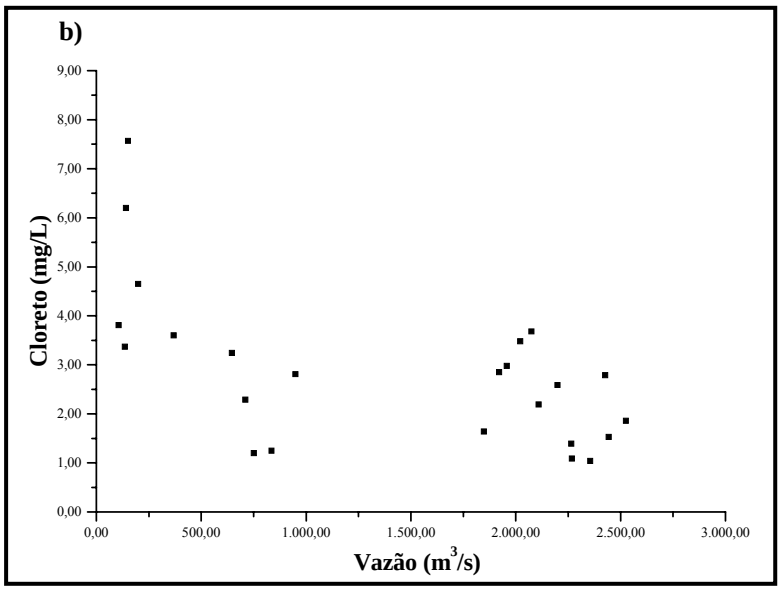


Figura 5.10: a) Gráfico da variação espacial e sazonal do cloreto da água do Rio Araguari; **b)** Gráfico da concentração do cloreto em função da vazão.

No geral, seu comportamento sazonal foi homogêneo, exceto na 3ª Coleta, quando suas concentrações alcançaram níveis não observados em nenhuma das demais campanhas de campo, principalmente a montante da barragem.

Tal fato provavelmente ocorreu porque, na seca, o volume de água diminui e as concentrações de cloreto tornam-se mais elevadas. No que diz respeito à vazão, percebeu-se a tendência de que quanto mais elevada a descarga hídrica, menores são as concentrações de cloreto presentes na água do Rio Araguari.

Esse parâmetro não ultrapassou o limite estabelecido pela Resolução 357/2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente, que é de até 250,00 mg/L. Todavia, na época de estiagem percebeu-se que a hidrelétrica provoca o decréscimo de cloreto a partir da região onde está localizado o seu lago. Esse fato pode ser originado quando na diminuição da velocidade da água dentro da barragem, o que provoca a sedimentação desse elemento dentro do reservatório, evitando que o mesmo seja transportado para o trecho a jusante da usina.

Verificou-se, também, que a tendência espacial do cloreto após a UHECN é de aumentar em direção à foz, principalmente durante a estação seca.

5.1.11 Demanda bioquímica de oxigênio

Os valores da demanda bioquímica de oxigênio obtidos durante as cinco campanhas realizadas estão apresentados na **Figura 5.11**: mínimo de 5,40 mg/L (2ª Coleta: cheia) e máximo de 7,77 mg/L (4ª Coleta: intermediária).

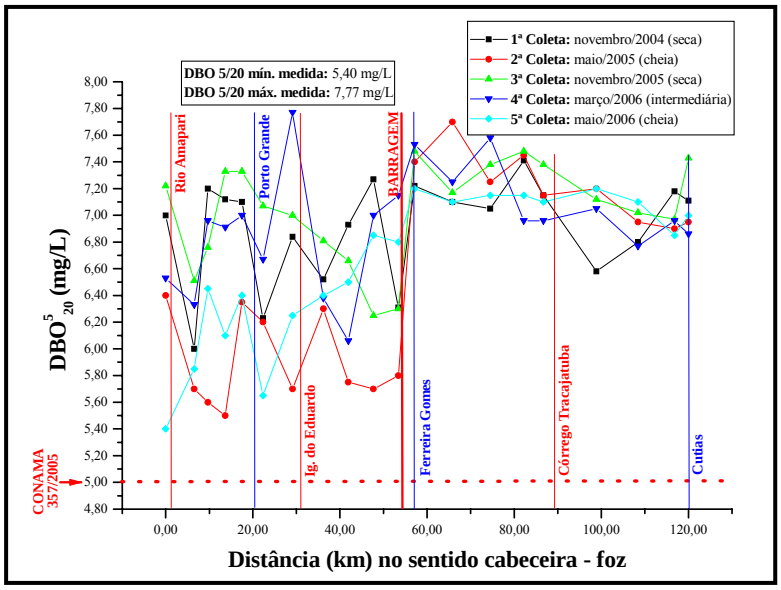


Figura 5.11: Gráfico da variação espacial e sazonal da demanda bioquímica de oxigênio da água do Rio Araguari.

Ao se analisar essa figura é possível notar que ocorreu uma variação sazonal significativa da DBO5/20 nas cinco coletas onde, no geral, durante as estações de cheia (2ª e 5ª Coletas), as concentrações foram menores em virtude do aumento da diluição da matéria orgânica quando no aumento do volume da água.

No que tange à Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, é possível observar claramente que após a barragem ocorre uma elevação significativa da demanda bioquímica de oxigênio. Isso provavelmente se dá devido à ressuspensão de sólidos retidos no reservatório quando na liberação da água turbinada e vertida, o que provoca a elevação dos níveis de matéria orgânica na água. Além disso, tal impacto ambiental se agrava devido ao lançamento de esgoto oriundo das cidades de Porto Grande e Ferreira Gomes, uma vez que, em geral, ocorre também o aumento da DBO5/20 a jusante desses municípios.

Após a barragem, percebe-se que os níveis de DBO5/20 diminuíram, o que pode ser explicado pela capacidade de diluição do Rio Araguari.

O CONAMA estabelece que os cursos d'água de Classe 2 devem possuir uma DBO5/20 de até 5,00 mg/L. Se comparado com esse padrão, o Rio Araguari estaria sempre em discordância no que tange a esse parâmetro. Porém, segundo a ANA (2005), os rios amazônicos são ricos em matéria orgânica e substâncias húmicas. Tudo indica que tal comportamento da quantidade de matéria orgânica carbonácea presente no rio em estudo é, também, uma questão de realidade hídrica diferente em uma região ainda pouco estudada. Todavia, é importante salientar que esse "comportamento natural" não se justifica durante todo o trecho analisado, uma vez que ocorrem picos de aumento da DBO5/20 a jusante dos aglomerados urbanos e da UHECN. O que se percebe é que a poluição antrópica provoca o agravamento no comportamento de um parâmetro que já se apresenta mais elevado em função das características ambientais locais.

5.1.12 Oxigênio dissolvido

O menor valor de oxigênio dissolvido detectado nas expedições de campo foi de 6,00 mg/L (2ª e 3ª Coletas: cheia e seca, respectivamente) e o maior foi de 8,10 mg/L (3ª Coleta: seca), conforme pode ser verificado na **Figura 5.12**. A variação sazonal acusou uma oscilação heterogênea no que diz respeito a este parâmetro; contudo, de maneira geral, nota-se que a tendência do mesmo é diminuir no sentido da foz (exceto no caso das estações secas). Observa-se, claramente, que a Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, em virtude das próprias operações inerentes à geração de energia elétrica, promove o aumento do oxigênio dissolvido no meio hídrico, sendo que esse fato é muito mais marcante durante a estação das cheias, quando o volume de água aumenta consideravelmente.

Na **Figura 5.12** também é possível observar que não há indícios claros do aumento da produção fotossintética pelas algas durante as horas do dia, o que permite deduzir que esse

processo não se reflete de forma significativa sobre as concentrações de oxigênio dissolvido no manancial em questão.

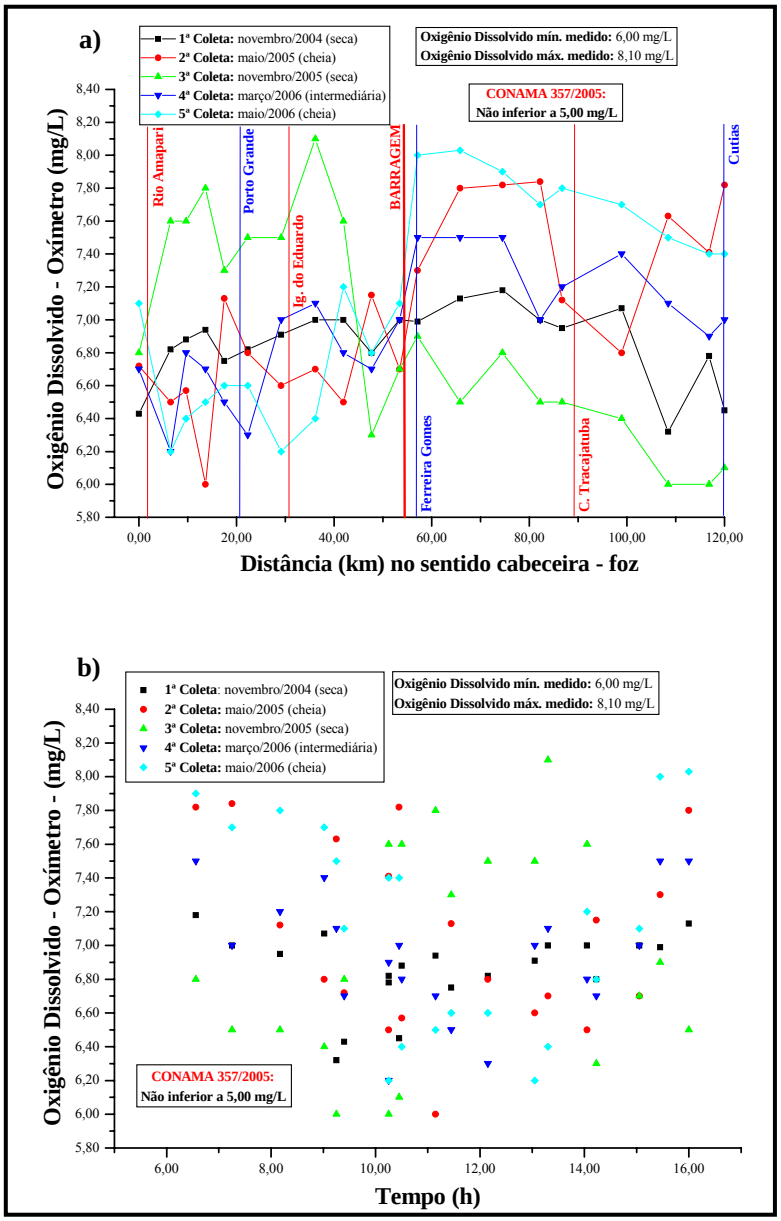


Figura 5.12: a) Gráfico da variação espacial e sazonal do oxigênio dissolvido na água do Rio Araguari; **b)** Gráfico da variação temporal do oxigênio dissolvido na água no Rio Araguari.

Outro fato verificado é que em nenhuma expedição de campo foram observados valores de oxigênio dissolvido que infringissem o limite mínimo de 5,00 mg/L estabelecido pela

Resolução 357/2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente, o que possibilita compreender que o Rio Araguari ainda se encontra em bom estado de conservação ambiental.

5.2 Caracterização Hidráulica do Médio Araguari

Nesse subcapítulo são apresentados os gráficos com as variações espaciais e sazonais dos valores médios de vazão, velocidade, profundidade, largura e área da seção transversal do trecho hídrico analisado. Como elucidado no capítulo anterior, por questões de segurança humana e dos equipamentos, não foi possível proceder com as medições dos parâmetros hidráulicos nas 23 seções definidas, em especial durante as épocas de estiagem.

5.2.1 Vazão

A **Figura 5.13** apresenta os valores de vazão obtidos nas medições de campo.

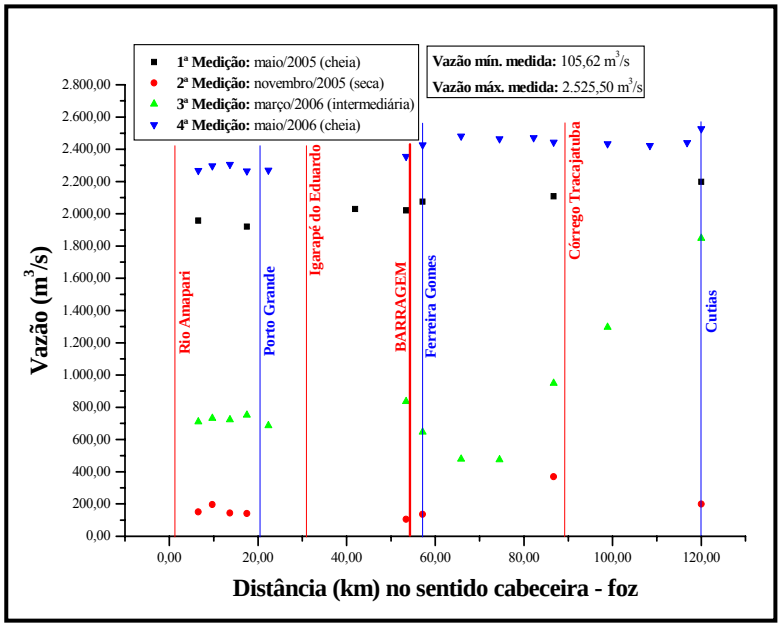


Figura 5.13: Gráfico da variação espacial e sazonal da vazão média do Rio Araguari.

A oscilação sazonal do volume de água encontrado no Rio Araguari alcançou valores que variaram em quase 24 vezes de uma estação climática para outra. Os valores medidos foram: mínimo de 105,62 m^3/s (2ª Medição: seca) e máximo de 2.525,50 m^3/s (4ª Medição: cheia). Percebe-se, portanto, que esse corpo hídrico é um curso d'água de grande porte, uma vez que se apresenta com elevadas vazões.

Ao se observar a mencionada figura, é possível perceber que ocorreu uma variação considerável dos valores de vazão obtidos, principalmente durante a seca de 2005 (quando houve uma queda da vazão no final do trecho), e a estação intermediária onde, após a Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, a descarga hídrica diminuiu e, no quilômetro 75, voltou a crescer no sentido da foz.

A princípio, foi cogitada a possibilidade de que o comportamento da vazão poderia ser advindo de falhas de leitura do Perfilador *Doppler*-Acústico de Corrente. Porém, ao se plotar os valores de vazão medidos por esse equipamento no ponto situado na Seção R3 (a mais próxima do vertedouro), juntamente com os dados de descarga hídrica monitorados pela UHECN (nos mesmos dias em que foram realizadas as expedições de campo), obteve-se um coeficiente de correlação de 0,96 entre os valores advindos das duas fontes (**Figura 5.14**).

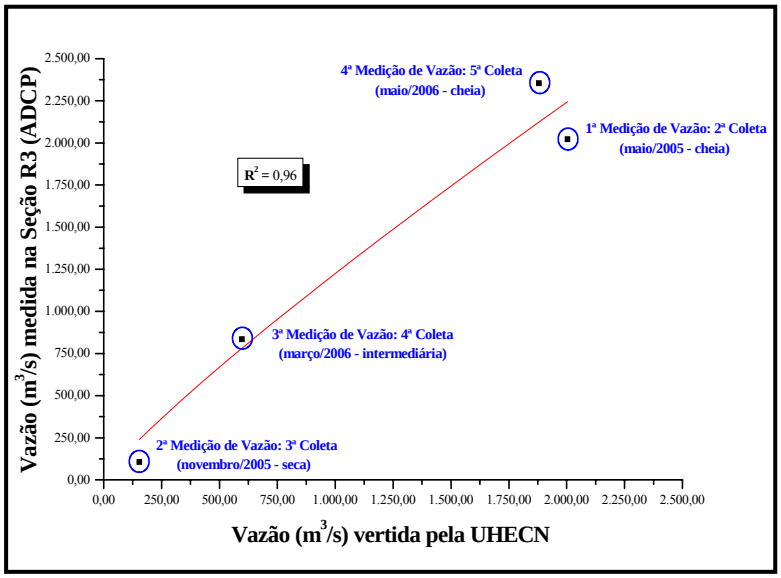


Figura 5.14: Gráfico da comparação entre os valores de vazão medidos com o ADCP e os dados fornecidos pelo departamento de operação da UHECN.

Após a verificação dos inúmeros fatores que poderiam estar provocando esse comportamento, chegou-se às seguintes conclusões: (1) ocorre uma interferência da maré a jusante da usina; e (2) a rotina de operação da barragem, no sentido de armazenar e liberar a água de acordo com sua necessidade, influencia consideravelmente no comportamento da vazão do Rio Araguari. Estudos mais aprofundados no que tange ao parâmetro ora abordado devem ser conduzidos, visando compreender melhor o comportamento e as particularidades hidráulicas desse corpo d'água.

5.2.2 Velocidade

A **Figurara 5.15** apresenta os valores mínimo e máximo detectados nos estudos conduzidos no Rio Araguari: 0,05 m/s (2ª Medição: seca) e 1,18 m/s (4ª Medição: cheia).

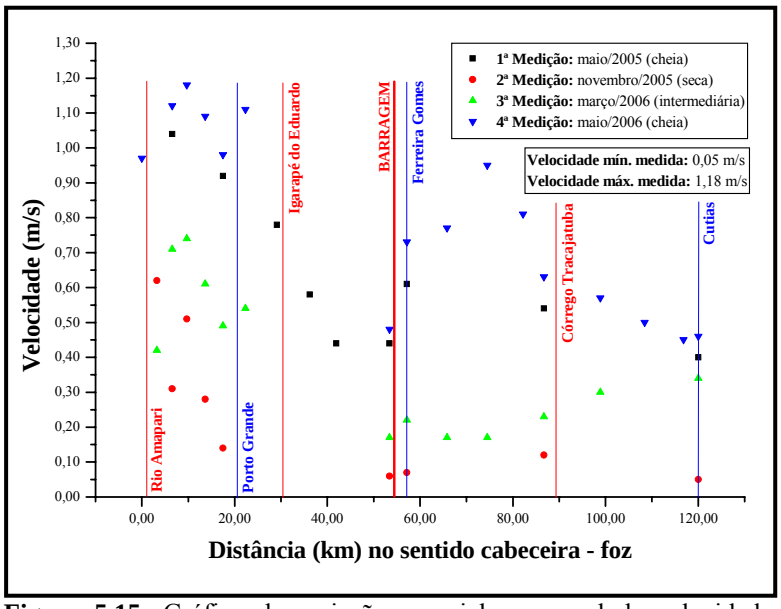


Figura 5.15: Gráfico da variação espacial e sazonal da velocidade média da água do Rio Araguari.

Em todas as campanhas de campo, os valores desse parâmetro hidráulico tenderam a diminuir nas proximidades do reservatório; porém, a jusante da UHECN, seu comportamento foi bastante variado, principalmente entre as estações sazonais acompanhadas. Tal conduta pode ter

ocorrido devido às interferências da maré a jusante da usina e às operações das comportas feitas pela hidrelétrica, coincidindo com as mesmas suposições feitas para a vazão no subitem anterior.

5.2.3 Profundidade

A profundidade média do Rio Araguari variou entre 1,29 m (2ª Medição: seca) e 17,00 m. De maneira geral, o Rio Araguari demonstrou uma tendência explícita de aumento da profundidade no sentido de sua foz, conforme pode ser visualizado na **Figura 5.16**, o que já era esperado.

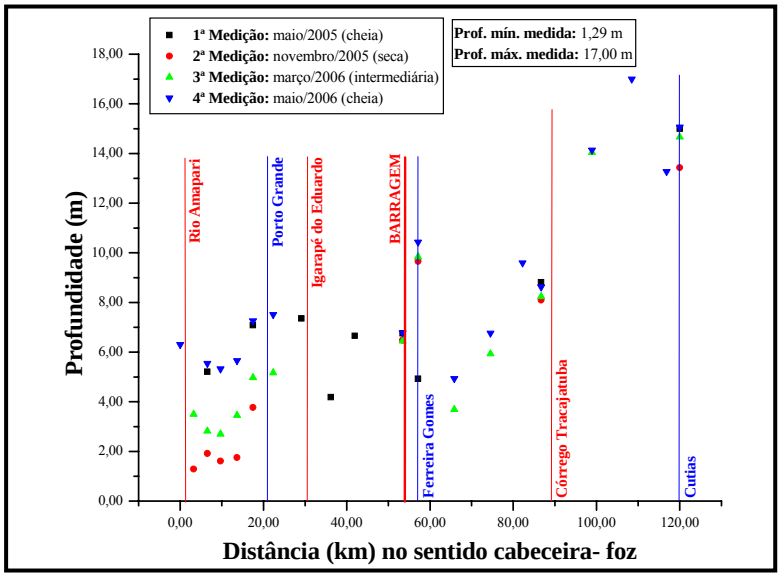


Figura 5.16: Gráfico da variação espacial e sazonal da profundidade média do Rio Araguari.

5.2.4 Largura

No tocante à largura do canal, é possível visualizar, na **Figura 5.17**, que o Rio Araguari se apresentou com um comportamento relativamente variado, principalmente na região a montante e no lago da usina, onde esse parâmetro hidráulico se mostrou mais irregular.

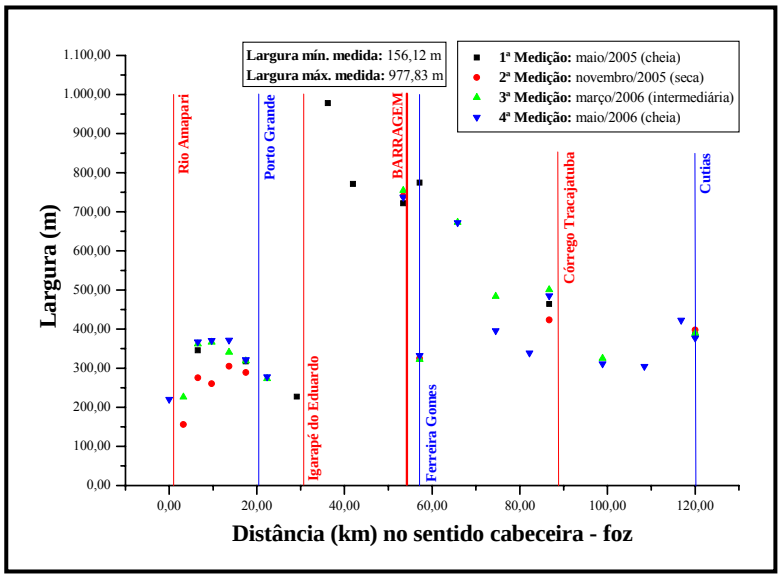


Figura 5.17: Gráfico da variação espacial e sazonal da largura média do Rio Araguari.

Os valores mínimo e máximo da largura foram 156,12 m (2ª Medição: seca) e 977,83 m (1ª Medição: cheia), respectivamente. Logo a jusante da barragem a largura é maior, diminuindo gradativamente no sentido da foz. No geral, não foram percebidas grandes variações entre cheia e seca. O maior valor obtido foi na cheia do ano de 2005, nas proximidades do quilômetro 38, onde o Rio Araguari se apresentou mais largo e com elevada presença de pequenas ilhas.

5.2.5 Área da seção transversal

Na **Figura 5.18** é possível verificar que a área da seção transversal apresentou-se em escala gráfica crescente no sentido da foz do rio, com um considerável aumento entre os quilômetros 35 e 57, ou seja, na região do lago. Os valores mínimo e máximo medidos foram de 201,35 m^2 (2ª Medição: seca) e 5.767,01 m^2 (1ª Medição: cheia), respectivamente.

Observa-se, também, que esse parâmetro hidráulico praticamente não sofreu alterações na região do lago da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, principalmente na seção de

medição situada na altura do quilômetro 53, o que permite constatar que o nível do espelho d´água no reservatório é praticamente o mesmo durante todo o ano.

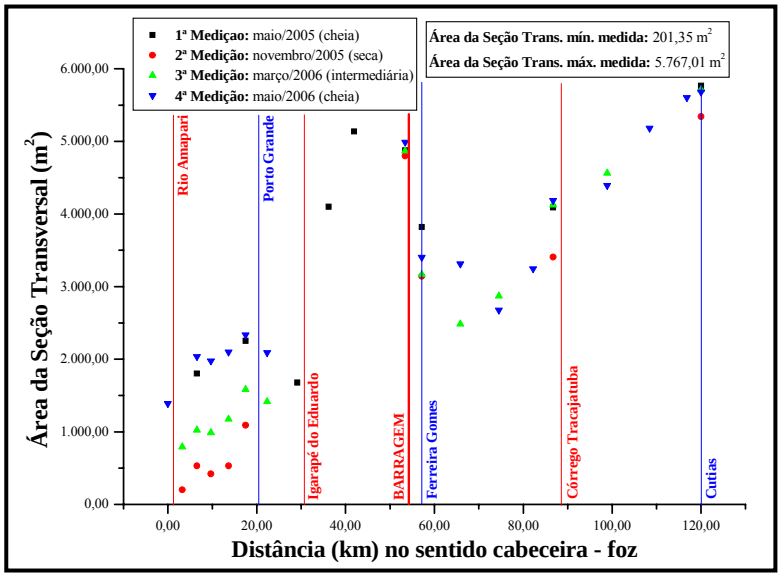


Figura 5.18: Gráfico da variação espacial e sazonal da área média da seção transversal do Rio Araguari.

5.2.6 Dados hidráulicos dos afluentes do Rio Araguari

Durante as campanhas de campo realizadas no Rio Araguari, também foram feitas medições dos parâmetros hidráulicos dos três afluentes considerados nessa pesquisa, sendo eles: Rio Amapari, Igarapé do Eduardo e Córrego Tracajatuba. Esses dados também foram obtidos com o auxílio do ADCP.

O Amapari é o afluente com maior influência sobre o corpo hídrico pesquisado, visto que sua vazão é elevada se comparada com as dos outros dois cursos d'água considerados no presente estudo. Os dados obtidos podem ser visualizados na **Tabela 5.1**.

As medições dos parâmetros hidráulicos no Igarapé do Eduardo não foram realizadas em todas as campanhas de campo, em virtude do fato desse corpo hídrico se encontrar em uma região de difícil acesso e de elevada periculosidade.

Tabela 5.1: Valores dos parâmetros hidráulicos medidos nos afluentes do Rio Araguari.

Parâmetro Hidráulico Médio		Rio Amapari	Igarapé do Eduardo	Córrego Tracajatuba
1ª Medição	Vazão (m^3/s)	924,48	-	37,63
	Área da Seção Transversal (m^2)	1.229,22	-	225,08
	Largura (m)	211,94	-	42,55
	Velocidade (m/s)	0,76	-	0,19
	Profundidade (m)	5,80	-	5,30
2ª Medição	Vazão (m^3/s)	220,24	-	19,56
	Área da Seção Transversal (m^2)	384,31	-	157,01
	Largura (m)	187,99	-	40,91
	Velocidade (m/s)	0,08	-	0,14
	Profundidade (m)	2,04	-	3,84
3ª Medição	Vazão (m^3/s)	442,95	5,41	19,38
	Área da Seção Transversal (m^2)	464,56	38,75	227,31
	Largura (m)	160,06	22,43	49,65
	Velocidade (m/s)	0,89	0,15	0,09
	Profundidade (m)	2,90	1,66	4,58
4ª Medição	Vazão (m^3/s)	929,00	-	23,00
	Área da Seção Transversal (m^2)	930,74	-	246,00
	Largura (m)	172,53	-	52,29
	Velocidade (m/s)	1,04	-	0,11
	Profundidade (m)	5,39	-	9,70

5.3 Tempo de Transição da Fase Carbonácea para a Nitrogenada

O tempo médio necessário para a decomposição da matéria orgânica presente na água do Rio Araguari, e para que ocorra a transição da fase carbonácea para a nitrogenada (TTFC/N), é relativamente heterogêneo, variando de quatro a sete dias (**Tabela 5.2**).

Tabela 5.2: Tempo de transição da fase carbonácea para a nitrogenada no Rio Araguari.

Estação Climática	TTFC/N (d)	Estação Climática	TTFC/N (d)
Inverno	7,00	Inverno	4,00
Inverno	7,00	Intermediária	7,00
Inverno	7,00	Intermediária	7,00
Verão	5,00	Intermediária	7,00
Verão	5,00	Verão	5,00
Verão	7,00	Verão	5,00
Inverno	4,00	Verão	5,00
Inverno	4,00	-	-

5.4 Simulações

As simulações com o QUAL2E objetivaram, em especial, contribuir para uma gestão efetiva dessa BH. Por isso, foram criados três cenários hipotéticos: (1) a implantação de uma nova barragem a jusante da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes; (2) o crescimento das cidades de Porto Grande e Ferreira Gomes, considerando que os efluentes desses dois municípios seriam descartados in natura no Rio Araguari; na simulação desse cenário utilizou-se uma vazão elevada; e (3) o mesmo cenário anterior, alterando apenas a vazão para o valor mais baixo medido durante o período dessa pesquisa.

Nas simulações ora realizadas não foram consideradas cargas difusas, em virtude do fato do Rio Araguari ainda se encontrar em boas condições de conservação e com poucas influências antrópicas. Dessa maneira, após a calibração, o QUAL2E apresentou resultados de simulações do oxigênio dissolvido e da demanda bioquímica última de oxigênio que podem ser visualizados na **Figura 5.19**.

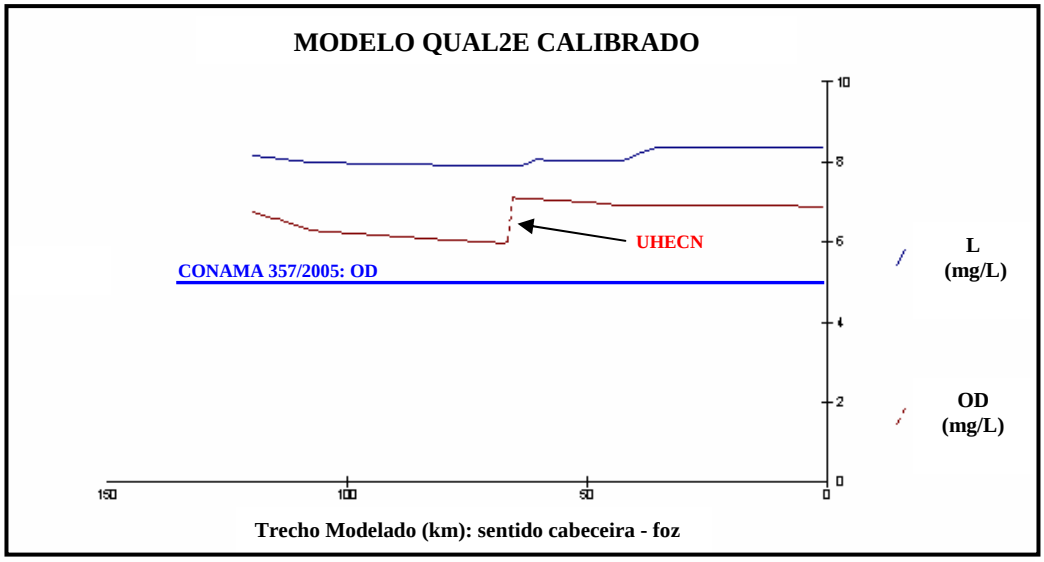


Figura 5.19: Gráfico de saída do modelo QUAL2E: após a calibração.

O que se percebe é que na atual condição do Rio Araguari, a Usina de Coaracy Nunes promove a reaeração em sua água e parece provocar um suave aumento na L a jusante da barragem. Os valores simulados pelo modelo se mostraram bastante coerentes com os medidos *in*

loco. Assim como ocorrido nos levantamentos de campo, as concentrações de OD do modelo calibrado não infringiram a Resolução 357/2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente.

5.4.1 Cenário 1

Nesse cenário, adicionou-se uma hidrelétrica com altura de 35 m a montante da UHECN, mais precisamente no Trecho 3. Na **Figura 5.20** é possível visualizar o resultado da simulação realizada.

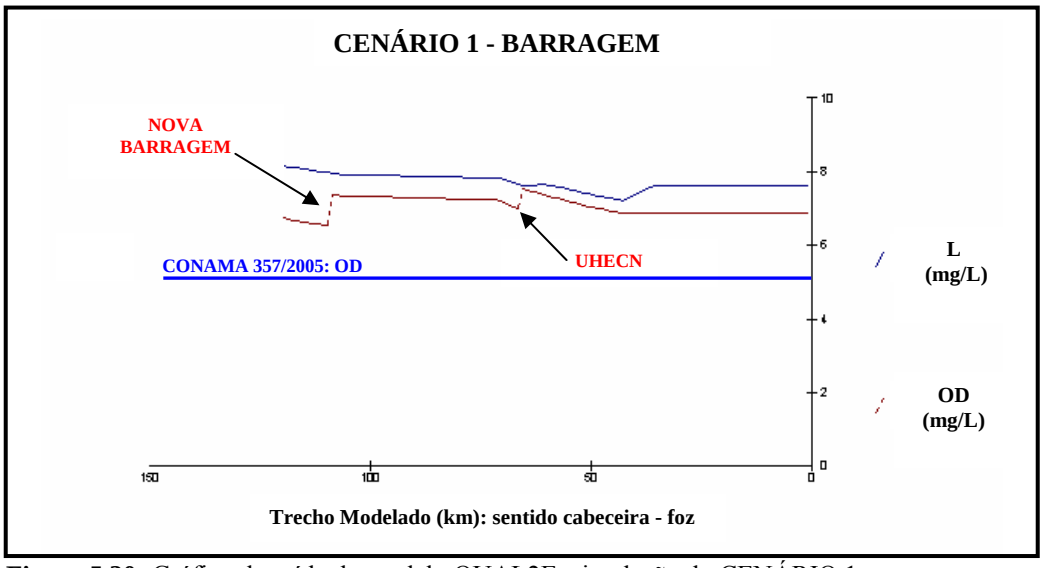


Figura 5.20: Gráfico de saída do modelo QUAL2E: simulação do CENÁRIO 1.

Verificou-se que esse empreendimento, se implantado, ocasionaria um aumento nos níveis de OD na massa hídrica em virtude da aeração provocada pela barragem. As concentrações de oxigênio passariam de aproximadamente 6,80 mg/L para 7,40 mg/L. Na seqüência, as concentrações desse gás tenderiam a diminuir até a altura da UHECN onde, então, se elevariam novamente, permanecendo relativamente constantes no sentido da foz, com valores em torno de 6,90 mg/L. Em termos de L, ocorreria a diminuição da mesma, principalmente após a UHECN, passando de 8,20 mg/L no início do trecho modelado, para 7,80 mg/L no final mesmo. A Resolução 357/2005 do CONAMA não seria infringida.

5.4.2 Cenário 2

A **Figura 5.21** apresenta o resultado da simulação do Cenário 2. Notou-se que o descarte dos efluentes originados nos municípios de Porto Grande e Ferreira Gomes, quando na condição de vazão elevada do Rio Araguari, não ocasionariam grandes impactos na água do mesmo.

Outro fato importante que merece ser mencionado é que a L se manteria relativamente constante ao longo de todo o trecho modelado, aumentando ligeiramente após a cidade de Ferreira Gomes; ao final do percurso, seu valor permaneceria na faixa dos 8,40 mg/L.

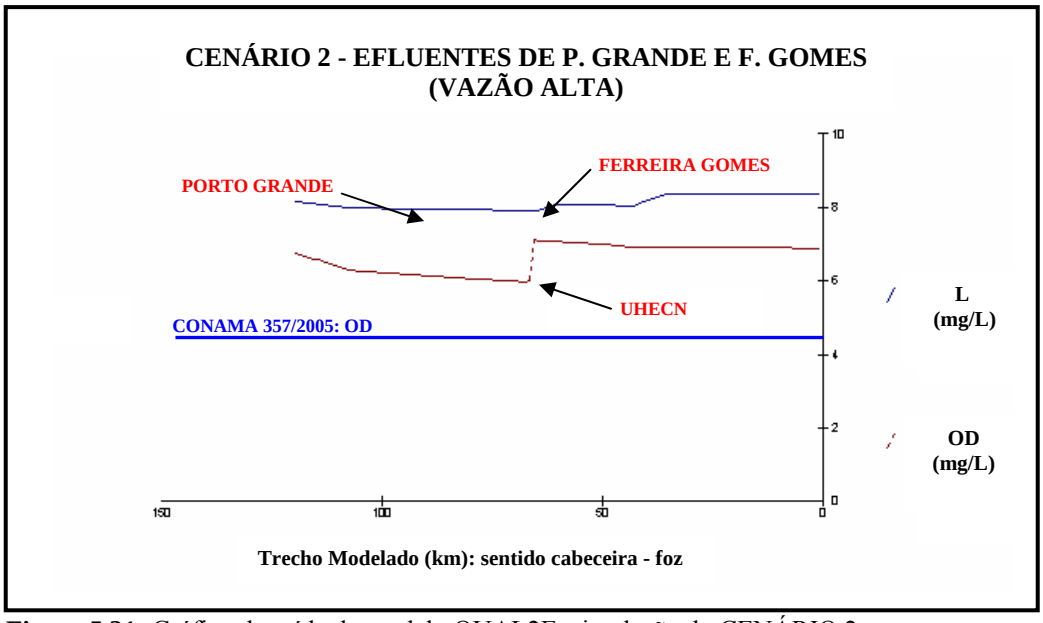


Figura 5.21: Gráfico de saída do modelo QUAL2E: simulação do CENÁRIO 2.

Em termos de oxigênio dissolvido, após o lançamento dos efluentes da cidade de Porto Grande, suas concentrações cairiam de aproximadamente 6,80 mg/L para 6,40 mg/L, diminuindo até as imediações da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes onde, após a mesma, se elevariam para um valor na faixa de 7,20 mg/L, diminuindo novamente a jusante do lançamento dos efluentes da cidade de Ferreira Gomes e permanecendo com esse mesmo comportamento no

sentido da foz do manancial. Em nenhum momento ocorreria a infração aos limites estabelecidos pela Resolução 357/2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente.

5.4.3 Cenário 3

No Cenário 3, ilustrado na **Figura 5.22**, os resultados se apresentaram mais variados. Quando simulado esse cenário utilizando a vazão de seca do Rio Araguari, o QUAL2E acusou uma maior sensibilidade do manancial. A L aumentou no sentido da foz, passando de aproximadamente 8,10 mg/L para 9,80 mg/L. Porém, no que diz respeito ao OD, o comportamento do Rio Araguari foi mais preocupante. Na estação seca, a capacidade de autodepuaração do rio diminui, fazendo com que os níveis de oxigênio caiam bastante, chegando, no trecho compreendido entre o município de Porto Grande e a barragem, a alcançar níveis abaixo de 4,00 mg/L.

A UHECN promove a elevação dos níveis de OD, que voltam a decrescer quando ocorre o despejo dos efluentes oriundos da cidade de Ferreira Gomes. O OD e a L se estabilizam no sentido da foz, permanecendo em 5,80 mg/L e 9,80 mg/L, respectivamente.

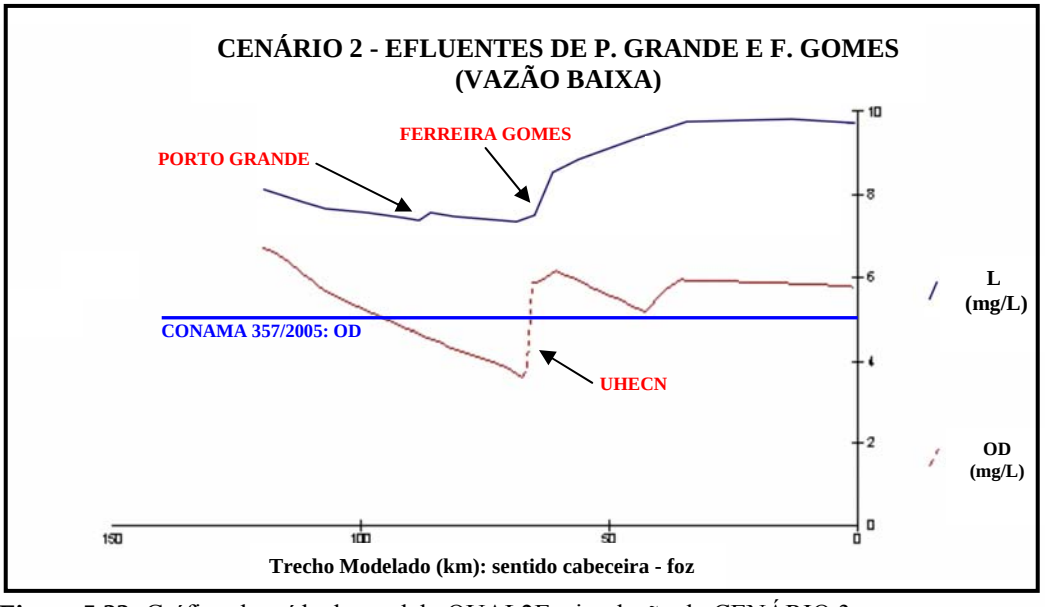


Figura 5.22: Gráfico de saída do modelo QUAL2E: simulação do CENÁRIO 3.

5.5 Análise Multivariada

A **Tabela 5.3** apresenta os resultados da análise multivariada.

Tabela 5.3: Análise multivariada dos parâmetros que mais influenciaram o K_1 no Rio Araguari.

Parâmetros de Qualidade da Água	% de Influência
Demanda Bioquímica de Oxigênio	59,89
Amônia	40,10
Oxigênio Dissolvido	0
Sólidos Totais	0
Sólidos Suspensos	0
Temperatura da Água	0
Condutividade	0
Cloreto	0
Potencial Hidrogeniônico	0
Nitrato	0
Parâmetros Hidráulicos	**% de Influência**
Vazão	0
Largura	0
Profundidade	0
Área da Seção Transversal	0
Velocidade	0

É possível perceber que os parâmetros que mais influenciaram no K_1 da água do Rio Araguari foram: a demanda bioquímica de oxigênio, em primeiro lugar (59,89%), e a amônia (40,10%). Já era esperado que a DBO5/20 fosse um dos parâmetros identificados nessa verificação. Porém, a amônia, em especial, pode estar interferindo quando no consumo de OD pelo processo de nitrificação..

5.6 Razão entre a Demanda Bioquímica de Oxigênio e a Demanda Bioquímica Última de Oxigênio

A **Tabela 5.4** apresenta os resultados da razão entre a DBO5/20 e a L. É possível perceber que, no geral, a predominância no Rio Araguari foi de matéria orgânica carbonácea, à exceção da quarta coleta.

Tabela 5.4: Razão entre a DBO5/20 e a L nas cinco coletas realizadas no Rio Araguari.

Trecho	Razão entre DBO5/20 e L - 1ª Coleta: seca	Razão entre DBO5/20 e L - 2ª Coleta: cheia	Razão entre DBO5/20 e L - 3ª Coleta: seca	Razão entre DBO5/20 e L - 4ª Coleta: intermediária	Razão entre DBO5/20 e L - 5ª Coleta: cheia
3	0,82	0,90	0,83	0,48	0,96
10	0,57	0,85	0,99	0,36	0,83
12	0,57	0,85	0,99	0,36	0,83

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 Conclusões

O Rio Araguari é um curso d'água de grandes dimensões e um dos principais recursos hídricos do Estado do Amapá, se apresentando, ainda, em bom estado de conservação. Esse rio é utilizado para vários usos humanos, tais como: abastecimento público, irrigação, geração de energia elétrica, navegação, lazer e diluição de efluentes, dentre outros. Porém, as atividades antrópicas existentes em seu curso já apresentam indícios de que as mesmas estão contribuindo para o surgimento de alterações ambientais que, se não controladas de maneira eficiente, poderão colocar em risco o futuro equilíbrio ambiental desse manancial. Foi possível detectar, durante as expedições de campo realizadas no presente estudo, alguns desses impactos, sendo eles: desmatamento, revolvimento do leito do canal principal do rio para extração de seixos, atividades de mineração para obtenção de pedras ornamentais, represamento do corpo hídrico para fins de geração de energia elétrica (o que provocou o alagamento de extensas áreas de cobertura vegetal nativa), e a depleção da qualidade da água do corpo hídrico. Esse último impacto, em especial, foi um dos principais focos dessa pesquisa.

Na caracterização atual da qualidade da água do Rio Araguari, os parâmetros que acusaram algum tipo de alteração devido à utilização desse manancial para fins de diluição de efluentes foram: potencial hidrogeniônico, condutividade, sólidos totais, sólidos suspensos, coliformes termotolerantes, amônia, nitrato, demanda bioquímica de oxigênio e oxigênio dissolvido. Ao longo do percurso modelado, os trechos situados nas imediações dos municípios de Porto Grande e principalmente de Ferreira Gomes e da UHECN, foram os que apresentaram maior incidência de diminuição da qualidade da água. Foi observado, também, que nas variações sazonais, de maneira geral, o Rio Araguari se mostrou mais suscetível à depleção desses parâmetros durante a estação seca, quando sua capacidade de diluição é menor.

Quando comparados com os limites definidos na Resolução 357/2005 do CONAMA, os parâmetros que mais infringiram esse instrumento jurídico foram: potencial hidrogeniônico,

coliformes termotolerantes, nitrato e demanda bioquímica de oxigênio. Todavia, ao que tudo indica, apesar da influência humana existente dentro dos limites dessa BH, o Rio Araguari possui algumas características que, mesmo estando em desacordo com os padrões estabelecidos pelo CONAMA, são naturais da própria região.

A matéria orgânica apresentou-se, independente das variações sazonais, como sendo, em sua maior parte, de origem carbonácea, ou seja, se decompondo nos primeiros cinco dias de incubação das amostras.

Os parâmetros de qualidade da água que apresentaram uma relação com a vazão do Rio Araguari foram temperatura da água, coliformes termotolerantes e cloreto.

No tocante aos impactos ambientais causados no Rio Araguari devido ao seu uso para a geração de energia elétrica, a Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, localizada nas proximidades do município de Ferreira Gomes, tem provocado algumas interferências que alteram não somente a qualidade da água desse manancial (principalmente no que diz respeito ao potencial hidrogeniônico, condutividade, temperatura da água, sólidos totais, sólidos suspensos, coliformes termotolerantes, nitrato, cloreto, demanda bioquímica de oxigênio e oxigênio dissolvido), mas também as suas características hidráulicas, em especial: vazão, velocidade, largura e área da seção transversal. Esse empreendimento foi edificado em uma época em que ainda não havia a exigência de estudos de impacto ambiental; assim, uma grande área foi alagada sem que fosse feita a remoção da cobertura vegetal (sendo que até hoje é possível detectar a presença de muitas árvores mortas dentro do reservatório), o que pode ter afetado consideravelmente a qualidade da água desse rio, principalmente no que diz respeito à amônia, que se apresenta muito elevada quando nos primeiros anos pós-edificação da barragem, em virtude da decomposição da biomassa oriunda da flora submersa.

É importante salientar que a coleta de dados em campo esbarrou em várias limitações, não somente de ordem humana, mas também logística e financeira. Levantamentos dessa natureza requerem uma estrutura mais bem preparada, principalmente no que tange às análises laboratoriais, que devem ser conduzidas com rigor e rapidez por profissionais

especializados, visando a consistência dos dados e uma maior coerência entre valores medidos e calculados; mesmo assim, sempre existirá uma faixa de erro humano, embora o objetivo deva ser sempre o de minimizá-los.

O Modelo QUAL2E, um dos mais utilizados no mundo em estudos de qualidade da água, é uma ferramenta que pode auxiliar no gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari. Apesar de suas limitações, o mesmo ainda é tido por inúmeros pesquisadores como um dos mais confiáveis instrumentos no gerenciamento de recursos hídricos. Esse modelo pode ser utilizado em estudos mais abrangentes relativos a esse mesmo rio.

A simulação do Cenário 1 indicou que a implantação de mais uma hidrelétrica a montante da UHE de Coaracy Nunes não provocaria impactos negativos na qualidade da água do Rio Araguari em termos de OD e DBO5/20, não sendo possível garantir esse mesmo comportamento no que tange aos demais parâmetros de qualidade da água medidos. Entretanto, os impactos ambientais decorrentes das alterações hidráulicas seriam grandes, principalmente porque a região estudada é muito plana, sendo que o barramento da água provocaria o alagamento de extensas áreas de mata nativa, o que poderia gerar uma redução considerável na biodiversidade local, além de alterações no microclima da região.

Os Cenários 2 e 3 permitiram verificar que caso a população dos municípios de Porto Grande e Ferreira Gomes cresçam a uma taxa de 1,7% ao ano, e que os mesmos continuem descartando seus efluentes nas águas do Rio Araguari sem nenhum tipo de tratamento, os níveis de DBO5/20 não seriam alterados a valores preocupantes. Todavia, as concentrações de OD poderiam vir a infringir a Resolução 357/2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente, principalmente na época de seca, quando a capacidade de diluição desse corpo d'água diminui. Por isso, o crescimento das cidades situadas às margens do manancial estudado deve ser acompanhado de sistemas de tratamento de esgoto, visando a minimização da depleção futura da qualidade de suas águas.

Muitos outros cenários podem ser simulados com o auxílio do QUAL2E, dependendo da necessidade dos órgãos interessados no gerenciamento desse recurso hídrico.

As informações contidas na presente dissertação são oriundas de fontes esparsas, uma vez que as instituições especializadas e a literatura em geral são carentes em dados referentes a essa BH, o que faz com que o documento ora apresentado seja considerado como uma compilação valorosa de dados referentes ao Rio Araguari, em especial ao seu médio curso. Além disso, a não existência de pesquisas dessa natureza dentro dos domínios da Floresta Amazônica faz com que esse trabalho assuma um caráter inédito na comunidade científica, uma vez que o mesmo realizou a modelagem matemática com o QUAL2E em um dos biomas mais importantes do mundo; porém, um dos menos estudados nos moldes aqui abordados: a Amazônia.

6.2 Sugestões

Sugere-se que o presente estudo tenha continuidade, visando ampliar sua abrangência e minimizar suas carências, de tal forma que cada vez mais seja possível entender as dinâmicas hidráulicas e de qualidade da água do Rio Araguari. Além disso, pesquisas dessa natureza podem e devem ser desenvolvidas dentro da Floresta Amazônica como um todo, uma vez que a mesma é pouco estudada no que diz respeito à modelagem da qualidade das águas de suas coleções hídricas.

Para que sejam minimizados os problemas de degradação ambiental ora detectados na bacia hidrográfica pesquisada (como a extração clandestina de seixos do rio, por exemplo), sugere-se implementar ações fiscalizadoras que objetivem coibir e eliminar esse tipo de exploração ambiental. Uma saída seria a criação do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari, o que auxiliaria no seu gerenciamento.

É necessário, também, que se promovam mais estudos capazes de avaliar outros impactos gerados pela UHECN no que tange a diferentes aspectos ambientais (como a biota, por exemplo), aproveitando que esse empreendimento se encontra implantado em uma região rica em biodiversidade, e que o mesmo pode servir de exemplo para que problemas futuros sejam

evitados quando na edificação de novas obras dessa natureza dentro dos domínios da Floresta Amazônica.

Sugere-se, ainda, que seja feito o monitoramento constante dos parâmetros hidráulicos e de qualidade da água do Rio Araguari, devendo o mesmo permanecer através do tempo, de tal forma que seja possível estabelecer séries históricas referentes a esse corpo hídrico, principalmente no que concerne aos parâmetros de qualidade da água. Dessa forma, será possível alimentar os modelos matemáticos em simulações futuras com dados ainda mais consistentes, o que garantirá respostas cada vez mais confiáveis.

Por fim, é sugerido que o Estado do Amapá estabeleça padrões próprios de qualidade das águas de seus rios, uma vez que as condições bióticas e abióticas dessa região parecem propiciar características hídricas que não se encaixam nos limites estabelecidos pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente, o que não quer dizer, necessariamente, que os rios amapaenses estão poluídos, mas sim que os mesmos apresentam características diferentes dos demais cursos d'água localizados em outras regiões do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRISHAMCHI, A.; TAJRISHY, M.; SHAFIEIAN, P. **Uncertainty Analysis in QUAL2E Model of Zayandeh-Rood River.** In: Water Environment Research. v. 77. n. 3. 279 - 286. 2005.

ALBANO, G.D.; PORTA, R.L.L. **Aplicação Integrada de Modelos Matemáticos de Qualidade e de Quantidade de Água:** o caso das represas Jaguari-Jacareí no Sistema Cantareira. 2005.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Panorama da Qualidade das Águas Superficiais do Brasil.** Cadernos de recursos hídricos. Brasília, DF: ANA [et al.]. v. 1. 175 p. 2005.

ANDREAZZI, M.A.R. **Impactos de Hidrelétricas para a Saúde da Amazônia.** Rio de Janeiro, RJ: UERJ. Série Estudos em Saúde Coletiva. n. 78. 1993.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **O Estado das Águas no Brasil - 1999:** perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos. Brasília, DF: MME [et al.]. 334 p. 1999.

_____. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos.** Brasília, DF: ANA/ANEEL. 3. ed. 326 p. 2002.

_____. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** Brasília, DF: ANEEL. 2. ed. 243 p. 2005.

ARAÚJO, F.F.V.; CASTRO, M.A.H.; FIGUEIREDO, M.C.B. **Simulação da Qualidade da Água em Trecho de Rio Sujeito a Lançamento de Efluentes da Carcinicultura.** In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais. João Pessoa, PB: ABRH. 2005.

ARAÚJO, J.C.; SANTAELLA, S.T. **Gestão da Qualidade.** In: Gestão das Águas. Nilson Campos e Ticina Studart (Edit.). Porto Alegre, RS: ABRH. 2. ed. 242 p. 2001.

ATKINSON, J.F.; BLAIR, S.; TAYLOR, S.; GHOSH, U. **Surface Reaeration.** In: Journal of Environmental Engineering. 113 - 118. 2004.

BARBOSA Jr., A.R. **Desenvolvimento de Metodologia para Determinação do Coeficiente de Reaeração dos Escoamentos Naturais da Água com o Emprego de Traçador Gasoso.** Dissertação de Mestrado. São Carlos, SP: USP. 187 p. 1989.

_____. **Uso de Traçadores na Determinação de Parâmetros de Qualidade em Escoamentos Superficiais de Água.** Tese de Doutorado. São Carlos, SP: USP. 457 p. 1997.

BARBOSA Jr., A.R.; GIORGETTI, M.F. **Reaeração de Corpos de Água Naturais** - uma metodologia para quantificação com o uso de traçadores. In: 18° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais. Salvador, BA. 1995.

BARNWELL Jr., T.O.; BROWN, L.C.; WHITTEMORE, R.C. **Importance of Field Data in Stream Water Quality Modeling Using QUAL2E - UNCAS.** In: Journal of Environmental Engineering. 2004.

BELLOS, D.; SAWIDIS, T. **Chemical Pollution Monitoring of the River Pinios (Tesalia - Greece).** In: Journal of Environmental Management. 282 - 292. 2005.

BENNETT, J.P.; RATHBUN, R.E. **Reaeration in Open Channel Flow.** U. S. Geological Survey Professional Paper. 737 p. 1972.

BITTENCOURT, A.G.; PEREIRA, C.A.A.O.; OLIVEIRA, L.H.W.; NOGUEIRA, W.J.; TORSANI, J.S.; LORAMIE, R.L.; MERCER, G.W. **Modelagem Matemática do Rio Tietê com Modelo QUAL2EU para Preparação do Projeto Tietê.** In: 18º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais. Salvador, BA. 1995.

BOWIE, L.G.; MILLIS, W.B.; PORCELLA, D.B.; CAMPELL, C.L.; PAGENKOPF, J.R.; RUPP, G.L.; JOHNSON, K.M.; CHAN, P.W.H.; GHERINI, S.A. **Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling.** Athens, Geórgia: EPA. 1985.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J.G.L.; BARROS, M.T.L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental.** São Paulo, SP: Prentice Hall. 305 p. 2002.

BRANDÃO, M.E.F. **Modelo Dinâmico de Qualidade e Escoamento de Água como Mecanismo para Implementação de Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos.** Tese de Doutorado. Brasília, DF: UnB. 216 p. 2003.

BROWN, L.C.; BARNWELL, T.O. **The Enchanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E - UNCAS:** documentation and user manual. Athens, Georgia. 1987.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório da Qualidade das Águas do Estado de São Paulo.** São Paulo, SP: CETESB [et al.]. v. 2. 214 p. 2000.

CHAPRA, S.C. **Surface Water-Quality Modeling.** New York, NY: McGraw-Hill. 844 p. 1997.

CIRAVOLO, L.; INDELICATO, S.; VIVIANI, G. **Stream Water Quality Models:** an application to the Simeto river basin. In: Measurements and Modeling Environmental Pollution. 53 - 62. 2000.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução n° 001, de 21 de janeiro de 1986.** Disponível em: <http://www.lei.adv.br/001-86.htm>. Acesso em 20/4/2006, às 15:18.

_____. **Resolução n° 357, de 18 de junho de 2005.** Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>. Acesso em: 25/7/2006, às 10:08.

COX, B.A. A **Review of Currently Available In-Stream Water-Quality Models and their Applicability for Simulating Dissolved Oxygen in Lowland.** In: 8th IAWQ River Basin Conference. Budapest, Hung. 335 - 377. 2003.

CUNHA, A.C. **Monitoramento, Parâmetros e Controle da Qualidade da Água** - curso para engenheiros e técnicos das Unidades de Monitoramento (OEMAs). Macapá, AP: PPG7 [et al.]. 88 p. 2000.

_____. **Análise Numérica dos Processos de Autodepuração e Reoxigenação do Rio Araguari para Avaliação de Impactos Ambientais.** Macapá, AP. 2003.

_____. **Dossiê sobre a Implementação do Centro de Monitoramento e Previsão de Tempo, Clima e Recursos Hídricos do Estado do Amapá.** Macapá, AP: IEPA/LABHIDRO. 91 p. 2004.

CUNHA, A.C.; SIQUEIRA, E.Q; CUNHA, H.F.A. **Avaliação das Equações de Previsão do Coeficiente de Reaeração no Modelo QUAL2E para Modelagem de Oxigênio Dissolvido:** estudo de caso no ribeirão do Feijão (São Carlos - SP). In: Revista de Ciência e Tecnologia do Estado do Amapá. Macapá, AP: UNIFAP. v. 2. n. 1. 90 - 111. 2001.

DAI, T.; LABADIE, J.W. **River Basin Network Model for Integrated Water Quantity/Quality Management.** In: Journal of Water Resources Planning and Management. 295 - 305. 2001.

Decreto 88.351, de 1º de junho de 1983. In: Coletânea de Legislação de Direito Ambiental - Constituição Federal. Odete Medauar (Org.). São Paulo, SP: Revista dos Tribunais. 4. ed. 1117 p. 2005.

DROLC, A.; KONCAN, J.Z. **Calibration of QUAL2E Model for the Sava River (Slovenia).** In: Water Science and Technology. v. 40. n. 10. 111 - 118. 1999.

DUSSAILLANT, A.; MUNOZ, J.F.; SAEZ, P.; PANTOJA, C. **Water Quality Modeling of Mapocho River, Chile, Using QUAL2E - UNCAS.** In: 4th International Conference on Water Pollution. Lake Bled, Slovenia. 567 - 576. 1997.

EDGAR, R.; SANTOS, T. **Oxigênio Dissolvido**. Escola Superior de Engenharia de Portugal. Disponível em: <www.isel.ipl.pt>. Acesso em: 20/6/2006, às 12:10. 9 p. 1999.

EIGER, S. **Autodepuração dos Cursos D'água.** In: Reuso de Água. Barueri, SP: Manole [et al.]. 579 p. 2003.

ELETRONUCLEAR - ELETROBRAS TERMONUCLEAR S/A. **A Energia Nuclear:** história e princípios de funcionamento. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br>. Acesso em: 10/7/2006, às 13:15.

ELETRONORTE - CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S/A. **Usina de Coaracy Nunes:** primeira hidrelétrica da Amazônia completa 30 anos. Disponível em: <http://www.eln.gov.br/Usinas/Coaracy_Nunes/index.asp>..Acesso em 15/7/2006, às 15:27.

EPA - United States Environmental Protection Agency. **Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling.** Athens, Georgia. 2. ed. 455 p. 1985.

ESTEVES, F.A. **Fundamentos da Limnologia.** Rio de Janeiro, RJ: Interciência. 1988.

FEPAM - FUDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUÍS ROESSLER. **Qualidade das Águas do Rio Gravataí -** período 1992 a 1994. Porto Alegre, RS: FEPAM. 66 p. 1996.

FERNANDES, C. **Esgotos Sanitários.** João Pessoa, PB: Editora Universitária. 435 p. 1997.

FILIZOLA Jr., N.P.; GUIMARÃES, V.S.; GUYOT, J.L. **Medição de Vazão em Grandes Rios -** uso do Perfilador Doppler-Acústico de Corrente. In: O Estudo das Águas no Brasil - 1999: perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos. Brasília, DF: ANEEL [et al.]. 334 p. 1999.

FINK, D.R.; SANTOS, H.F. **A Legislação de Reuso de Água.** In: Reuso de Água. Barueri, SP: Manole [et al.]. 579 p. 2003.

FISHER, E.G. **Determinação de Contaminação do Ribeirão do Feijão Através de Levantamento de Dados e Modelo Matemático de Qualidade da Água.** Dissertação de Mestrado. São Carlos, SP: USP. 1995.

GASTALDINI, M.C.C.; SEFRIN, G.F.F.; PAZ, M.F. **Diagnóstico Atual e Previsão Futura da Qualidade das Águas do Rio Ibicuí Utilizando o Modelo QUAL2E.** Engenharia Sanitária e Ambiental: revista da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, RJ. v. 7, n. 3/4. p. 129 - 138. 2002.

GHOSH, N.C.; MCBEAN, E.A. **Water Quality Modeling of the Kali River, Índia**. Water, Air, and Soil Pollution. 91 - 103. 1998.

GOULDING, M. **História Natural dos Rios Amazônicos.** Brasília, DF: Sociedade Civil de Mamirauá [et al.]. 208 p. 1997.

HANAN, S.A.; BATALHA, B.H.L. **Amazônia:** contradições no paraíso ecológico. São Paulo, SP: Cultura. 265 p. 1995.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Avaliação de Impacto Ambiental:** agentes sociais, procedimentos e ferramentas. Brasília, DF: MMA. 134 p. 1995.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Informações do**

estado do Amapá. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=ap>. Acesso em: 14/7/2006, às 8:31.

JANNUZZI, G.M.; GOUVELLO, C.; CAURET, L. **A Evolução do Gerenciamento do Lado da Demanda do Setor Elétrico Público:** um estudo comparativo entre o Brasil e a França. In: Revista Brasileira de Energia. Rio de Janeiro, RJ: SBPE [et al.]. v. 6. n. 1. 145 p. 1999.

JORDÃO, E.P.; PESSÔA, C.A. **Tratamento de Esgotos Domésticos.** Rio de Janeiro, RJ: ABES. 3. ed. 681 p. 1995.

JUNK, W.; NUNES, J.A.S. **Impactos Ecológicos das Represas Hidrelétricas na Bacia Amazônica Brasileira.** G. Kohlhepp e A. Schrader (Org.). p. 387 - 404. 1987.

KITAMURA, P.C. **A Amazônia e o Desenvolvimento Sustentável.** Brasília, DF: EMBRAPA. 182 p. 1994.

LANNA, A.E.L. **Usos Múltiplos da Água.** In: Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Rubem La Laina Porto (Org.). Porto Alegre, RS: UFRGS. 2. ed. 420 p. 2002.

LARAMIE, S.A.; MARIVOET, J.; VANOUPLINES, P. **Application of QUAL2E and QUAL2E Models to the Densu River Basin in Ghana.** In: H. Laikari (Edit.). River Basin Management. Pergamon Press. New York, N.Y. 1989.

LEE, M.S. **Development of Sustainable Watershed Management Strategies for the Chiang-Chun River Basin.** Tese de Doutorado. National Sun Yat-Sen University: Taiwan. 2005.

LEI 0686, de 07 de junho de 2002. In: Políticas de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado do Amapá. Macapá, AP: GEA/SEMA. 59 p. 2002.

LEI 6.938, de 31 de agosto de 1981. In: Coletânea de Legislação de Direito Ambiental - Constituição Federal. Odete Medauar (Org.). São Paulo, SP: Revista dos Tribunais. 4. ed. 1117 p. 2005.

LEI 9.433, de 8 de janeiro de 1997. In: Recursos Hídricos - conjunto de normas legais. Brasília, DF: MMA. 3. ed. 243 p. 2004.

LIMA, E.B.N. **Modelação Integrada para Gestão da Qualidade da Água na Bacia do Rio Cuiabá.** Tese de Doutorado. Rio de Janeiro, RJ: UFRJ. 184 p. 2001.

LITWACK, H.S.; DILORENZO, J.L.; HUANG, P.; MASCE, T.O.N. **Development of a Simple Phosphorus Model for a Large Urban Wastershed:** a case study. In: Journal of Environmental Engineering. ASCE. 2006.

LUNG, W.S.; SOBECK Jr., R.G. **Renewed Use of BOD/DO Models in Water Quality Management.** In: Journal of Water Resources Planning and Management. 222 - 227. 1999.

MANSON, J.R.; WALLIS, S.G. **A Conservative, Semi-Lagrangian Fate and Transport Model for Fluvial Systems - I:** theoretical development. In: Elsevier Science: PERGAMON. v. 34. n. 15. 3796 - 3777. 2000.

MARGULIS, S. **Meio Ambiente:** aspectos técnicos e econômicos. Brasília, DF: PNDU. 1996.

MARK, O.; WEESAKUL, S.; LUKETINA, D.; LASARTE, A.E. **Modelação e Gestão em Tempo Real de Águas e Ambiente Urbano.** In: III Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste. Livro de Resumos. Goiânia, GO: ANA [et al.]. 141 p. 2004.

MCAVOY, D.C.; MASSCHELEYN, P.; PENG, C.; MORRALL, S.W.; CASILLA, AB.; LIM, J.M.U.; GREGORIO, E.G. **Risk Assessment Approach for Untreated Wastewater Using the QUAL2E Water Quality Model**. 2002.

MCCUTCHEON, S.C.; FRENCH, R.H. **Water Quality Modeling -** transport and surface exchange in rivers. v. 1. Boca Raton, Florida: CRC. 325 p. 1989.

MELCHING, C.S.; YOON, C.G. **Key Sources of Uncertainty in QUAL2E Model of Passaic River.** In: Water Resource Plan Manage. v. 122. n. 2. 105 - 113. 1996.

MENDONÇA, A.S.F. **Application of the QUAL2E Model to Environmental Impact Assessment.** In: Advances in Hydro Science and Engineering. v. 1. n. 2. 349 - 354. 1992.

MENDONÇA, A.S.F.; PEREIRA, C.B.; CASTRO, C.B.C.; RIGO, D.; TEIXEIRA, E.C.; NEGRI, F.R.; CHACALTANA, J.T.A.; STANZANI, L.; SALOMÃO, L.A.S.; SANTOS, M.A.R.; PEREIRA, T.V.; CRISTELO, V.P. **Desenvolvimento de Sistema de Suporte à Decisão para Subsídio à Outorga de Uso de Água de Rios:** fontes pontuais e difusas. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais. João Pessoa, PB: ABRH. 2005.

METCALF; EDDY, C. **Wastewater Engineering:** treatment, disposal, and reuse. Singapura: McGraw - Hill. 1991.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Identificação de Áreas Prioritárias para a Criação de Florestas Nacionais na Amazônia Legal.** Brasília, DF: MMA [et al.]. 56 p. 2000.

_____. **Fragmentação de Ecossistemas -** causas, efeitos sobre a biodiversidade e recomendações de políticas públicas. Série Biodiversidade. Brasília, DF: MMA [et al.]. v. 6. 508 p. 2003.

_____. **Recursos Hídricos -** conjunto de normas legais. Brasília, DF: MMA. 3. ed. 243 p. 2004.

_____. **Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.** Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/port/srh/sistema/>. Acesso em: 24/7/2006, às 12:15.

MOHAMED, M.; STEDNICK, J.D.; SMITH, F.M. **Comparison of Field Measurements to Predicted Reaeration Coefficients, K_2, in the Application of a Water Quality Model, QUAL2E, to a Tropical River.** In: Water Science and Technology. v. 46. n. 9. 47 - 54. 2002.

MUJUMDAR, P.P.; VEMULA, V.R.S. **Fuzzy Waste Load Allocation Model:** simulation-optimization approach. In: Journal of Computing in Civil Engineering. ASCE. 2004.

MOTA, S. **Introdução à Engenharia Ambiental.** Rio de Janeiro, RJ: ABES. 3. ed. 419 p. 2003.

MWANUZI, F.L. **Assessment of Water Quality for Pangani River in Tanzania Using QUAL2E Windows Version.** In: Warfsa/Waternet Symposium: Sustainable Use of Water Resources. 1 - 10. 2000.

NETO, A.F.V. **Aplicação do Modelo QUAL2E no Rio Barigui.** Dissertação de Mestrado. Curitiba, PR: UFPR. 2003.

NETO, C.O.A. **Sistemas Simples para Tratamento de Esgotos Sanitários:** experiência brasileira. Rio de Janeiro, RJ: ABES. 301 p. 1997.

NETTO, O.M.C.; TUCCI, C.E.M.; SANTOS, D.M.; SANTOS, M.M. **Ciência, Tecnologia e Inovação:** questões emergentes na área de recursos hídricos. In: III Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste. Livro de Resumos. Goiânia, GO: ANA [et al.]. 141 p. 2004.

NING, S.K.; CHANG, N.B.; YANG, L.; CHEN, H.W.; HSU, H.Y. **Assessing Pollution Prevention Program by QUAL2E Simulation Analysis for the Kao-Ping River Basin, Taiwan.** In: Journal Environ Manage. 61 - 76. 2001.

NUNES, A.B.A. **Avaliação da Qualidade das Águas do Baixo Rio Bodocongó (PB) e da Capacidade Preditiva de OD e DBO pelo Modelo Computacional QUAL2E.** Dissertação de Mestrado. João Pessoa, PB: UFPB. 2000.

NUVOLARI, A. **O Lançamento *In Natura* e seus Impactos.** In: Esgoto Sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola. Ariovaldo Nuvolari (Coord.). São Paulo, SP: FATEC-SP [et al.]. 520 p. 2003.

OLIVEIRA, M.D.; CALIJURI, M.C. **Estimate of the Rate of Primary Production in two Lotic Systems, Based on Hourly Change of Dissolved Oxygen -** Itaqueri and Lobo rivers (São Paulo state). In: An. Acad. Bras. v. 68. 1996.

ORDEN, G.N.V.; UCHRIN, C.G. **The Study of Dissolved Oxygen Dynamics in the Whippany River, New Jersey Using the QUAL2E Model.** In: Ecological Modeling. v. 70. 1- 17. 2003.

ORENS, T.I. **Quality Assurance in Modeling and Simulation.** In: Simulation and Model Base

Methodologies: an integrated view. Series n. 10. 1984.

PALMIERI, V. **Calibração do Modelo QUAL2E para o Rio Corumbataí (SP).** Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, RJ: PUC/RJ. 2004.

PEREIRA, C.B.; TEIXEIRA, E.C. **Influência dos Métodos de Estimativa do Coeficiente de Dispersão Longitudinal de Qualidade de Água em Rios Devido a Lançamentos Instantâneos e Contínuos de Constituintes Potencialmente Poluidores.** In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais. Belo Horizonte, MG. 1999.

PEREIRA, T.V.; MENDONÇA, A.S.F. **Aplicação de Modelagem Computacional na Simulação de Parâmetros de Qualidade da Água Relacionados com Nitrogênio em Curso D'água.** In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais. João Pessoa, PB: ABRH. 2005.

PINHEIRO, M.C.N.; GUIMARÃES, G.A.; NAKANISHI, J.; TEIICHI, O.; VIEIRA, J.L.; QUARESMA, M.; CARDOSO, B.; AMORAS, W. **Avaliação da Contaminação Mercurial Mediante Análise do Teor de Hg Total em Amostras de Cabelo em Comunidades Ribeirinhas do Tapajós, Pará, Brasil.** In: Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical. 2000. v. 2. n. 33. 181-184. Disponível em: <http://www.cepis.ops-oms.org/bvstox/p/fulltext/teor/teor.pdf>. Acesso em: 15/7/2006, às 11:10.

PORTO, R.L.L.; AZEVEDO, L.G.T. **Sistemas de Suporte a Decisões Aplicados a Problemas de Recursos Hídricos.** In: Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Rubem La Laina Porto (Org.). Porto Alegre, RS: UFRGS. 2. ed. 420 p. 2002.

PREFEITO, L.F.B.; MAUAD, F.F. **O Atual Modelo do Setor Elétrico Brasileiro.** In: III Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste. Livro de Resumos. Goiânia, GO: ANA [et al.]. 141 p. 2004.

PROVAM - **Programa de Estudos e Pesquisas nos Vales Amazônicos.** Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia. Belém, PA: SUDAM/OEA. v. 1. 189 p. 1990.

QUEIROZ, G.H.; SOUZA, R.S.; PANQUESTOR, E.K. **Interfaces do Licenciamento Ambiental e da Gestão de Recursos Hídricos:** o caso da UHE Corumbá IV. In: III Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste. Livro de Resumos. Goiânia, GO: ANA [et al.]. 141 p. 2004.

RAUCH, W.; HENZE, M.; KONCSOS, L.; REICHERT, P.; SHANAHAN, P.; SOMLYÓDY, L.; VANROLLEGHEM, P. **River Water Quality Modeling:** I - state of the art. In: Water Science of Technology: Elsevier Science. v. 38. n. 11. 237 - 244. 1998.

REBOUÇAS, A. C. **Água Doce no Mundo e no Brasil.** In: Águas Doces no Brasil - capital ecológico, uso e conservação. Aldo da C. Rebouças [et al.] (Org.). São Paulo, SP. 2 ed. 703 p. 2002.

_____. **Uso Inteligente da Água.** São Paulo, SP: Escrituras. 207 p. 2004.

RIBEIRO, B.G. **Amazônia Urgente -** cinco séculos de história e ecologia. Belo Horizonte, MG: Itatiaia. 272 p. 1990.

RODRIGUES, A.C.; COELHO, P.S.; SILVA, S.P.; FONSECA, M.R.; DIOGO, P.A. **Modelação da Qualidade da Água na Bacia Hidrográfica do Rio Ave.** In: 6º Congresso da Água de Portugal. Anais. Alfândega, Portugal: APRH. 2002.

RODRIGUES, R.B. **Sistema de Suporte à Decisão Proposto para a Gestão Quali-Quantitativa dos Processos de Outorga e Cobrança pelo Uso da Água.** Tese de Doutorado. São Paulo, SP: USP. 155 p. 2005.

ROSMAN, P.C.C. **Referência Técnica do SISBAHIA.** Rio de Janeiro, RJ: PUCRJ. 2005.

RUTHERFORD, J.C. **Desoxygenation in a Mobile-Bed River - II.** Model Calibration and Post-Audit. Water Research. v. 5. n. 12. 1499 - 1508. 1991.

SANTOS, S.C.; NACKE, A. **A ELETRONORTE e os Projetos Hidrelétricos.** In: O cerco está se fechando. Jean Hébette (Org.). Petrópolis, RJ: FASE [et al.]. 347 p. 1991.

SEMA/SP - SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE. **A Qualidade das Águas.** Série Manuais Ambientais. São Paulo, SP: CETESB [et al.]. 2. ed. 44 p. 2000.

SEWELL, G.H. **Administração e Controle da Qualidade Ambiental.** São Paulo, SP: EPU [et al.]. 295 p. 1978.

SHANAHAN, P.; BORCHARDT, D.; HENZE, M.; RAUCH, W.; REICHERT, P.; SOMLYÓDY, L.; VANROLLEGHEM, P. **River Water Quality Model nº 1 (RWQM1):** I - modeling approach. In: Water Science of Technology. v. 43. n. 5. 1 - 9. 2001.

SILVA, G.S.; JARDIM, W.F. **Um Novo Índice de Qualidade das Águas para Proteção da Vida Aquática Aplicado ao Rio Atibaia, Região de Campinas/Paulínia - SP.** In: Revista Química Nova. v. 29. n. 4. 689 - 694. 2006.

SIQUEIRA, E.Q. **Aplicação do Modelo de Qualidade de Água (QUAL2E) na Modelação de Oxigênio Dissolvido no Rio Meia Ponte (GO).** Dissertação de Mestrado. São Carlos, SP: USP. 90 p. 1996.

SMEWW - **STANDART METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER.** Washington, EUA: APHA [et al.]. 1992.

SPERLING, M.V. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. Série Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Belo Horizonte, MG: UFMG. v. 1. 2. ed. 243 p. 1996.

STRAM, D.L.; KINCAID, C.R.; CAMPBELL, D.E. **Water Quality Modeling in the Rio**

Chone Estuary. In: Journal of Coastal Research. v. 21. n. 4. 797 - 809. 2005.

STREETER, H.W.; PHELPS, E.B. **A Study of the Natural Purification of the Ohio River.** Public Bulletin 146. Public Survice. Washington, USA. 1925.

TEIXEIRA, M.G.; SOUZA, R.C.; MAGRINI, A.; ROSA, L.P. **Análise dos Relatórios de Impacto Ambiental de Grandes Hidrelétricas no Brasil.** In: Previsão de Impactos. Clarita Muller-Plantenberg e Aziz Nacib Ab'Saber (Org.). São Paulo, SP: EDUSP. 569 p. 1994.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos.** Porto Alegre, RS: UFRGS [et al.]. 1. ed. 669 p. 1998.

_____. (Org.). **Hidrologia:** ciência e aplicação. Porto Alegre, RS: UFRGS. 3. ed. 943 p. 2002.

TUCCI, C.E.M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO NETO, O.M. **Gestão da Água no Brasil.** Brasília, DF: UNESCO. 190 p. 2001.

VIANA, J.P. **Physical and Chemical Post-Dam Alterations in the Jamari River, a Hydroeletric-Developed River of the Brazilian Amazon.** In: Hydrobiologia. 235 - 247. 2002.

WALTON, R.; WEBB, M. **QUAL2E Simulations of Pulse Loads.** In: Journal of Environmental Engineering. ASCE. 1017 - 1031. 1992.

ZEILHOFER, P.; LIMA, ELB.R.; SANTOS, F.M.; RIGO Jr., L.O. **Um Ambiente SIG para Modelagem Integrada da Qualidade da Água Utilizando QUAL2E.** In: Revista Caminhos da Geografia. v. 8. n. 10. 107 - 125. 2003.

ZIEGLER, T.K. **Predicting Downstream Thermal Effects Resulting from Cooling Water Discharge Using QUAL2E - UNCAS.** In: 58th American Conference. Chicago, EUA. v. 58. 881 - 886. 1996.