

ÍNDICE

<i>Item</i>	<i>Assunto</i>	<i>Página</i>
1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	1.1
1.1.	INTRODUÇÃO	1.2
1.2.	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO E ABORDAGEM GERAL	1.3
1.3.	ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	1.5
2.	CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO MADEIRA NO ESTIRÃO EM ESTUDO	2.1
2.1.	DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS REALIZADOS	2.2
2.1.1.	<u>Campanhas de Campo e Distribuição das Estações</u>	2.2
2.1.2.	<u>Variáveis Mensuradas e Metodologia de Amostragem</u>	2.6
2.2.	SUMÁRIO DOS PARÂMETROS ATUAIS DE QUALIDADE DA ÁGUA	2.8
2.2.1.	<u>Regime Fluvial</u>	
2.2.2.	<u>Variáveis Físicas, Físico-Químicas e Químicas de Interesse à Modelagem da Qualidade da Água</u>	2.9
2.2.3.	<u>Análise Bacteriológica</u>	2.17
2.3.	CONCENTRAÇÕES MEDIDAS AO LONGO DO RIO MADEIRA E TRIBUTÁRIOS	2.18
3.	CARACTERIZAÇÃO DOS FUTUROS RESERVATÓRIOS	3.1
3.1.	CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DOS RESERVATÓRIOS	3.2
3.1.1.	<u>Reservatório do AHE Jirau</u>	3.3
3.1.2.	<u>Reservatório do AHE Santo Antônio</u>	3.5
3.2.	ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE ESTRATIFICAÇÃO E EUTROFIZAÇÃO	3.6
3.2.1.	<u>Estratificação</u>	3.6
3.2.2.	<u>Eutrofização</u>	3.9
3.3.	SELEÇÃO DO MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA	3.10
4.	DETERMINAÇÃO DAS CARGAS DEVIDO AO AFOGAMENTO DA VEGETAÇÃO	4.1
4.1.	METODOLOGIA	4.2
4.2.	CÁLCULO DA BIOMASSA NA ÁREA DOS RESERVATÓRIOS	4.2
4.3.	DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CARBONO PRESENTE NA BIOMASSA	4.5
4.4.	DISCRETIZAÇÃO DA BIOMASSA VIVA ACIMA DO SOLO	4.6
4.5.	QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO OXIDÁVEL NA PARCELA RAPIDAMENTE DEGRADÁVEL	4.9
4.6.	CÁLCULO DA DENSIDADE MÉDIA DO CARBONO DEGRADÁVEL NOS RESERVATÓRIOS	4.11
4.7.	INCORPORAÇÃO DA FITOMASSA NOS RESERVATÓRIOS	4.14
4.7.1.	<u>Reservatório de Jirau</u>	4.14
4.7.2.	<u>Reservatório de Santo Antônio</u>	4.17

5	ESTABELECIMENTO DO MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA	5.1
5.1.	DESCRIÇÃO DO MODELO UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES – QUAL2E	5.2
5.1.1.	<u>Representação Conceitual do Modelo</u>	5.3
5.1.2.	<u>Representação Funcional do Modelo</u>	5.5
5.1.3.	<u>Características Hidráulicas e Dispersão Longitudinal</u>	4.7
5.1.4.	<u>Constituintes e Reações Considerados nas Simulações</u>	5.8
5.1.5.	<u>Correção da Temperatura</u>	4.11
5.2.	CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA AS CONDIÇÕES ATUAIS	5.12
5.2.1.	<u>Segmentação do Estirão Fluvial</u>	5.12
5.2.2.	<u>Características Hidráulicas dos Trechos</u>	5.15
5.2.3.	<u>Cenários Escolhidos Para Calibragem e Condições de Contorno Associadas</u>	5.16
5.2.4.	<u>Calibração dos Parâmetros</u>	5.17
5.3.	MODIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA CONSIDERAR O EFEITO DOS RESERVATÓRIOS	5.20
6.	SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NOS FUTUROS RESERVATÓRIOS	6.1
6.1.	DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS	6.2
6.2.	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO QUAL2E	6.3
6.2.1.	<u>Cenário 1 – Enchimento do Reservatório de Jirau em Primeira Adição</u>	6.3
6.2.2.	<u>Cenário 2 – Enchimento do Reservatório de Jirau em Segunda Adição</u>	6.6
6.2.3.	<u>Cenário 3 – Enchimento do Reservatório de Santo Antônio em Primeira Adição</u>	6.8
6.2.4.	<u>Cenário 4 – Enchimento do Reservatório de Santo Antônio em Segunda Adição</u>	6.8
6.2.5.	<u>Cenário 5 – Qualidade da Água dos Dois Reservatórios em Condições Operativas</u>	6.9
6.3.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	6.10
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	7.1
8.	REFERÊNCIAS	8.1

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

1.1. INTRODUÇÃO

A presente Nota Técnica tem por objetivo consolidar os estudos de modelagem matemática, realizados para caracterização dos impactos decorrentes da implantação dos Aproveitamentos Hidrelétricos de Jirau e Santo Antônio sobre a qualidade da água do rio Madeira.

Os estudos realizados cobriram todo o estirão do rio Madeira desde sua confluência com o rio Abunã, na entrada do futuro reservatório da UHE Jirau, até a confluência com o rio Jamarí, cerca de 80 km a jusante da barragem de Santo Antônio. Inserem-se em uma programação de trabalho mais abrangente, a ser complementada nas fases posteriores com novos levantamentos de campo e uma modelagem mais detalhada de cada reservatório.

Para esta etapa inicial dos estudos levou-se em consideração o escopo básico estabelecido no Termo de Referência, relativo à caracterização do meio físico na Área de Influência Direta (item 4.6.2.1) – Recursos Hídricos, onde se lê (grifos nossos):

Avaliar a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, a partir de um refinamento dos dados obtidos na bacia hidrográfica. Esse estudo deverá contar com análises de parâmetros físicos, químicos, bacteriológicos e hidrobiológicos, com a identificação das principais fontes de poluição. As estações, parâmetros, frequência e metodologias deverão ser apresentados e justificados, considerando a sazonalidade da região estudada.

*Avaliar a **qualidade da água futura do reservatório** e a jusante desse, considerando as **fases de implantação e de operação**. Essa atividade deverá ser realizada a partir do **uso de modelos matemáticos** específicos. Essa previsão da qualidade da água deverá abordar também a possível **dinâmica de eutrofização do reservatório**, relacionada à **biomassa inundada** e à carga potencial de nutrientes.*

Para atendimento a esse escopo, foi realizada uma modelagem de qualidade da água dos dois reservatórios, considerando os efeitos sinérgicos entre eles. Esta modelagem foi feita com o emprego de um modelo unidimensional, conforme justificado mais adiante, que foi calibrado de forma a reproduzir as condições observadas no presente e, posteriormente, alimentado com as cargas decorrentes da vegetação a ser afogada durante o enchimento dos reservatórios. Para essa condição futura, os parâmetros do modelo foram também adaptados, buscando melhor representar as novas condições hidráulicas e de autodepuração reinantes após o enchimento.

Para a avaliação da qualidade das águas superficiais, havia sido elaborado o documento “Diagnóstico Ambiental do Sistema Fluvial do Rio Madeira no Trecho de Implantação das Usinas Hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio” (referência 1), para o

qual foram realizadas cinco campanhas de campo entre novembro de 2003 e agosto de 2004, cada uma com duração aproximada de 10 dias. Foram coletadas amostras de água para análises laboratoriais em oito estações, ao longo do rio Madeira, e seis estações em alguns tributários selecionados. Este estudo fundamentou o estabelecimento das condições atuais para efeito de calibração do modelo de qualidade da água.

Para avaliação da biomassa afogada pelos reservatórios e determinação das principais cargas a ela associadas, foi tomado como base o documento “Diagnóstico do Uso da Terra e da Cobertura Vegetal das Áreas de Influência dos Aproveitamentos de Jirau e Santo Antônio” (referência 2), que apresentou a caracterização da cobertura vegetal das áreas dos futuros reservatórios, incluindo a estimativa da biomassa estocada (serrapilheira) e da biomassa verde (biomassa viva acima do solo), associadas a cada tipologia de cobertura. Estes dados foram integrados sobre a área a ser inundada pelos reservatórios, para composição das cargas a serem fornecidas ao modelo de qualidade da água.

As simulações realizadas contemplaram, além da situação atual, as situações posteriores à implantação dos reservatórios, considerando:

- Implantação do reservatório de Jirau isoladamente;
- Implantação do reservatório de Santo Antônio isoladamente;
- Implantação do reservatório de Jirau com a usina de Santo Antônio já em operação; e
- Implantação do reservatório de Santo Antônio com a usina de Jirau já em operação.

Para todas essas situações foram consideradas condições hidrológicas críticas (vazões de estiagem) e normais.

1.2. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO E ABORDAGEM GERAL

A construção de uma barragem e a formação de um reservatório ocasiona mudanças significativas num curso d'água, reduzindo as velocidades médias do escoamento e aumentando, por conseqüência, o tempo de permanência da água no trecho inundado, com reflexos sobre a qualidade da água.

A inundação da vegetação existente (ou remanescente) na área do reservatório é responsável por um dos principais impactos causados na qualidade da água pela implantação de reservatórios, pois, durante este processo, observa-se o desencadeamento de uma série de reações de natureza físico-química e biológica, que podem, por sua vez, acarretar impactos significativos no meio biótico.

Duas fases são identificadas no processo de estabelecimento de um reservatório:

- Fase de enchimento do reservatório, onde se observa a ocorrência de condições mais críticas em termos de qualidade da água. A biomassa vegetal residente é

afogada e se decompõe, liberando uma grande quantidade de compostos orgânicos e nutrientes, com possibilidades até de estabelecimento de condições anóxicas. Durante este período, que se prolonga até o reservatório alcançar o seu nível operacional, incorporando toda a vegetação existente, a biomassa de rápida decomposição vai sendo oxidada, com consumo intenso de oxigênio.

- Fase de operação, na qual ocorre, ao longo do tempo, o consumo de toda a matéria orgânica inundada, num ritmo menos acelerado, e posterior estabilização das condições bioquímicas do meio aquático.

Para representar estes processos recorre-se, normalmente, a modelos de simulação de qualidade da água em reservatórios, com representação do reservatório em uma, duas e, até mesmo, três dimensões, dependendo das dimensões e complexidade do corpo hídrico, além, naturalmente, da disponibilidade de dados.

Os dois reservatórios do rio Madeira considerados no presente estudo apresentam características bem marcantes, com escoamento predominantemente unidimensional ao longo de seu traçado longitudinal. Em outras palavras, os dois reservatórios apresentam características de regime fluvial, com ocorrência de poucas (mas importantes) áreas marginais alagadas, podendo ser representados matematicamente através de modelos unidimensionais de escoamento e de qualidade da água.

Por este motivo, empregou-se no presente estudo água o modelo QUAL2E, desenvolvido pela EPA – Environmental Protection Agency para simulação de qualidade da água de rios e estuários. O QUAL2E permite representar de forma adequada os processos associados à decomposição da biomassa afogada, que é o principal impacto esperado da implantação dos reservatórios do rio Madeira sobre a qualidade da água.

No item 3 deste relatório é apresentada uma justificativa dessa escolha fundamentada na morfometria dos dois reservatórios e em índices e modelos simplificados de estratificação e eutrofização de reservatórios.

De forma resumida, a abordagem geral empregada no presente trabalho consta de:

- Caracterização da qualidade da água do rio Madeira com base em ensaios de laboratório realizados com amostras retiradas de diversos pontos no corpo d'água principal e em seus principais afluentes, cobrindo as quatro fases principais do ciclo hidrológico;
- Determinação da quantidade de biomassa afogada pelos reservatórios, com base no inventário florestal realizado e com auxílio de dados complementares obtidos em estudos similares realizados para outros reservatórios amazônicos;
- Estabelecimento de um modelo de qualidade da água para todo o estirão do rio Madeira, com base na caracterização feita anteriormente;

- Simulação de cenários futuros, considerando a implantação de cada reservatório em primeira ou segunda adição, de modo a analisar os efeitos sinérgicos existentes; e
- Análise dos resultados das simulações, caracterização dos impactos sobre a qualidade da água e estabelecimento de possíveis medidas mitigadoras.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O presente relatório está organizado da seguinte forma:

Item 1 – esta nota introdutória, que justifica e descreve a abordagem geral do trabalho;

Item 2 – apresentação de uma caracterização geral da qualidade da água do Madeira no estirão fluvial de interesse aos estudos, com base em trabalhos realizados anteriormente, buscando estabelecer condições atuais para a calibração do modelo matemático de qualidade da água.

Item 3 – apresentação da metodologia empregada nos estudos, justificando, com base em elementos da morfologia dos reservatórios, o emprego do modelo unidimensional de qualidade da água em rios em vez do modelo típico de reservatório.

Item 4 – Determinação das cargas decorrentes do afogamento da vegetação pelos reservatórios, tomando por base os estudos de caracterização da vegetação realizados anteriormente.

Item 5 – Estabelecimento do modelo de qualidade da água do reservatório, incluindo a descrição do modelo Qual2 e sua calibração para as condições atuais.

Item 6 – Simulação da evolução da qualidade da água ao longo do estirão em estudo, considerando as cargas estimadas no item 4, parâmetros adaptados do modelo, para considerar as novas propriedades hidráulicas do rio após o represamento, e as diversas condições de entrada em operação dos dois empreendimentos.

Item 7 – apresentação das principais conclusões relativas ao estudo realizado, identificação dos impactos e recomendações decorrentes, seja com relação à mitigação dos efeitos negativos detectados seja com relação ao aprimoramento futuro dos trabalhos.

2. CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO MADEIRA NO ESTIRÃO EM ESTUDO

A principal fonte de referência para os estudos de modelagem matemática de qualidade da água, no que diz respeito à caracterização da qualidade da água do rio Madeira no estirão em estudo, foi o Diagnóstico Ambiental do Sistema Fluvial do Rio Madeira no Trecho de Implantação das Usinas Hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio (Referência 1), desenvolvido como parte integrante dos Estudos de Impacto Ambiental dos referidos aproveitamentos.

Na seqüência apresenta-se uma breve descrição dos estudos realizados e, também, um sumário dos parâmetros de qualidade da água obtidos.

2.1. DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS REALIZADOS

O *Diagnóstico Ambiental do Sistema Fluvial do Rio Madeira no Trecho de Implantação das Usinas Hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio* foi desenvolvido pela Fundação Djalma Batista, no período de 2003 a 2005, em conformidade com as recomendações estabelecidas no Termo de Referência elaborado por FURNAS Centrais Elétricas S.A.

Os estudos limnológicos englobaram o trecho do rio Madeira compreendido entre as cidades de Abunã e Porto Velho, incluindo seus principais tributários – rio Mutumparaná, e seu afluente pela margem esquerda, o rio Cotia, e rio Jaciparaná, pela margem direita; e rio Abunã e Igarapé São Simão, pela margem esquerda.

2.1.1. Campanhas de Campo e Distribuição das Estações

No período de novembro de 2003 a agosto de 2004, foram realizadas cinco campanhas de campo, com duração aproximada de 10 dias, a intervalos regulares de aproximadamente 60 dias, assim estabelecidas:

- 1ª Campanha de Campo: 10 a 18 de novembro de 2003;
- 2ª Campanha de Campo: 28 de janeiro a 05 de fevereiro de 2004;
- 3ª Campanha de Campo: 21 a 31 de março de 2004;
- 4ª Campanha de Campo: 18 a 26 de maio de 2004; e,
- 5ª Campanha de Campo: 20 a 31 de julho de 2004.

Em cada campanha de campo foram realizadas amostragens de água e material biológico em 14 estações ao longo da bacia do rio Madeira, entre as cidades de Abunã e Porto Velho, distribuídas segundo as recomendações estabelecidas no Termo de Referência, da seguinte forma:

- 8 estações ao longo do eixo longitudinal do rio Madeira; e,
- 6 estações em afluentes (tributários) selecionados.

A Tabela 2.1 e as Figuras 2.2 e 2.3, a seguir, mostram a localização das estações de coleta e suas distâncias aproximadas.

Tabela 2.1
Localização das Estações de Coleta

Rio Madeira

Ponto de Coleta	Localização (GPS)		Referencial
MAD10	09°44'03"S	65°21'01"W	A montante do rio Abunã
MAD20	09°36'44"S	65°23'30"W	A montante do igarapé São Simão
MAD30	09°35'10"S	64°57'22"W	A montante do rio Mutumparaná
MAD40	09°20'29"S	64°43'55"W	A montante do eixo Jirau
MAD50	09°11'34"S	64°22'37"W	A jusante do rio Jaciparaná
MAD60	08°52'02"S	64°04'21"W	A montante do eixo Teotônio
MAD80	08°47'50"S	63°57'41"W	A montante do eixo Santo Antônio
MAD90	08°38'50"S	63°54'40"W	A jusante de Porto Velho

Tributários

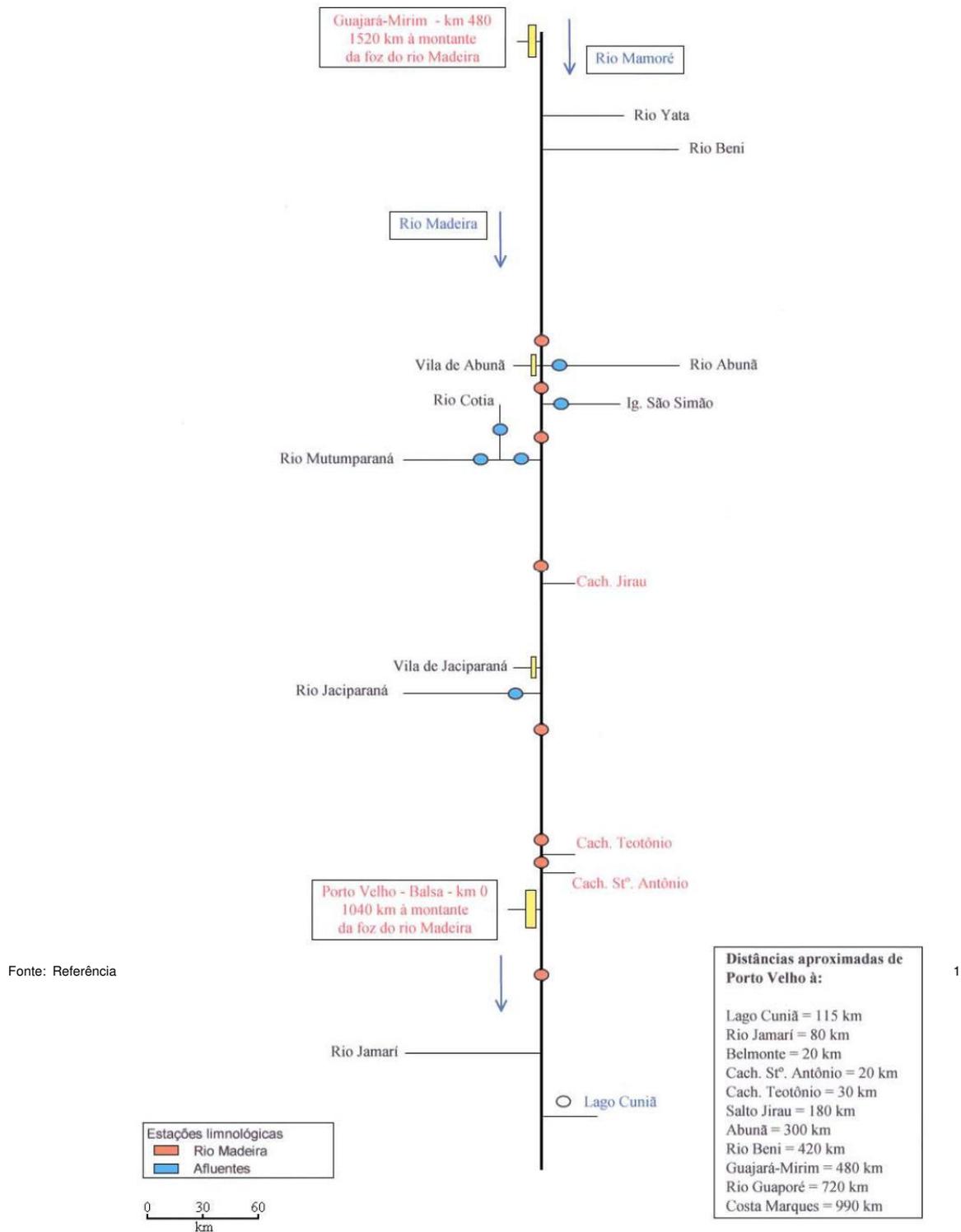
Ponto de Coleta	Localização (GPS)		Referencial
ABU10	09°41'38"S	65°26'39"W	rio Abunã
SSM10	09°30'34"S	65°17'55"W	igarapé São Simão
MTM30	09°36'59"S	64°55'58"W	rio Mutumparaná (Rodovia)
MTM10	09°40'43"S	64°58'42"W	rio Mutumparaná, à montante do rio Cotia
COT10	09°40'44"S	64°58'50"W	rio Cotia
JAC10	09°11'34"S	64°22'37"W	rio Jaciparaná

Figura 2.2
Mapa de Localização das Estações de Coleta

Fonte: Referência 1



Figura 2.3
Esquema de Localização das Estações de Coleta



As estações MAD10 a MAD40 (rio Madeira), ABU10 (rio Abunã), SSM10 (igarapé São Simão), MTM30 e MTM10 (rio Mutumparaná), e COT10 (rio Cotia) localizam-se na área de influência a montante da AHE Jirau. As estações MAD50 a MAD80 (rio Madeira) e JAC10 (rio Jaciparaná) localizam-se na área de influência a montante da AHE Santo Antônio. Por fim, a estação MAD90 (rio Madeira) está localizada a jusante do AHE Santo Antônio e da cidade de Porto Velho.

2.1.2. Variáveis Mensuradas e Metodologia de Amostragem

As variáveis físicas, físico-químicas, químicas e biológicas mensuradas nos estudos e que servirão de subsídio aos estudos de modelagem da qualidade da água são apresentadas na Tabela 2.4. Além dessas, foram obtidos outros parâmetros, tais como condutividade elétrica, turbidez, sólidos suspensos, metais pesados, ferro e composição iônica, que estão detalhadamente apresentados na Referência 1.

Tabela 2.4
Variáveis de Interesse à Modelagem

Medições de Campo

Temperatura da Água	°C
Turbidez	F.T.U.
Oxigênio Dissolvido	mg/L

Grupo 2

Nitrogênio Orgânico Total (Kjeldahl)	mg/L
Amônia (NH ₃)	mg/L
Nitrato (NO ₃)	mg/L
Ortofosfato (PO ₄)	mg/L
Fósforo Total (P)	mg/L
Fósforo Total Dissolvido (P)	mg/L
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg/L
Carbono Orgânico Dissolvido	mg/L

Grupo 3

Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	mg/L
Coliformes Totais	NMP/100mL
Coliformes Fecais	NMP/100mL

Em todos os pontos de amostragem do rio Madeira e tributários foram registrados a data e horário de coleta, profundidade, temperatura do ar, transparência e coletada amostra de água superficial para determinação da turbidez. Em seguida foram realizados perfis verticais de temperatura, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica e pH utilizando-se potenciômetros de campo. Os referidos perfis abrangeram a calha central e margens esquerda e direita no rio Madeira e somente a calha central dos

tributários, e foram usados para caracterizar a oscilação espacial e temporal dessas variáveis nos ambientes amostrados.

A amostragem das variáveis físicas e/ou químicas do Grupo 2 constou de coletas de água da sub-superfície e do fundo nas oito estações do rio Madeira, sendo amostrado tanto a calha central como as margens esquerda e direita, totalizando 48 pontos de amostragem. Nos tributários foi estabelecido somente um ponto de coleta, na superfície (calha central), totalizando seis pontos de amostragem. Com isso, obteve-se um total de 54 pontos de coleta para as variáveis do Grupo 2.

Para as variáveis do Grupo 3 foram coletadas somente amostras de água superficial, em todos os tributários e em quatro estações selecionadas no rio Madeira (MAD10, MAD40, MAD60 e MAD90), totalizando 10 pontos de coleta.

Para as variáveis de interesse para os estudos de modelagem matemática de qualidade da água, as metodologias de determinação foram as seguintes:

- Distribuição vertical de temperatura (°C) e oxigênio dissolvido (mg/L e % de saturação) – avaliada simultaneamente com oxímetro portátil WTW ProfiLine Oxi197, equipado com sensor (compensado para temperatura), acoplado a um agitador subaquático modelo BR325 e cabo de 25 m;
- Turbidez (FTU) – determinada através de leitura direta da amostra de água em espectrofotômetro referenciada à água deionizada;
- DBO (mg/L) – determinada através da incubação por cinco dias seguida de análise dos teores de oxigênio, o qual foi estimado pelo método tritrimétrico de Winkler modificado;
- DQO (mg/L) – determinada pelo método de oxidação com permanganato de potássio;
- Ortofosfato (P-PO₄), amônia (N-NH₃), nitrato (N-NO₃), fósforo total (PT) e fósforo total dissolvido (PTD) – determinados utilizando-se as técnicas de análise por dosagem espectrofotométrica descritas nas Referências 3 e 3. Os resultados são expressos em mg/L;
- Nitrogênio orgânico total (mg/L) – estimado através do método clássico de Kjeldahl, onde as amostras passam pelos processos de digestão ácida, destilação e titulação;
- Carbono orgânico (mg/L) foi determinado por cálculo baseado nos valores de DQO;
- Coliformes (NMP/100mL) – foi determinado o número mais provável (NMP/100mL) de coliformes totais e fecais nas amostras de água segundo a metodologia descrita na Referência 5. Os valores obtidos foram comparados com os exigidos pela Resolução Conama nº 20 que classifica as águas interiores do Brasil.

2.2. SUMÁRIO DOS PARÂMETROS ATUAIS DE QUALIDADE DA ÁGUA

Na seqüência são apresentados os principais aspectos abordados no *Diagnóstico Ambiental do Sistema Fluvial do Rio Madeira no Trecho de Implantação das Usinas Hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio*.

2.2.1. Regime Fluvial

Antes da apresentação e discussão dos resultados obtidos, vale ressaltar o marcante comportamento sazonal da bacia do rio Madeira.

O regime hidrológico do rio Madeira é caracterizado por um período de águas baixas, de julho a outubro, e um período de águas altas, de fevereiro a maio. As vazões mínimas do ano ocorrem com maior freqüência em setembro, enquanto que as máximas verificam-se nos meses de março e abril. A flutuação média anual da água do rio varia na faixa de 10,8-12,4 metros. A variação entre o pico de água alta e água baixa é de aproximadamente 15,4-21,8 metros.

Os registros fluviométricos, diários e mensais, do rio Madeira nos anos de 2003 e 2004, que cobre, portanto, o período no qual foram realizadas as campanhas, estão apresentados nas Figuras 2.5 a 2.7.

Observa-se que a amplitude de variação do nível de água do rio Madeira no ano de 2003 oscilou de 11,4 m, em Jirau, a 15,3 m, em Abunã. Em 2004, a amplitude oscilou entre 11,2 m, em Jirau, e 12,7 m, em Abunã. De modo geral, o pico máximo de água alta ocorreu entre janeiro-março e o mínimo entre setembro-outubro.

A amplitude de variação da vazão de água do Madeira, medida em Porto Velho, em 2003, foi de 33.021 m³/s, sendo ligeiramente inferior em 2004, da ordem de 30.908 m³/s. A vazão mais alta para o período (36.096 m³/s) ocorreu no mês de março de 2003, enquanto a mais baixa (2.533 m³/s) foi registrada em outubro de 2004. De modo geral, o pico máximo da vazão ocorreu entre fevereiro-março e o mínimo entre setembro-outubro.

Considerando-se os períodos de cada uma das cinco campanhas realizadas e as informações extraídas das Figuras 2.1.1 a 2.1.3, pode-se estabelecer para cada campanha uma fase do ciclo hidrológico, como se segue:

- 1ª campanha (10 a 18 de novembro de 2003): fase de enchente (2003);
- 2ª campanha (28 de janeiro a 05 de fevereiro de 2004): fase de cheia (2004);
- 3ª campanha (21 a 31 de março de 2004): fase de cheia (2004);
- 4ª campanha (18 a 26 de maio de 2004): fase de vazante (2004); e,
- 5ª campanha (20 a 31 de julho de 2004): fase de seca (2004).

2.2.2. Variáveis Físicas, Físico-Químicas e Químicas de Interesse à Modelagem da Qualidade da Água

Na seqüência são transcritos alguns resultados e análises apresentados no *Diagnóstico Ambiental do Sistema Fluvial do Rio Madeira no Trecho de Implantação das Usinas Hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio*.

A análise dos perfis verticais de temperatura da água, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica e pH realizados na calha central e margens esquerda e direita do rio Madeira evidenciaram a ausência de variabilidade espacial bem definida, indicando uma homogeneidade na massa de água presente no rio ao longo das diferentes fases do ciclo hidrológico. Ou seja, os perfis verticais não indicaram a presença de ambientes quimicamente diferenciados nas margens do rio devido à influência dos afluentes nas condições hídricas do Madeira.

Dessa forma, os resultados apresentados para o rio Madeira referem-se aqueles obtidos para a calha central, que podem ser considerados representativos do sistema como um todo.

a) Turbidez

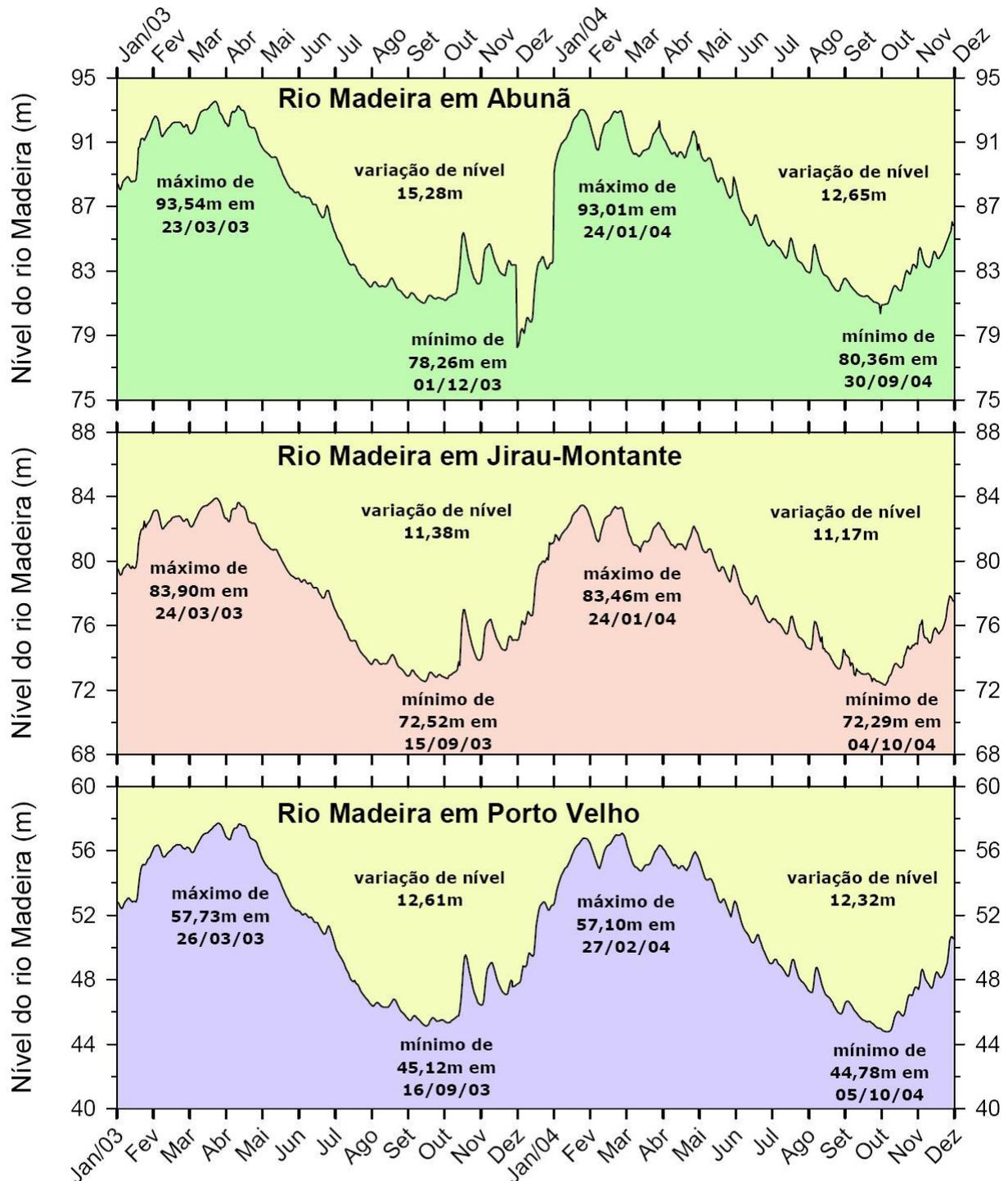
A turbidez das águas do rio Madeira oscilou de 106 FTU (enchente) a 80 FTU (seca) e foi em média 89 ± 17 FTU, apresentando uma tendência decrescente ao longo do período de estudo.

A turbidez apresentou valor médio de 17 ± 15 FTU e amplitude de variação de 7 FTU a 14 FTU na maioria dos tributários, a exceção dos rios Jaciparaná e Abunã, que apresentaram valores de 25 FTU e 35 FTU, respectivamente.

b) Temperatura

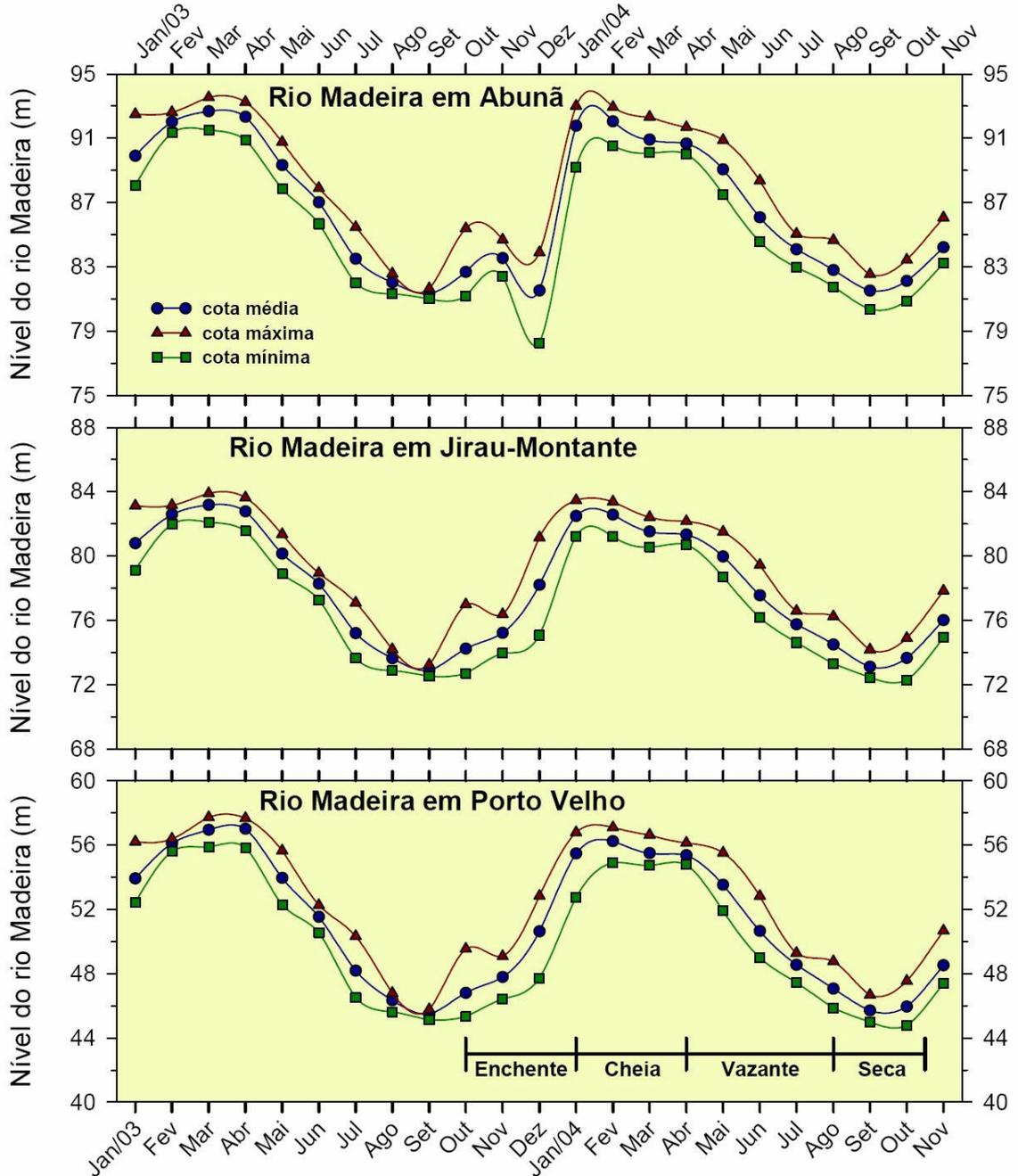
A análise dos dados de temperatura revelou considerável uniformidade térmica em toda a coluna de água do rio Madeira ao longo do período de estudo (média global de $27,4 \pm 1,6$ °C). As temperaturas superficiais e do fundo mostraram amplitude de variação similar ($24,4^{\circ}\text{C}$ a $29,6^{\circ}\text{C}$) e valor médio de $27,4 \pm 0,2$ °C.

Figura 2.5
Variação Diária do Nível d'Água no Rio Madeira (2003-2004)



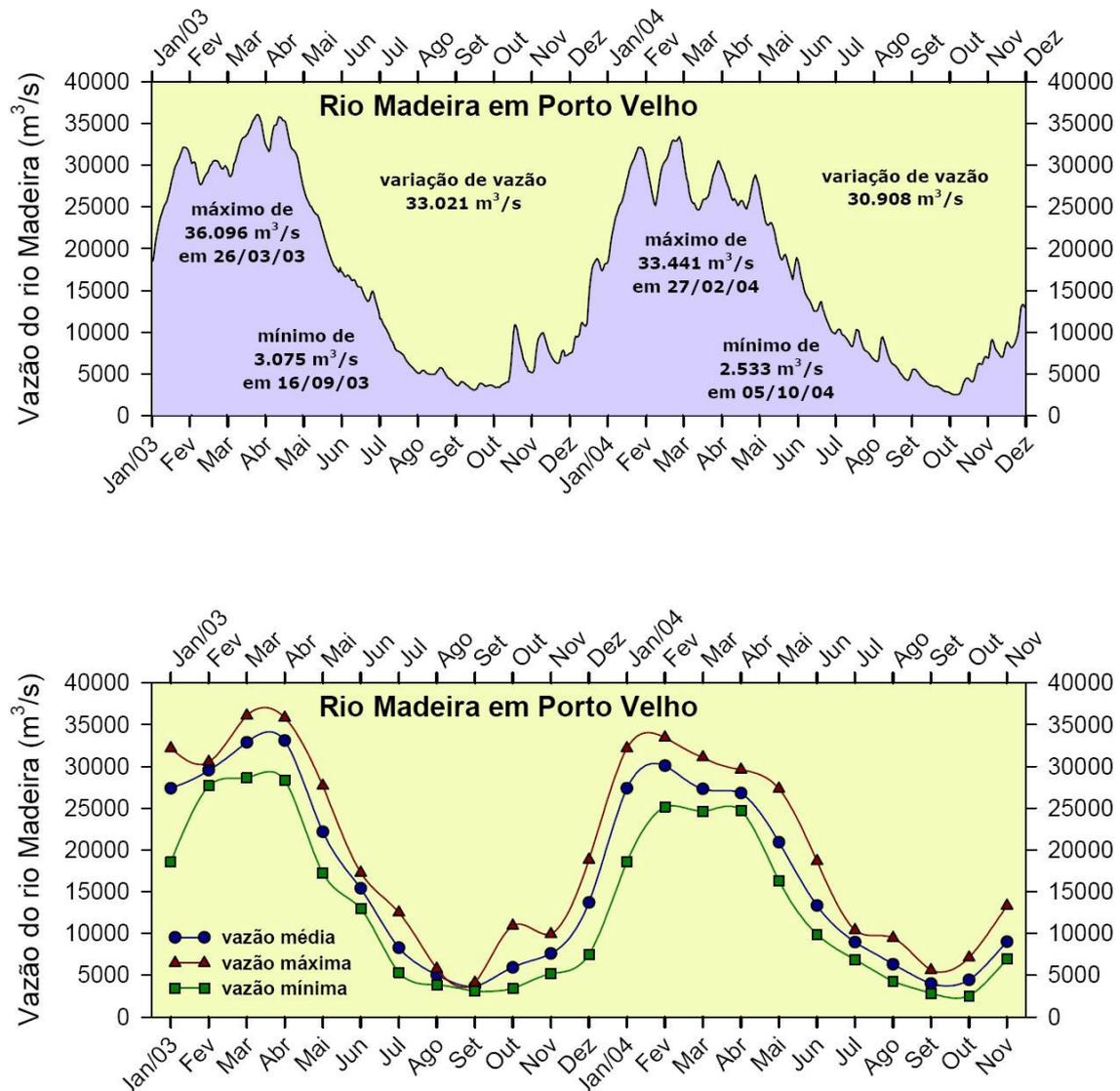
Fonte: Referência 1

Figura 2.6
Varição Média do Nível d'Água no Rio Madeira, em Abunã, Jirau e Porto Velho (2003-2004)



Fonte: Referência 1

Figura 2.7
Variações Diária e Média da Vazão do Rio Madeira, em Porto Velho (2003-2004)



Fonte: Referência 1

A dinâmica espacial da temperatura evidencia nítida tendência crescente ao longo dos pontos de coleta, enquanto sua dinâmica sazonal evidencia padrão decrescente, com valores mais altos na enchente e mais baixos nas fases de vazante e seca (maio a julho de 2004), que reflete o inverno na região, bem como a ocorrência do fenômeno da “friagem” e o conseqüente resfriamento da coluna de água nesta época do ano.

Nos tributários, a temperatura apresentou valores mínimos e máximos entre 23,6°C (rio Abunã) e 30,9°C (rios Abunã e Jaciparaná), mostrando uma amplitude máxima de 7,3°C e valor médio de $25,8 \pm 1,7$ °C. A dinâmica espacial da temperatura evidencia considerável uniformidade térmica em toda a coluna de água, enquanto sua dinâmica sazonal mostra padrão similar àquele do rio

Madeira, com valores mais altos na enchente e mais baixos nas fases de vazante e seca.

c) Oxigênio Dissolvido

O rio Madeira apresentou um alto grau de oxigenação e considerável uniformidade na coluna de água, com média global de $6,15 \pm 1,23$ mg/L (78,3 \pm 15,4 % saturação). Os teores de oxigênio dissolvido detectados nas camadas superficiais e profundas do Madeira foram bastante similares, variando de um mínimo de 4,1 mg/L (52-53%) a um máximo de 8,7 mg/L (114,0%), com valor médio de $6,32 \pm 1,19$ mg/L (80,6 \pm 15,3 %) e $6,32 \pm 1,24$ mg/L (80,5 \pm 15,8 %), respectivamente. A dinâmica espacial do oxigênio evidencia nítida tendência crescente ao longo dos pontos de coleta, notadamente à jusante das cachoeiras de Teotônio e Santo Antônio, com valores acima de 100% de saturação. Por outro lado, sua dinâmica sazonal evidencia um padrão de distribuição bem definido, com a ocorrência de teores relativamente altos nos períodos correspondente às fases de enchente e seca, com concentrações próximas de 100% de saturação, e valores mais baixos ao longo da fase de cheia, quando seus teores variaram entre 44% e 95% de saturação.

Nos tributários, os teores de oxigênio dissolvido foram menores, com valor médio global de $5,40 \pm 0,96$ mg/L (67,1 \pm 12,6 % saturação) e amplitude de variação de 3,63 mg/L (44,9%) a 7,29 mg/L (99,1%), ambos detectados no rio Jaciparaná. Dentre os ambientes amostrados, o rio Jaciparaná foi o que apresentou os menores teores ($4,96 \pm 1,18$ mg/L ou 62,4 \pm 16,2 % saturação), enquanto o rio Mutumparaná as melhores condições de oxigenação da massa de água ($6,09 \pm 0,33$ mg/L ou 75,8 \pm 6,2 % saturação).

A dinâmica espacial do oxigênio nos tributários evidencia considerável uniformidade na distribuição do oxigênio dissolvido com a profundidade, enquanto sua dinâmica sazonal mostra padrão similar àquele do rio Madeira, com a ocorrência de teores relativamente altos no período correspondente à fase de enchente, com concentrações próximas de 100% de saturação (80,4-99,1%), e valores mais baixos na cheia, quando seus teores variaram entre 50% e 70% de saturação.

d) Demanda de Oxigênio

A concentração de oxigênio no meio aquático é o reflexo das interações entre os processos que consomem e que produzem oxigênio naquele ambiente. Além da respiração, processos abióticos estão relacionados com a disponibilidade e com a demanda de oxigênio no meio hídrico.

A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) no rio Madeira foi, em média, ligeiramente inferior àquela observada nos tributários. No Madeira, a DBO oscilou de 0,11 mg/L a 2,40 mg/L, com valor médio de $1,12 \pm 0,60$ mg/L. Nos

tributários a amplitude de variação da DBO foi de 0,30 mg/L a 2,70 mg/L, com valor médio de $1,31 \pm 0,49$ mg/L.

No Madeira, as maiores DBO foram observadas na estação MAD60 ($1,36 \pm 0,39$ mg/L) e as menores na estação MAD10 ($0,77 \pm 0,38$ mg/L). Nos tributários, os maiores índices da DBO foram detectados no rio Mutumparaná-MTM10 ($1,52 \pm 0,86$ mg/L) e os menores no rio Abunã ($1,17 \pm 0,42$ mg/L).

A DBO apresentou um padrão de distribuição sazonal no rio Madeira caracterizado pela ocorrência de valores máximos associados às fases de cheia e vazante. Nos tributários, a dinâmica sazonal da DBO evidenciou uma tendência a valores crescentes ao longo do período de estudo, atingindo seu máximo na vazante/04.

A demanda química do oxigênio (DQO) no rio Madeira foi em média $40,0 \pm 15,6$ mg/L, com seus valores oscilando entre o mínimo de 14,3 mg/L e o máximo de 75,1 mg/L, sendo observada pequena diferença entre as amostras superficiais ($37,8 \pm 13,3$ mg/L) e do fundo ($42,2 \pm 17,5$ mg/L). Nos tributários, os valores de DQO foram ligeiramente inferiores, variando de 9,1 mg/L (JAC10) a 44,3 mg/L (JAC10), com média de $22,6 \pm 10,3$ mg/L.

No rio Madeira, a DQO apresentou distribuição relativamente homogênea entre as estações de coleta, tanto para as amostras superficiais como do fundo. Nos tributários, o rio Abunã apresentou a maior DQO (30,9 mg/L), variando entre 18-23 mg/L nos outros pontos de amostragem.

Durante o ciclo hidrológico verifica-se que, em média, a demanda química de oxigênio no rio Madeira e tributários diminuiu da cheia para a seca elevando-se em seguida na enchente.

De modo geral, a demanda bioquímica utilizou 18% (rio Madeira) a 25% (tributários) do oxigênio disponível, enquanto que o oxigênio presente nos rios representou apenas de 16% (rio Madeira) a 23% (tributários) da demanda química necessária de suas águas. Isso demonstra que o consumo bioquímico de oxigênio foi muito pequeno em relação àquele utilizado pela DQO. Como estes consumos acontecem no mesmo ambiente, todo o oxigênio presente representou pequena parcela (13% a 18%) das demandas bioquímica e química de suas águas, implicando, portanto, em considerável déficit potencial de oxigênio nesses ambientes. Vale ressaltar que esta é uma análise linear, com dados médios e que as demandas foram maiores ou menores de acordo com a época do ciclo hidrológico e com o rio relacionado.

A avaliação do déficit é estática, mas evidencia a importância dos processos que estão naturalmente ocorrendo no meio hídrico. Sob este aspecto, a situação química dos ambientes parece ser crítica; no entanto, estes valores são biologicamente similares aos encontrados nas águas amazônicas, nas quais o déficit de oxigênio parece ser uma característica intrínseca (e.g., Darwich, 1995;

Kern et al., 1996; Melack & Fisher, 1983). Esse déficit de oxigênio no meio pode ser maior ou menor se ocorrerem fatores externos ao ambiente provocando, por exemplo, a redução da velocidade da corrente ou o aumento do material em suspensão nas águas.

Apesar do grande consumo de oxigênio, foram sempre registradas elevadas concentrações desse gás no ambiente, provavelmente em decorrência da turbulência e difusão nos rios, com a concentração de oxigênio dissolvido oscilando entre 50-80% (cheia e vazante) e 80-100% (seca e enchente) de saturação.

e) Fósforo

A análise das frações inorgânica (ortofosfato), dissolvida (PTD) e total (PT) do fósforo mostra que suas concentrações foram maiores no rio Madeira em comparação com as registradas nos tributários. O teor de ortofosfato na água do rio Madeira variou de valores abaixo do limite de quantificação (ou 0,000 mg/L) a 0,016 mg/L, observando-se um valor médio de $0,005 \pm 0,004$ mg/L. As concentrações superficiais do ortofosfato situaram-se abaixo daquelas detectadas nas amostras da água do fundo, como atestam os respectivos valores médios de $0,003 \pm 0,003$ mg/L e $0,007 \pm 0,005$ mg/L. Nos tributários, o ortofosfato apresentou uma amplitude de variação de 0,000 mg/L a 0,008 mg/L, com valor médio de $0,002 \pm 0,003$ mg/L.

O teor de fósforo total dissolvido (PTD) no rio Madeira apresentou a mesma tendência de maiores valores na água do fundo ($0,014 \pm 0,009$ mg/L) em comparação com as amostras superficiais ($0,008 \pm 0,008$ mg/L). Em contrapartida, o teor de fósforo total (PT) apresentou, em geral, pouca variação entre as amostras superficiais e do fundo, com amplitude de variação ao redor de 0,020 mg/L e 0,100 mg/L. A média global para as frações total e dissolvida no rio Madeira foi de $0,059 \pm 0,023$ mg/L e $0,014 \pm 0,012$ mg/L, respectivamente. Nos tributários, a média global para as frações total e dissolvida foi de $0,026 \pm 0,018$ mg/L ($0,00$ mg/L a 0,022 mg/L) e $0,007 \pm 0,009$ mg/L ($0,00$ mg/L a 0,057 mg/L), respectivamente.

A dinâmica espacial das frações de fósforo no rio Madeira se caracterizou por apresentar padrão irregular, registrando-se a ocorrência de maiores teores na estação MAD60, particularmente quanto às frações inorgânica e dissolvida. A fração total apresentou os maiores índices na estação MAD20 e tendência decrescente nas amostras superficiais. A análise do conteúdo de fósforo nos tributários mostrou que também não há um padrão definido de distribuição espacial.

A dinâmica sazonal do fósforo no rio Madeira evidencia uma tendência decrescente nos valores das amostras do fundo ao longo do período de estudo, para as frações inorgânica e dissolvida; as amostras superficiais, por sua vez,

mostram tendência inversa, isto é, crescente. Já a fração total apresentou, em geral, valores com muito pouca variação em todas as fases do ciclo hidrológico, embora evidenciando leve tendência decrescente. Nos tributários, o padrão de distribuição sazonal do conteúdo de fósforo se apresentou de forma bastante irregular.

f) Nitrogênio

Com relação às duas formas de nitrogênio inorgânico investigadas, os valores do nitrato foram, em média, mais que o dobro daqueles detectados para a amônia. No rio Madeira, a água do fundo apresentou teores de amônia e nitrato similares aos da superfície, sendo que a amônia variou de 0,04 mg/L a 0,27 mg/L ($0,11 \pm 0,04$ mg/L), enquanto que para o nitrato a amplitude de variação foi de 0,14 mg/L a 0,96 mg/L ($0,47 \pm 0,21$ mg/L). Nos tributários os teores de amônia variaram de 0,00 mg/L a 0,25 mg/L, evidenciando um valor médio de $0,09 \pm 0,07$ mg/L. Os teores de nitrato, por sua vez, oscilaram entre 0,01 mg/L e 0,74 mg/L (MTM30), com valor médio de $0,26 \pm 0,15$ mg/L.

No rio Madeira e tributários, as duas formas de nitrogênio apresentaram distribuição relativamente homogênea entre as estações de coleta, a exceção do pico de concentração do nitrato (0,39 mg/L) detectado no rio Abunã. A dinâmica espacial do nitrato no rio Madeira se caracterizou por apresentar tendência decrescente ao longo do período de estudo, tanto para as amostras superficiais como do fundo, mais evidente no rio Madeira. Quanto à amônia, seus teores apresentaram uma distribuição sazonal relativamente homogênea.

g) Nitrogênio Orgânico Total

O teor de nitrogênio orgânico total (NOT) no rio Madeira apresentou variação significativa entre a superfície e o fundo. As concentrações superficiais oscilaram entre 0,9 mg/L e 14,2 mg/L, com média de $4,6 \pm 3,6$ mg/L. Para as amostras da água do fundo seus teores variaram de 3,9 mg/L a 48,3 mg/L, com um valor médio de $16,7 \pm 8,8$ mg/L. A média global para o período de estudo foi de $10,7 \pm 9,0$ mg/L. A análise do conteúdo de NOT nos tributários mostra que as concentrações foram, em geral, bem menores que aquelas detectadas no rio Madeira, oscilando entre 0,7 mg/L e 5,9 mg/L, com média global de $2,3 \pm 1,4$ mg/L.

A dinâmica espacial do nitrogênio orgânico no rio Madeira evidencia uma tendência crescente nos teores das amostras do fundo ao longo do período de estudo. As amostras superficiais, por sua vez, mostram tendência a uma distribuição homogênea, o mesmo sendo observado com relação aos tributários. Sua dinâmica sazonal se caracterizou por apresentar padrão relativamente homogêneo nos tributários e no Madeira, sendo que neste último deve-se registrar a ocorrência de maiores teores na vazante, particularmente quanto às amostras do fundo.

h) Carbono Orgânico Dissolvido

A concentração de carbono orgânico dissolvido (COD) no rio Madeira apresentou valores oscilando entre 5,4 mg/L e 28,2 mg/L, mostrando grande similaridade entre a superfície ($14,2 \pm 5,0$ mg/L) e fundo ($15,9 \pm 6,6$ mg/L), evidenciando uma média global de $15,0 \pm 5,9$ mg/L. Nos tributários, o teor de COD variou de 3,4 mg/L a 16,6 mg/L, com valor médio de $8,5 \pm 3,8$ mg/L.

A dinâmica espacial do carbono orgânico no rio Madeira não mostra diferenças marcantes entre os valores detectados ao longo das estações de coleta, o mesmo sendo observado com relação aos tributários, a exceção do rio Abunã. Sua dinâmica sazonal, contudo, evidencia padrão bem definido, com tendência decrescente nos teores da cheia (pico máximo) para a seca (pico mínimo). Nos tributários observa-se tendência crescente nos valores da enchente para a cheia, decrescendo ao longo da vazante e seca.

O COD origina-se, principalmente, da decomposição de plantas e animais e a partir de produtos da excreção destes organismos. Sua concentração está diretamente relacionada com os estado trófico do corpo d'água e com o tipo de influência à qual o mesmo está submetido.

Alguns estudos (Referências 6 e 7) mostram que o fato de haver pouca variação vertical de COD, como verificado no rio Madeira, sugere que o COD seja composto principalmente por material de difícil decomposição.

2.2.3. Análise Bacteriológica

Tomando-se por base os critérios de classificação das águas continentais apresentados na Resolução N^o 20 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (Brasil, 1986), os resultados obtidos nas análises bacteriológicas mostraram o não comprometimento da qualidade da água do rio Madeira, no que tange a presença de coliformes fecais, pois os valores só excederam o padrão estabelecido para rios Classe I uma única vez (700 NMP/100mg), na fase de vazante.

Quanto aos coliformes totais, os resultados revelaram valores acima do tolerável para Rios Classe I, mas abaixo do padrão estabelecido para Rios Classe II (1.100 NMP/100mg a 1.700 NMP/100mg), em quatro ocasiões, entre as fases de cheia e vazante.

Nos tributários as análises mostraram um maior comprometimento da qualidade da água, principalmente com relação à presença de coliformes totais. Os níveis de coliformes fecais excederam o padrão estabelecido para rios Classe I, em cinco ocasiões (600-800 NMP/100mg) entre as fases de cheia e vazante, particularmente no igarapé São Simão e no rio Cotia. Por sua vez, as análises revelaram valores de coliformes totais acima do tolerável para Rios Classe I,

mas abaixo do padrão estabelecido para Rios Classe II (1.100-3.000 NMP/100mL) na maioria dos ambientes amostrados em 14 ocasiões, abrangendo todas as fases do ciclo hidrológico.

2.3. CONCENTRAÇÕES MEDIDAS AO LONGO DO RIO MADEIRA E TRIBUTÁRIOS

As Tabelas 2.8 e 2.9, a seguir, apresentam as concentrações dos diversos constituintes ao longo do rio Madeira e seus tributários, para cada Cenário.

Tabela 2.8
Concentrações Observadas ao Longo do Rio Madeira

LOCAL	MÊS	CENÁRIO	Temperat °C	OD mg/L	DBO mg/L	Norg mg/L	Amônia mg/L	Nitrato mg/L	Ortofosfato mg/L	Fósforo Orgânico mg/L	Carbono Orgânico mg/L
MAD-30	NOV	Enchente	29,4	6,83		8,1	0,10	0,78	0,006	0,009	11,2
	JAN	Cheia	27,9	4,09		8,7	0,18	0,46	0,001	0,003	23,2
	MAR	Cheia	28,7	4,79		9,4	0,16	0,45	0,003	0,007	19,2
	MAI	Vazante	24,5	5,92		8,2	0,11	0,38	0,006	0,011	15,1
	JUL	Estiagem	25,8	6,69		5,6	0,11	0,17	0,002	0,013	6,8
MAD-40	NOV	Enchente	29,6	6,76	0,25	11,3	0,07	0,81	0,006	0,014	10,7
	JAN	Cheia	28,1	4,12	0,28	11,5	0,23	0,62	0,002	0,005	24,4
	MAR	Cheia	28,3	4,70	1,91	10,0	0,12	0,38	0,006	0,012	19,2
	MAI	Vazante	24,8	6,02	2,40	10,1	0,07	0,41	0,005	0,008	15,5
	JUL	Estiagem	26,5	6,57	0,84	6,8	0,10	0,15	0,000	0,006	7,9
MAD-50	NOV	Enchente	29,5	7,70		13,5	0,11	0,83	0,009	0,027	11,0
	JAN	Cheia	28,3	5,09		13,5	0,17	0,59	0,006	0,013	23,2
	MAR	Cheia	28,3	5,49		14,6	0,14	0,44	0,007	0,013	18,3
	MAI	Vazante	24,9	6,83		21,5	0,07	0,43	0,010	0,013	15,9
	JUL	Estiagem	26,5	7,18		7,2	0,11	0,17	0,001	0,009	6,5
MAD-60	NOV	Enchente	29,2	7,22	1,48	8,9	0,08	0,78	0,010	0,036	10,0
	JAN	Cheia	27,6	4,90	1,82	9,0	0,09	0,49	0,011	0,020	23,3
	MAR	Cheia	28,9	6,53	1,07	10,0	0,13	0,53	0,009	0,018	19,1
	MAI	Vazante	25,1	6,66	0,86	24,4	0,10	0,44	0,009	0,014	15,2
	JUL	Estiagem	26,7	7,00	1,55	8,4	0,09	0,18	0,000	0,013	7,2
MAD-90	NOV	Enchente	29,3	8,56	1,15	7,4	0,09	0,78	0,008	0,012	11,9
	JAN	Cheia	27,7	6,08	1,96	7,5	0,15	0,44	0,004	0,007	21,6
	MAR	Cheia	28,0	6,54	1,15	7,9	0,12	0,54	0,007	0,009	17,6
	MAI	Vazante	25,4	7,59	0,97	30,8	0,08	0,48	0,008	0,010	15,6
	JUL	Estiagem	26,8	8,08	0,76	5,1	0,09	0,19	0,000	0,012	5,9

Tabela 2.9
Concentrações Observadas ao Longo dos Tributários do Rio Madeira

LOCAL	MÊS	CENÁRIO	Temperat °C	OD mg/L	DBO mg/L	Norg mg/L	Amônia mg/L	Nitrato mg/L	Ortofosfato mg/L	Fósforo Orgânico mg/L	Carbono Orgânico mg/L
ABU-10	NOV	Enchente	30,4	6,92	0,68	2,9	0,01	0,74	0,002	0,009	12,3
	JAN	Cheia	27,3	4,93	0,84	3,6	0,25	0,45	0,002	0,010	16,0
	MAR	Cheia	26,3	4,18	1,75	4,4	0,18	0,28	0,001	0,006	13,2
	MAI	Vazante	23,6	5,99	1,26	1,6	0,15	0,34	0,001	0,005	9,4
	JUL	Estiagem	25,6	6,71	1,32	2,2	0,02	0,13	0,001	0,004	7,1
SSM-10	NOV	Enchente	26,7	6,42	1,01	1,9	0,02	0,47	0,000	0,000	8,8
	JAN	Cheia	24,9	4,31	1,77	2,5	0,12	0,33	0,004	0,018	10,3
	MAR	Cheia	25,0	5,25	1,51	3,3	0,08	0,30	0,002	0,013	8,8
	MAI	Vazante	23,9	6,14	2,25	0,9	0,01	0,25	0,002	0,005	3,6
	JUL	Estiagem	23,9	6,35	0,67	2,2	0,03	0,07	0,000	0,005	3,7
MTM-30	NOV	Enchente	29,9	6,90	0,89	4,6	0,05	0,21	0,000	0,000	7,6
	JAN	Cheia	25,5	5,75	1,69	5,1	0,15	0,22	0,001	0,000	8,8
	MAR	Cheia	26,4	6,04	1,15	5,9	0,18	0,24	0,001	0,000	16,1
	MAI	Vazante	23,9	6,00	1,15	3,3	0,02	0,25	0,000	0,000	5,8
	JUL	Estiagem	24,8	6,40	1,24	3,4	0,06	0,07	0,000	0,002	4,2
COT-10	NOV	Enchente	28,5	6,69	1,15	1,0	0,13	0,27	0,000	0,000	7,0
	JAN	Cheia	25,8	5,05	1,40	1,7	0,11	0,20	0,001	0,000	9,1
	MAR	Cheia	25,9	4,24	1,46	0,7	0,05	0,21	0,000	0,000	7,8
	MAI	Vazante	24,2	5,65	1,68	1,0	0,00	0,16	0,000	0,005	5,6
	JUL	Estiagem	24,3	6,09	0,84	0,7	0,08	0,05	0,000	0,003	5,4
JAC-10	NOV	Enchente	30,8	7,20	1,76	1,6	0,16	0,41	0,004	0,009	8,3
	JAN	Cheia	26,6	4,46	1,09	2,2	0,08	0,33	0,001	0,000	9,1
	MAR	Cheia	25,8	3,65	0,80	3,0	0,19	0,34	0,002	0,000	16,6
	MAI	Vazante	25,6	5,54	1,27	2,0	0,00	0,32	0,000	0,000	5,8
	JUL	Estiagem	26,3	6,37	1,15	2,0	0,11	0,01	0,001	0,003	3,4

3. CARACTERIZAÇÃO DOS FUTUROS RESERVATÓRIOS

Os reservatórios formados pela implantação dos aproveitamentos de Jirau e Santo Antônio possuem características peculiares, cujo conhecimento foi fundamental para a definição da metodologia empregada na modelagem de qualidade da água desenvolvida e na compreensão de alguns resultados obtidos nas simulações. Este item é dedicado a apresentar e analisar as principais propriedades dos dois reservatórios.

3.1. CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DOS RESERVATÓRIOS

3.1.1. Reservatório do AHE Jirau

O AHE Jirau será implantado no denominado “trecho das corredeiras” do rio Madeira, formando um reservatório com área de 258 km², em seu nível d’água máximo normal, e volume total de 2.015 hm³. A Tabela 3.1 apresenta a curva cota-área-volume do reservatório de Jirau.

Tabela 3.1
Tabela Cota x Área, e Cota x Volume do Reservatório de Jirau

Cota (m)	Área (km ²)	Volume (hm ³)	Cota (m)	Área (km ²)	Volume (hm ³)
65,00	0,00	0,00	80,00	79,88	585,31
66,00	5,31	2,66	81,00	86,31	668,40
67,00	10,61	10,61	82,00	93,01	758,07
68,00	15,66	23,75	83,00	100,85	855,00
69,00	20,62	41,89	84,00	111,96	961,40
70,00	25,86	65,13	85,00	128,23	1.081,50
71,00	31,10	93,61	86,00	147,65	1.219,44
72,00	36,07	127,19	87,00	171,30	1.378,91
73,00	41,39	165,92	88,00	197,23	1.563,18
74,00	46,48	209,85	89,00	224,47	1.774,02
75,00	51,77	258,98	90,00	258,00	2.015,26
76,00	56,91	313,31	91,00	305,44	2.296,98
77,00	62,18	372,85	92,00	375,60	2.637,50
78,00	67,86	437,87	93,00	433,55	3.042,07
79,00	73,56	508,58	94,00	492,68	3.505,19

O aproveitamento será operado com NA normal de operação variável ao longo do ano, como recurso para que o remanso provocado pelo reservatório não altere os níveis d’água atuais do rio Madeira a montante de Abunã, para a vazão média mensal de cada mês. Em razão dessa regra operativa, as características do reservatório se modificam mês a mês, conforme pode ser visto na Tabela 3.2.

Nesta Tabela são apresentados: a área do reservatório, a área do estirão fluvial em condições naturais, o volume do reservatório, seu comprimento, o tempo de residência

médio mensal, estimado pelo quociente entre o volume do reservatório e a vazão média mensal, a profundidade média, estimada pelo quociente entre o volume e a área do reservatório, e o acréscimo de área inundada obtido pela diferença entre a área inundada com reservatório e em condições naturais.

A área do reservatório, o volume, e a profundidade média aumentam no período de cheias diminuindo no período de estiagem. Por outro lado, o comprimento do reservatório tem um comportamento diferente, diminuindo no período de cheias e aumentando no período de estiagem.

- O tempo de residência, em geral muito pequeno, varia de um mínimo de cerca de 18 horas em março a um máximo de 40 horas em setembro;
- O acréscimo de área inundada é também muito pequeno variando entre 108 e 31 km², respectivamente em janeiro e setembro.

Considerando o reservatório em sua cota máxima operativa (cota 90,00m) podem ser ainda definidas as seguintes características morfométricas:

Largura média	2,39 km
Diâmetro equivalente	18,12 km
Perímetro	664 km
Índice de desenvolvimento de margens - IDM	11,56
IDM do retângulo de área equivalente	3,85

O índice de desenvolvimento de margens é elevado, situando-se entre os maiores dentre os reservatórios brasileiros. Este valor certamente está afetado pela influência dos afluentes remansados (maior devido à pequena área inundada) e pela própria forma alongada do reservatório (ver IDM do retângulo equivalente). De qualquer forma, reflete a existência das inúmeras reentrâncias que ocorrem, particularmente na margem direita, que é mais acidentada. Este índice sugere a existência de bolsões com qualidade da água inferior à do corpo do reservatório.

O mais importante desses bolsões corresponde à área inundada junto à foz do rio Mutumparaná, que deverá constituir um ambiente destacado em relação ao corpo principal do reservatório.

Tabela 3.2
Características Morfométricas do Reservatório do AHE Jirau

Mês	Vazão Média Mensal	Reservatório						Área do Estirão Fluvial em Condições Naturais	Acréscimo de Área
		NA operativo	Área	Extensão	Volume	Tempo de Residência	Profundidade Média		
	m ³ /s	m	km ²	Km	hm ³	h	m	km ²	km ²
Janeiro	23.900	90,0	244,03	108,650	2015,26	23	8,26	136,45	107,58
Fevereiro	29.100	90,0	220,03	88,300	2015,26	19	9,16	133,74	86,29
Março	33.600	90,0	200,22	70,418	2015,26	17	10,07	132,46	67,76
Abril	30.200	90,0	220,02	84,825	2015,26	19	9,16	133,89	86,13
Maio	22.700	89,5	225,51	108,000	1894,64	23	8,40	137,42	88,09
Junho	15.900	87,0	168,63	113,288	1378,91	24	8,18	121,10	47,53
Julho	10.600	85,0	155,27	128,302	1081,50	28	6,97	124,02	31,25
Agosto	6.800	83,0	138,38	128,302	855,00	35	6,18	115,54	22,84
Setembro	5.600	82,5	136,87	128,302	806,54	40	5,89	109,94	26,93
Outubro	6.800	83,0	138,38	128,302	855,00	35	6,18	115,54	22,84
Novembro	10.400	85,0	155,27	128,302	1081,50	29	6,97	124,02	31,25
Dezembro	16.600	87,5	171,72	115,927	1471,05	25	8,57	120,74	50,98
Mínimo	5.600	82,5	136,87	70,42	806,54	17	5,9	109,94	22,84
Médio	17.683	86,9	181,19	110,91	1457,10	26	7,8	125,41	55,79
Máximo	33.600	90,0	244,03	128,30	2015,26	40	10,1	137,42	107,58

3.1.2. Reservatório do AHE Santo Antônio

O AHE Santo Antônio será implantado na parte final do “trecho das corredeiras” do rio Madeira, formando um reservatório com área de 271 km², em seu nível d’água máximo normal, e volume total de 2.075 hm³. A Tabela 3.3 apresenta a curva cota-área-volume do reservatório de Santo Antônio.

Tabela 3.3
Tabela Cota x Área, e Cota x Volume do Reservatório de Santo Antônio

Cota (m)	Área (km²)	Volume (hm³)	Cota (m)	Área (km²)	Volume (hm³)
40,00	4,58	24,15	58,00	40,04	274,64
41,00	5,05	28,97	59,00	47,43	318,38
42,00	5,64	34,31	60,00	58,31	371,24
43,00	6,22	40,24	61,00	79,51	440,15
44,00	6,75	46,73	62,00	102,28	531,05
45,00	7,10	53,65	63,00	133,32	648,84
46,00	7,45	60,92	64,00	159,08	795,04
47,00	8,14	68,72	65,00	180,30	964,73
48,00	8,91	77,24	66,00	197,41	1153,58
49,00	9,80	86,60	67,00	214,18	1359,38
50,00	10,49	96,74	68,00	226,80	1579,87
51,00	11,53	107,75	69,00	246,23	1816,38
52,00	13,76	120,39	70,00	271,26	2075,13
53,00	16,30	135,42	71,00	306,54	2364,03
54,00	20,75	153,94	72,00	344,95	2689,78
55,00	25,12	176,88	73,00	395,27	3059,88
56,00	30,00	204,44	74,00	438,52	3476,78
57,00	35,18	237,03	75,00	480,40	3936,24

Considerando o reservatório em sua cota máxima operativa (cota 70,00m), podem ser ainda calculados os seguintes índices morfométricos:

Profundidade média
Comprimento

7,70 km
125 km

Largura média	2,17 km
Diâmetro equivalente	18,58 km
Perímetro	806 km
Índice de desenvolvimento de margens - IDM	13,71
IDM do retângulo de área equivalente	3,76

O índice de desenvolvimento de margens, da mesma forma que em Jirau, é elevado e reflete, igualmente, a influência dos afluentes remansados, além da própria forma alongada do reservatório (ver IDM do retângulo equivalente). No caso de Santo Antônio, entretanto, em vez de grandes bolsões laterais ao corpo principal, o que se nota é um grande conjunto de pequenos afluentes, cada um recebendo grande influência do remanso do reservatório.

Destaca-se no reservatório de Santo Antônio sua reduzida profundidade média, inferior a 10 m. Como o barramento é construído a montante de uma queda natural, a cachoeira de Santo Antônio, e provoca o afogamento outra queda natural pouco a montante, a cachoeira Teotônio, a profundidade do trecho restante, que corresponde à maior porção do comprimento do reservatório, é baixa.

3.2. ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE ESTRATIFICAÇÃO E EUTROFIZAÇÃO

3.2.1. Estratificação

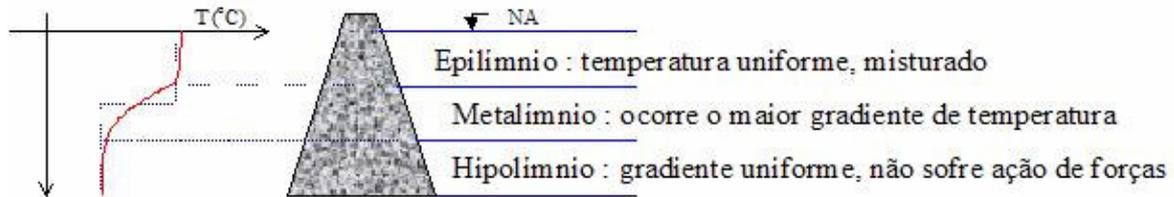
Com a formação dos reservatórios, as condições de qualidade da água se alteram, devendo essas mudanças ser estudadas para prognóstico da condição ambiental futura e dos impactos que podem surgir. Alguns aspectos, no que tange à qualidade da água, devem ser avaliados, como níveis de concentração de DBO, oxigênio dissolvido, nutrientes, propriedades físicas, como temperatura e turbidez e condições de eutrofização.

A temperatura da água, mais especificamente, o perfil vertical de temperatura, é o mais importante parâmetro para a modelagem da água de lagos e reservatórios. A razão dessa importância é o seu papel na determinação da estabilidade térmica, que regula não somente as trocas verticais de energia, mas também as de nutrientes. Quanto maior for o gradiente vertical, maior a estabilidade, e mais restritas as trocas verticais.

Em lagos e reservatórios onde a profundidade é grande e a velocidade longitudinal é, em geral, pequena, as características do barramento podem produzir estratificação vertical de temperatura, massa específica e de parâmetros de qualidade da água. Embora este não seja o caso dos reservatórios de Jirau e Santo Antônio, é conveniente analisar a questão, pelo menos de forma preliminar, para melhor justificar a abordagem proposta no presente trabalho.

Quando a estratificação de temperatura ocorre, formam-se as camadas ditas epilímnio, metalímnio e hipolímnio (Figura 3.4).

Figura 3.4
Gradiente de Temperatura em Reservatórios



O epilímnio tende a ter temperatura uniforme e estar misturado devido às ações externas. No metalímnio ocorre o maior gradiente de temperatura denominado de termoclina. Nesta zona se equilibram as ações do vento, radiação solar e empuxo da massa d'água. No hipolímnio o gradiente é uniforme e a massa d'água não sofre a ação das forças externas.

Essas forças podem modificar a posição da termoclina por aprofundamento do epilímnio.

As condições externas que influenciam no processo de estratificação são:

- radiação solar;
- ação do vento;
- entrada e saída do fluxo e sua temperatura.

A ação do vento produz turbulência e mistura das diferentes camadas do reservatório, sendo um importante elemento de estabilização em reservatórios rasos. A radiação solar, com o aquecimento da camada superior produz sua expansão e redução de densidade. O fluxo de entrada e saída da água no reservatório também tem influência nesse processo, devido às suas características de volume, temperatura, densidade e concentração dos parâmetros associados às vazões afluentes e defluentes.

Para uma análise preliminar das condições de qualidade da água dos reservatórios criados pelas futuras barragem de Jirau e Santo Antônio, serão utilizados dois métodos já consagrados, que avaliam a possibilidade de estratificação considerando o tempo de residência (ou tempo de detenção) e o número de Froude Densimétrico, respectivamente. Estas avaliações preliminares são importantes para a definição da necessidade e tipo de modelo matemático a se utilizar para uma análise mais detalhada. Os critérios, a metodologia e os resultados encontrados são descritos a seguir.

Do ponto de vista geral, Water Resources Engineers Inc. (referência 8) classificou os reservatórios com base no tempo de detenção, que é a relação entre volume e a vazão média de entrada. A classificação é a seguinte:

- Pequena vazão/volume – Neste caso classificam-se grandes reservatórios com tempo de detenção maior do que um ano. Pequenas variações sazonais ocorrem no armazenamento e a vazão de saída é retirada da superfície.

- Vazão média/volume – Também são classificados grandes reservatórios com tempo de detenção entre quatro meses e um ano. Estes reservatórios apresentam estratificação e grande variação do armazenamento.
- Grande vazão/volume – Reservatórios nesta classe são geralmente do tipo escoamento de rio com tempo de detenção menor que 4 meses. A estratificação é difícil de se formar e a variação longitudinal da temperatura pode ocorrer.

Aplicando-se este critério aos reservatórios de Jirau e Santo Antônio obtém-se os resultados apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5
Análise da Estratificação Pelo Critério do Tempo de residência

Reservatório	Jirau	Santo Antônio
Vazão Média (m³/s)	17.687	17.983
Vazão Mínima (m³/s)	3.591	3.651
Volume (hm³)	2.015	2.075
Tempo de Residência Médio	32 horas	32 horas
Tempo de Residência Máximo	6,5 dias	6,6 dias
Prognóstico	Não estratifica	Não estratifica

De acordo com a referência 8, estes resultados indicam que os dois reservatórios são do tipo “rio”, não devendo apresentar estratificação.

O outro processo para avaliação preliminar da estratificação térmica do reservatório, considera a equação baseada no número de Froude Densimétrico. A equação é a seguinte:

$$Fd = \sqrt{\frac{1}{g * e} \frac{L * Q}{Dm * V}}$$

Onde:

- Fd = número de Froude Densimétrico;
- L = comprimento do reservatório (m);
- Dm = profundidade média do reservatório (m);
- V = volume do reservatório em m³/s;
- g = aceleração da gravidade (9,81 m/s²);
- e = gradiente médio de massa específica.

As condições de estratificação a partir do Froude Densimétrico são as seguintes:

- se $Fd > 1 \rightarrow$ sistema misturado;
- se $Fd < 1/\pi = 0,3183 \rightarrow$ sistema estratificado;
- se $0,3183 < Fd < 1 \rightarrow$ estratificação intermitente.

Esta equação se baseia na comparação entre a força de inércia do fluxo que atravessa o reservatório e a força gravitacional que tende a manter a estabilidade densimétrica. Transformando a equação acima para unidades convenientes e adotando para gradiente médio de massa específica o valor $\epsilon = 0,9843E-06$ (referência 9), resulta

$$Fd = 0,32 \frac{L * Q}{H * V}$$

Onde:

- L – comprimento, em Km,
- Q – vazão em trânsito, em m³/s,
- H – profundidade média, em m e
- V – volume, em 10⁶ m³.

Aplicando-se este critério aos reservatórios de Jirau e Santo Antônio obtém-se os resultados apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6
Análise da Estratificação Pelo Critério do Número de Froude Densimétrico

Reservatório	Jirau	Santo Antônio
Volume (hm ³)	2.015	2.075
Comprimento (km)	108	125
Profundidade Média (m)	10,1	7,6
Vazão Média (m ³ /s)	17.687	17.983
Froude Densimétrico	30	45,6
Prognóstico	Não estratifica	Não estratifica
Vazão Mínima (m ³ /s)	3.591	3.651
Profundidade Máxima (m)	30	30
Froude Densimétrico	2,05	2,35
Prognóstico	Não estratifica	Não estratifica

Foram realizados dois cálculos, o primeiro com vazões e profundidades médias e o segundo com vazões mínimas e profundidades máximas estimadas junto à barragem. Nos dois casos, o número de Froude Densimétrico ficou muito acima do limite considerado para estratificação.

3.2.2. Eutrofização

A eutrofização é o processo natural de enriquecimento das águas com os nutrientes necessários ao crescimento da vida vegetal aquática (Referência 9), manifestando-se por meio do aumento da produtividade biológica do lago ou reservatório. Pode-se classificar lagos e reservatórios de acordo com essa produtividade em oligotróficos, mesotróficos e eutróficos.

Um reservatório ou lago é eutrófico quando é rico em nutrientes, apresentando alta produtividade biológica, e oligotrófico em caso contrário. Os lagos mesotróficos, de produtividade média, representam um estado intermediário. Os nutrientes podem chegar ao reservatório através dos seguintes meios:

- Pelos rios afluentes que trazem cargas orgânicas domésticas, industriais, agrícolas e naturais;
- Carga orgânica decorrente da biomassa inundada;
- Demanda bentônica do fundo do lago que acumula as outras entradas por deposição de sedimentos.

Enquanto a eutrofização natural é um processo lento, a eutrofização associada à atividade humana, também chamada acelerada ou cultural, desequilibra o ambiente aquático podendo trazer a degradação das condições de qualidade da água, o crescimento de algas, e a formação de gases.

No meio aquático, as algas são os produtores primários. O crescimento das algas ocorre numa zona eufótica próxima à superfície, onde a intensidade da luz é apropriada para fotossíntese. A produtividade das algas é controlada principalmente pela intensidade da luz e pela presença de macro e micronutrientes.

O rio Madeira possui águas turvas, carregadas de matéria sólida em suspensão, apresentando transparência inferior a 20 cm em todos os ensaios realizados. Esta característica dificulta o crescimento das algas, fato que é refletido nos baixos teores de clorofila-a detectados (média de 2 ug/l). Essa condição pode ser ligeiramente alterada pela presença dos reservatórios, mas não se pode esperar grandes modificações porque as mudanças no escoamento serão pequenas, conforme demonstrado nos estudos sedimentológicos realizados (Referência 10).

Os afluentes do rio Madeira, por sua vez, possuem águas mais límpidas, com menores cargas de sedimento e maior transparência. Como os afluentes estão associados aos bolsões marginais dos reservatórios, o maior tempo de residência das águas nestes “apêndices”, associado com a maior penetração de luz solar e com pequenas profundidades, pode criar condições para a ocorrência de braços eutrofizados.

3.3. SELEÇÃO DO MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA

As análises realizadas quanto à geometria dos dois reservatórios do rio Madeira e às suas características hidráulicas permitiram concluir que o prognóstico da qualidade da água dos futuros reservatórios e do rio Madeira a jusante pode ser desenvolvido com emprego de um modelo unidimensional de qualidade da água, de aplicação tipicamente fluvial.

Optou-se por empregar o modelo QUAL2E, por se tratar de um modelo versátil, de aplicação bastante difundida e de domínio público (Referências 11 e 12). Este modelo permite simular um número grande de constituintes de qualidade da água, considerando que estão completamente misturados ao escoamento.

O QUAL2E pode simular as reações acopladas OD-DBO, considerando demandas carbonáceas e nitrogenadas, os processos de fósforo e nitrogênio, temperatura e proliferação de algas, além de constituintes conservativos ou com decaimento de primeira ordem.

Uma descrição do modelo é apresentada no item 5, identificando suas principais funcionalidades e o emprego dado ao mesmo no presente trabalho.

Não serão abordados neste trabalho os processos associados aos bolsões inundados lateralmente ao rio Madeira, para os quais recomenda-se a realização de estudos específicos de aprimoramento.

4. DETERMINAÇÃO DAS CARGAS DEVIDO AO AFOGAMENTO DA VEGETAÇÃO

4.1. METODOLOGIA

A estimativa da densidade de carbono biodegradável, expressa em kg/m^2 , foi definida com base nas áreas ocupadas por cada espécie vegetal, agrupadas por tipologia.

A partir das áreas relativas a cada tipologia, foram definidas as densidades de carbono biodegradável presentes na área diretamente afetada pelo reservatório, respeitando-se a seguinte sistemática:

- Determinação do potencial de biomassa, expresso em toneladas por hectare, discretizada por tipologia vegetal e tipo de matéria orgânica, representados pelas seguintes parcelas: biomassa estocada (serrapilheira) e biomassa verde (biomassa viva acima do solo).
- A partir dos dados do potencial de biomassa, foi definida para cada tipologia, a quantidade de carbono presente, considerando uma taxa média de carbono sobre a biomassa potencial.
- A quantidade de carbono presente na biomassa verde foi discretizada, de modo a quantificar apenas o carbono presente na matéria orgânica de rápida decomposição (galho, folha e casca). Para esta discretização, foram empregados os resultados dos estudos realizados para o reservatório da UHE Samuel, no rio Jamari.
- Considerando-se a massa total de carbono presente em cada tipologia, foi estimada a quantidade de carbono biodegradável componente de cada tipo de matéria orgânica. Nesta sistemática consideraram-se os resultados dos ensaios de biodegradação realizados em laboratório, elaborados para o EIA/ RIMA da UHE Porto Primavera para a CESP (Consórcio Themag-Engea-Umah). Os ensaios revelaram a composição das seguintes taxas de carbono biodegradável: folhas= 0,20; galhos= 0,11; cascas= 0,082 e serrapilheira= 0,25.
- Considerando-se as parcelas dos estratos vegetais identificados na área diretamente afetada, definiu-se, pela média ponderada, a densidade média de carbono biodegradável presente em cada reservatório.

Nos cálculos, desconsiderou-se a matéria vegetal integrante do tronco (fuste) e dos galhos grossos, tendo em vista as baixas taxas de biodegradação normalmente verificadas nestes substratos.

4.2. CÁLCULO DA BIOMASSA NA ÁREA DOS RESERVATÓRIOS

A qualidade da água do rio madeira, após o estabelecimento dos reservatórios de Santo Antônio e Jirau, será alterada devido à modificação nas propriedades hidráulicas do trecho represado (menores velocidades, criação de bolsões sem circulação,

diminuição da reaeração devido à queda da turbulência, etc.) e também devido ao aumento na quantidade de nutrientes disponibilizados pela matéria orgânica presente na área inundada.

Esta matéria orgânica se apresenta de diferentes formas, cada uma delas possuindo características próprias. Para fins do presente trabalho, a matéria orgânica foi dividida em duas categorias: a biomassa estocada no piso da floresta na forma de serrapilheira e a biomassa aérea em pé.

A serrapilheira é o material recentemente depositado sobre o chão da floresta, constituído por folhas, ramos, flores, frutos e outras partes constituintes do corpo das plantas. Camadas de serrapilheira podem representar uma fonte de nutrientes que podem ser rapidamente decompostas facilitada pela sua estrutura composta por partículas pequenas.

As folhas concentram grande parte dos nutrientes de reciclagem periódica, sendo responsáveis pela maior fração de serrapilheira produzida pela floresta. Além do grande volume produzido, as folhas são de fácil e rápida decomposição, liberando assim grande quantidade de nutrientes no sistema e alterando a qualidade da água logo após o represamento.

A biomassa aérea em pé, ou biomassa verde, constitui-se da própria comunidade florestal da área atingida pelo represamento. Esta biomassa, principalmente as folhas, flores, frutos e ramos de pequeno calibre, poderá vir a somar-se à biomassa estocada, quando do represamento, pela morte repentina dos indivíduos. A qualidade da água poderá a vir a ser afetada pela decomposição maciça desta biomassa.

Durante a realização do diagnóstico do uso da terra e da cobertura vegetal das áreas de influência dos aproveitamentos hidrelétricos de Jirau e Santo Antônio, foi elaborada uma estimativa da biomassa estocada e da biomassa verde para a área diretamente afetada – ADA.

A estimativa da biomassa estocada foi realizada com base em amostras de serrapilheira coletadas em 349 pontos amostrais distribuídos na área de influência dos dois aproveitamentos, contemplando quatro formações vegetacionais características: Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas, Floresta Ombrófila Aluvial, Campinarana Florestada e Campinarana Arborizada. A Tabela 4.1 a seguir mostra a distribuição dos pontos amostrais pelas diversas tiopologias de vegetação.

Tabela 4.1
Número de Pontos de Coleta de Serrapilheira por Formação Vegetacional, Nas Áreas dos Dois Aproveitamentos Hidrelétricos

	Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas	Floresta Ombrófila Aluvial	Campinarana Florestada	Campinarana Arborizada
AHE Salto do Jirau	70	40	70	26
AHE Sto Antônio	51	92	-	-

Em cada ponto amostral foram coletadas quatro subamostras, marcadas a campo por um gabarito de madeira medindo 0,5 x 0,5 m de lado, perfazendo uma área de 0,25 m². Assim, cada amostra foi constituída de 1 m² de área. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e identificadas com o número do ponto de coleta. Em seguida, o material passou por uma pré-secagem em sacos de papel e em seguida encaminhadas para secagem em estufas a 60°C, até atingirem peso constante. Posteriormente foram pesadas para determinação do peso seco. Para diminuir erros procedentes de pesagem, para cada sub-amostra procedeu-se a duas aferições e tirou-se a média.

A Tabela 4.2 a seguir mostra os valores de biomassa estocada na serrapilheira para as quatro fisionomias vegetais estudadas, na área de influência dos dois aproveitamentos.

Tabela 4.2
Biomassa Estocada na Serrapilheira (ton/ha)

	Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas	Floresta Ombrófila Aluvial	Campinarana Florestada	Campinarana Arborizada
AHE Salto do Jirau	8,10	10,14	9,72	11,37
AHE Sto Antônio	10,96	15,02		

Para a estimativa da biomassa aérea, o material básico de trabalho consistiu nas tabelas de saída do inventário florestal, relativo a todas as árvores com DAP > 10 cm, exceto para a campinarana arborizada com DAP > 5 cm. Os dados utilizados se referem a um total de cinco formações florestais: floresta ombrófila aberta de terras baixas, floresta ombrófila aluvial, transição de floresta ombrófila aberta de terras baixas e campinarana florestada, campinarana florestada e campinarana arborizada. A estimativa de biomassa aérea verde das formações florestais foram calculadas através da equação desenvolvida por Brown (Referência 13):

$$Y = 42,69 - 12,8(d) + 1,242(d^2)$$

sendo d = diâmetro centro de classe.

A Tabela 4.3 a seguir mostra os valores de biomassa verde estimados para as quatro fisionomias vegetais estudadas, na área de influência dos dois aproveitamentos.

Tabela 4.3
Biomassa Verde na Área dos Aproveitamentos de Jirau e Santo Antônio (ton/ha)

	Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas	Floresta Ombrófila Aluvial	Campinarana Florestada	Campinarana Arborizada
AHE Salto do Jirau	311,13	308,15	209,56	60,58
AHE Sto Antônio	286,52	364,67		

Foi ainda determinada, para a transição entre Floresta Aberta e Campinarana Florestada a biomassa verde de 193,99 ton/ha.

4.3. DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CARBONO PRESENTE NA BIOMASSA

Para determinação da quantidade de carbono presente na biomassa foi considerada uma taxa média de 50% sobre o peso seco.

Assim, para a biomassa estocada os valores apresentados no Quadro 4.2 foram simplesmente multiplicados por 0,50 para o cálculo da massa de carbono presente na Serrapilheira.

Da mesma forma, para a biomassa verde os valores apresentados no Quadro 4.3 foram simplesmente multiplicados por 0,50 para o cálculo da massa de carbono presente na biomassa acima do solo.

As Tabelas 4.4 e 4.5, a seguir, apresenta os resultados das estimativas de quantidade de carbono nas diferentes formações vegetais estudadas nas áreas dos dois aproveitamentos.

Tabela 4.4
Quantidade de Carbono Estocado na Serrapilheira (ton/ha)

	Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas	Floresta Ombrófila Aluvial	Campinarana Florestada	Campinarana Arborizada
AHE Salto do Jirau	4,05	5,07	4,86	5,68
AHE Sto Antônio	5,48	7,51		

Tabela 4.5
Quantidade de Carbono Presente na Biomassa Verde, na Área dos Aproveitamentos de Jirau e Santo Antônio (ton/ha)

	Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas	Floresta Ombrófila Aluvial	Campinarana Florestada	Campinarana Arborizada
AHE Salto do Jirau	155,6	154,1	104,8	30,3
AHE Sto Antônio	143,3	182,3		

4.4. DISCRETIZAÇÃO DA BIOMASSA VIVA ACIMA DO SOLO

A biomassa viva acima do solo, ou biomassa verde, compreende os troncos (fuste), os galhos, galhos finos e folhas (folhas, flores e frutos). Para discretizar a biomassa calculada para cada uma das cinco formações vegetais estudadas na área de influência dos aproveitamentos de jirau e Santo Antônio tomou-se por base o resultado dos estudos realizados para o reservatório da UHE Samuel, no rio Jamarí, relatados por Cardenas (Referência 14).

Considerando os dados fornecidos de duas quadras do reservatório e apropriando apenas as parcelas correspondentes à biomassa verde determinada, foram obtidos os percentuais para cada parcela apresentados na Tabela 4.6, a seguir.

Tabela 4.6
Divisão da Biomassa Verde, Modificado de Cárdenas (op. Citado)

FRAÇÃO DA BIOMASSA VERDE	Participação no Total
Fuste (troncos)	50.00%
Galhos grossos e médios	17.40%
Galhos finos no dossel, no sub-bosque e cipós	16,60%
Folhas no dossel e no sub-bosque	7.60%
Cascas	8.40%

Com base nessa discretização, e considerando-se que a matéria vegetal integrante do tronco e dos galhos grossos apresenta baixas taxas de biodegradação, nota-se que apenas uma parcela de 33% da biomassa verde representa, ao ser afogada, um acréscimo significativo de demanda de oxigênio para o corpo d'água. A decomposição dos troncos e galhos se dá em períodos muito longos, introduzindo apenas uma pequena elevação da demanda basal de oxigênio.

As Tabela 4.7 e 4.8, a seguir, apresentam, respectivamente para os reservatórios de Jirau e Santo Antônio, a distribuição do estoque de carbono disponível na biomassa verde pelas parcelas rapidamente biodegradáveis, aplicando a distribuição levantada para o reservatório do AHE Samuel, apresentada na Tabela 4.6, aos totais

Modelagem da Qualidade da Água dos Reservatório do Rio Madeira

apresentados na Tabela 4.4. Apresentam também, ao final, o estoque de carbono na serrapilheira, que também é rapidamente biodegradável, obtido diretamente da Tabela 4.5.

Tabela 4.7
Distribuição do Carbono Total Presente na Biomassa Afogada Pelo Reservatório de Jirau
(Por Formação Vegetal - Apenas nas Parcelas Rapidamente Biodegradáveis)

	Carbono Total na Biomassa Verde (t/ha)	Carbono na Parcela Rapidamente Biodegradável			
		galhos	folhas	casca	serrapilheira
		16,6%	7,6%	8,4%	(inventário)
Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas	155,6	25,83	11,83	13,07	4,05
Floresta Ombrófila Aluvial	154,1	25,58	11,71	12,94	5,07
Campinarana Florestada	104,8	17,40	7,96	8,80	4,86
Campinarana Arborizada	30,3	5,03	2,30	2,55	5,68
Transição entre Floresta Aberta e Campinarana Florestada	97,0	16,10	7,37	8,15	4,97

Tabela 4.8
Distribuição do Carbono Total Presente na Biomassa Afogada Pelo Reservatório de Santo Antônio
(Por Formação Vegetal - Apenas nas Parcelas Rapidamente Biodegradáveis)

	Carbono Total na Biomassa Verde (t/ha)	Carbono Total nas Parcelas Rapidamente Biodegradáveis			
		galhos	folhas	casca	serrapilheira
		16,6%	7,6%	8,4%	(inventário)
Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas	143,3	23,79	10,89	12,04	5,48
Floresta Ombrófila Aluvial	182,3	30,26	13,85	15,31	7,51

4.5. QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO OXIDÁVEL NA PARCELA RAPIDAMENTE DEGRADÁVEL

Para determinação da quantidade de carbono oxidável presente em cada parcela vegetal, foram consideradas as taxas determinadas nos estudos de biodegradação realizados em laboratório para os EIA/RIMA da UHE Porto Primavera, que foram as seguintes:

- . Folhas → 20,0%
- . Galhos → 11,0%
- . Cascas → 8,2%
- . Serrapilheira → 25%

Os cálculos foram efetuados a partir das Tabelas 4.7 e 4.8, já apresentados, nos quais se desconsiderou a matéria vegetal integrante do tronco e dos galhos grossos, tendo em vista as baixas taxas de biodegradação normalmente verificadas neste substrato.

As Tabelas 4.9 e 4.10, a seguir, resumem o conteúdo de carbono oxidável disponível nas parcelas rapidamente degradáveis em cada uma das formações vegetacionais estudadas para a área de influência dos aproveitamentos de Jirau e Santo Antônio.

A partir desses quadros, e considerando as áreas correspondentes a cada formação vegetacional, pode ser determinada a quantidade total de carbono oxidável afogado em cada reservatório, para estimação da carga de demanda bioquímica de oxigênio associada.

Tabela 4.9
Determinação do Carbono Oxidável Por Total no Reservatório de Jirau
(Por Formação Vegetal - Apenas nas Parcelas Rapidamente Biodegradáveis)

	Carbono Oxidável nas Parcelas Rapidamente Biodegradáveis				Carbono Oxidável Total (ton/ha)
	galhos	folhas	casca	serrapilheira	
	11,0%	20,0%	8,2%	25%	
Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas	2,84	2,37	1,07	1,01	7,29
Floresta Ombrófila Aluvial	2,81	2,34	1,06	1,27	7,49
Campinarana Florestada	1,91	1,59	0,72	1,22	5,44
Campinarana Arborizada	0,55	0,46	0,21	1,42	2,64
Transição entre Floresta Aberta e Campinarana Florestada	1,77	1,47	0,67	1,24	5,16

Tabela 4.10
Determinação do Carbono Oxidável Total no Reservatório de Santo Antônio
(Por Formação Vegetal - Apenas nas Parcelas Rapidamente Biodegradáveis)

	Carbono Oxidável nas Parcelas Rapidamente Biodegradáveis				Carbono Oxidável Total (ton/ha)
	galhos	folhas	casca	serrapilheira	
	11,0%	20,0%	8,2%	25%	
Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas	2,62	2,18	0,99	1,37	7,15
Floresta Ombrófila Aluvial	3,33	2,77	1,26	1,88	9,23

4.6. CÁLCULO DA DENSIDADE MÉDIA DO CARBONO DEGRADÁVEL NOS RESERVATÓRIOS

As Tabelas 4.11 e 4.12, obtidos do diagnóstico do uso da terra e da cobertura vegetal das áreas de influência dos aproveitamentos hidrelétricos de Jirau e Santo Antônio, apresentam as classes de uso e cobertura vegetal presentes nas áreas diretamente afetadas dos dois reservatórios.

As parcelas que contribuem com biomassa afogada encontram-se enfatizadas, nesses quadros.

Tabela 4.11
Classes de uso e cobertura vegetal presentes na AID, entorno e ADA do AHE Jirau

Classes / Código adotados no banco de dados georreferenciado	Área Inundada (ha)	%
Floresta ombrófila aberta submontana com palmeiras (Faps)	4,05	0,02
Associação de Floresta ombrófila aberta das terras baixas com palmeiras com floresta ombrófila aberta aluvial (Fap + Fal)	7.665,98	30,16
Transição de floresta ombrófila aberta das terras baixas e campinarana florestada (Fap + Cf)	2.387,39	9,39
Campinarana Florestada (Cf)	483,15	1,90
Associação de Campinarana Gramíneo-Lenhosa com Campinarana Arborizada (Cgl + Carb)	414,92	1,63
Formações pioneiras de várzea (Fpv)	432,65	1,70
Afloramentos rochosos (Ar)	218,64	0,86
Bancos de Areia (Ba)	334,08	1,31
Pastagem (P)	1.784,23	7,02
Desmatamento (D)	43,80	0,17
Ocupação ribeirinha (Or)	371,05	1,46
Área urbana (Au)	74,37	0,30
Corpo de Água (Ag)	11.202,63	44,08
TOTAL	25.416,96	100

Tabela 4.12
Classes de uso e cobertura vegetal presentes na AID, entorno e ADA
do AHE Santo Antônio

Classes / Códigos adotados no banco de dados georreferenciado	Área Inundada (ha)	%
Associação de Floresta ombrófila aberta das terras baixas com palmeiras com floresta ombrófila aberta aluvial (Fap + Fal)	9.076,96	29,94
Formações pioneiras de várzea (Fpv)	1.371,70	4,52
Afloramentos rochosos (Ar)	354,89	1,17
Bancos de Areia (Ba)	1.473,38	4,86
Pastagem (P)	1.698,66	5,60
Desmatamento (D)	13,24	0,04
Ocupação ribeirinha (Or)	68,78	0,22
Área urbana (Au)	25,55	0,09
Mineração (M)	1,59	0,01
Psicultura (Ps)	15,15	0,05
Balneário (B)	3,15	0,02
Corpo de Água (Ag)	16.214,60	53,48
TOTAL	30.317,68	100

A massa total de carbono oxidável, expressa em toneladas, pode ser obtida com facilidade, apenas multiplicando-se a densidade de carbono oxidável de cada parcela, formação vegetal, expressa em ton/ha, pela área coberta pela formação. As Tabelas 4.13 e 4.14, a seguir, apresentam estes cálculos, respectivamente para o reservatório de Jirau e Santo Antônio.

Para as áreas de desmatamento, que logo apresentam características de formação de vegetação secundária, foi adotada a densidade de carbono oxidável correspondente a campinarana arborizada, ou seja, 2,05 ton/ha.

Para as áreas de Pastagem, não contempladas no diagnóstico, adotou-se uma densidade de 0,80 ton/ha, que corresponde ao valor obtido no inventário florestal realizado para os Estudos de Impacto Ambiental da UHE Serra do Facão.

obtendo-se a densidade média, ponderada pela porcentagem de participação de cada formação vegetal.

Tabela 4.13
Cálculo da Massa de Carbono Oxidável Afogada no Reservatório do AHE Jirau

Classes / Código adotados no banco de dados georreferenciado	Área Inundada (ha)	Densidade (ton/ha)	Carbono Oxidável (ton)
Floresta ombrófila aberta submontana com palmeiras (Faps)	4,05	7,49	30,3
Associação de Floresta ombrófila aberta das terras baixas com palmeiras com floresta ombrófila aberta aluvial (Fap + Fal)	7.665,98	7,29	55.885
Transição de floresta ombrófila aberta das terras baixas e campinarana florestada (Fap + Cf)	2.387,39	5,16	12.319
Campinarana Florestada (Cf)	483,15	5,44	2.628
Associação de Campinarana Gramíneo-Lenhosa com Campinarana Arborizada (Cgl + Carb)	414,92	2,64	1.095
Formações pioneiras de várzea (Fpv)	432,65	5,44	2.354
Pastagem (P)	1.784,23	0,80	1.427
Desmatamento (D)	43,80	2,64	115,6
TOTAL			75.854

Tabela 4.14
Cálculo da Massa de Carbono Oxidável Afogada no Reservatório do AHE Santo Antônio

Classes / Código adotados no banco de dados georreferenciado	Área Inundada (ha)	Densidade (ton/ha)	Carbono Oxidável (ton)
Associação de Floresta ombrófila aberta das terras baixas com palmeiras com floresta ombrófila aberta aluvial (Fap + Fal)	9.076,96	7,15	64.900
Formações pioneiras de várzea (Fpv)	1.371,70	5,44	7.462
Pastagem (P)	1.698,66	0,80	1.359
Desmatamento (D)	13,24	2,64	35,0
TOTAL			73.756

4.7. INCORPORAÇÃO DA FITOMASSA NOS RESERVATÓRIOS

A vegetação afogada corresponde a uma carga total de 76.000 toneladas de carbono oxidável, no reservatório de Jirau, e 74.000 toneladas de carbono oxidável, no reservatório de Santo Antônio. A transferência destas cargas para os corpos d'água se dá gradualmente, seja devido ao processo de solubilização da biomassa afogada, seja devido ao processo de afogamento da biomassa, à medida em que o reservatório vai enchendo.

Pode-se admitir que a biomassa afogada vai sendo solubilizada a uma taxa de 0,080/dia, ou seja, a cada dia, 8% do carbono oxidável remanescente na biomassa afogada se torna disponível. Mas a cada dia, apenas uma fração da biomassa total, conforme determinada no item 4.6, é afogada pelo reservatório, durante o processo de enchimento. Assim, é necessário que se conheça o processo de enchimento dos reservatórios para que se possa determinar a quantidade de carbono oxidável solubilizado ao longo do tempo.

Apresenta-se, a seguir, uma análise da incorporação da fitomassa nos reservatórios de Jirau e Santo Antônio, considerando os processos de enchimento previstos nos estudos de viabilidade.

4.7.1. Reservatório de Jirau

O reservatório do AHE Jirau tem um volume pequeno em relação à magnitude das vazões afluentes. Por esta razão, seu enchimento ocorrerá em poucos dias, dependendo fundamentalmente da regra operativa que venha a ser adotada para o Vertedouro durante este período.

O cronograma de implantação do projeto estabelece o mês de outubro com meta para consolidação do fechamento do leito do rio pelas pré-ensecadeiras, com toda a vazão afluente passando pelo Vertedouro, que estará parcialmente concluído nessa ocasião. Durante o mês de novembro, serão realizados os trabalhos necessários para que o enchimento do reservatório possa ser concluído.

O tempo de enchimento foi calculado considerando a seguinte regra operacional para o Vertedouro:

- O Vertedouro será operado durante o período de elevação da ensecadeira de modo a manter a igualdade entre as vazões afluentes e defluentes, até a consecução da cota final das ensecadeiras (mês de outubro);
- Ao atingir as cotas finais das ensecadeiras o Vertedouro é parcialmente fechado de forma a garantir uma vazão mínima para jusante admitida por hipótese igual 3.240 m³/s que corresponde ao valor de $Q_{7,10}$ em AHE Jirau, e o enchimento do reservatório.

Admitindo a ocorrência de um ano hidrológicamente seco, definido como aquele com 90 % de permanência de vazões iguais ou maiores, a vazão afluente média mensal em

novembro é igual a 6.232 m³/s e o nível d'água inicial do reservatório é igual a 72,48 m (controlado pelo Vertedouro). O volume do reservatório entre esta cota e o NA normal operativo do mês de novembro, 85,00 m, é igual a 1.081 x 10⁶ m³. Nessas condições o tempo de enchimento do reservatório é de apenas 3,6 dias.

A Tabela 4.15 apresenta os cálculos de tempo de enchimento do reservatório de Jirau, para a primeira etapa, em novembro, considerando três situações hidrológicas distintas. Para efeito dos estudos de qualidade da água, a situação crítica corresponde, naturalmente, ao regime hidrológico mais seco, associado a uma permanência de 90% na Tabela.

Tabela 4.15
Tempos de Enchimento do Reservatório de Jirau – Primeira Etapa

Mês	Regime Hidrológico	Permanência	Vazões Afluentes m ³ /s	Reservatório						Tempos de enchimento dias
				NA inicial m	NA Operacional m	Volume Inicial 10 ⁶ m ³	Volume Final 10 ⁶ m ³	Diferença Volume 10 ⁶ m ³	Vazão Defluente m ³ /s	
Novembro	Seco	90%	6.232	72,48	85,00	145,78	1.081,50	935,72	3240	3,6
	Médio	50%	9.594	74,24	85,00	221,64	1.081,50	859,86	3240	1,6
	Úmido	10%	14.413	76,24	85,00	327,60	1.081,50	753,90	3240	0,8

A regra de operação definida para o reservatório de Jirau prevê que o NA máximo normal operativo seja variável ao longo do ano. Com o enchimento sendo feito em novembro (NA normal na El. 85,00 m), o reservatório somente estará completamente cheio em janeiro, quando o NA normal operativo alcança a Cota 90,00 m, sendo ainda necessária uma etapa intermediária em dezembro, quando o NA normal operativo é na El. 87,50 m. Assim, o enchimento do reservatório do AHE Jirau se processa em três etapas:

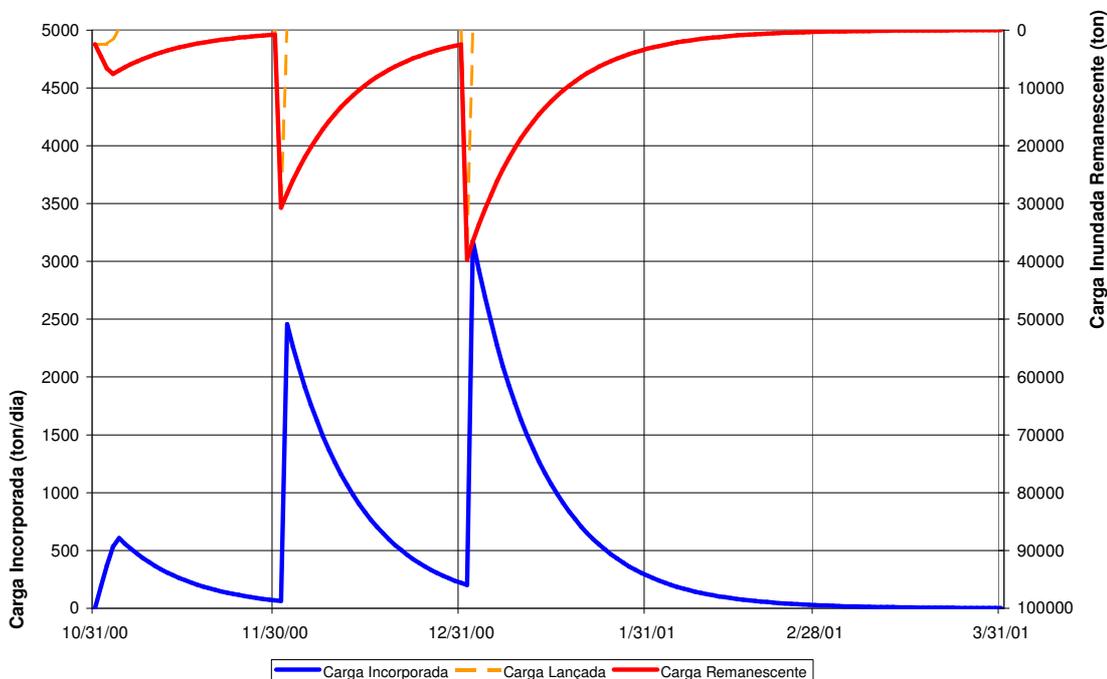
- Etapa 1 – enchimento no início de novembro, até a El. 85,00 m.
- Etapa 2 – elevação do NA operativo para a El. 87,50 m, no início de novembro; e
- Etapa 3 – elevação do NA operativo para a cota máxima, El. 90,00 m, no início de janeiro.

Conseqüentemente, a carga de carbono oxidável vai sendo incorporada ao reservatório (solubilizada) gradativamente, em função da parcela de biomassa que vai sendo afogada.

Foi elaborado um modelo simples de transferência de carbono rapidamente oxidável para o reservatório, para simular este processo de enchimento por etapas. O modelo vai acumulando a biomassa afogada, à medida em que o enchimento se processa, e calcula a carga transferida ao reservatório aplicando uma taxa de transferência de carbono de 0,080/dia sobre a massa de carbono remanescente.

A Figura 4.16 apresenta o resultado da simulação do enchimento do reservatório de Jirau em três etapas, informando a evolução cronológica da carga de carbono oxidável disponível e da carga transferida ao corpo hídrico.

Figura 4.16
Incorporação da Biomassa no Reservatório de Jirau



Este gráfico evidencia que existem três situações a serem analisadas, correspondentes às taxas máximas de transferência de carbono oxidável observadas em cada mês.

A Tabela 4.17 resume os principais resultados obtidos na simulação realizada, informando as cargas máximas verificadas em cada mês e as correspondentes vazões em trânsito (vazões com permanência de 90%). Considerando que o modelo de qualidade da água a ser empregado funciona em regime estacionário, julgou-se mais adequado realizar simulações considerando as cargas máximas de cinco dias. Deste modo, a Tabela 4.17 apresenta ainda as cargas de DBO, Nitrogênio e Fósforo calculadas a partir da transferência de carbono respeitando as seguintes relações:

- relação de demanda de oxigênio por matéria carbonácea = 2,7 kg(DBO)/kg(C)
- relação de nitrogênio por matéria carbonácea = 0,024542 kg(N)/kg(C)
- relação de fósforo por matéria carbonácea = 0,002971 kg(P)/kg(C)

Tabela 4.17
Cargas Transferidas ao Reservatório de Jirau Pela Biomassa Afogada

	Novembro	Dezembro	Janeiro
Vazão com Permanência de 90 % (m ³ /s)	6.232	10.402	17.500
Vazão residual durante o enchimento (m ³ /s)	3.240	3.240	3.240
Nível d'água do reservatório (m)	85,00	87,50	90,00
Tempo de enchimento (dias)	3,6	0,60	0,44

Tabela 4.17 (Continuação)
Cargas Transferidas ao Reservatório de Jirau Pela Biomassa Afogada

	Novembro	Dezembro	Janeiro
Carga máxima de carbono oxidável (ton/dia)	605	2.456	3.175
Carga máxima média de cinco dias (ton/dia)	536	2.093	2.706
Carga máxima média de dez dias (ton/dia)	459	1.736	2.245
DBO associada à média de 5 dias (ton/dia)	1.447	5.651	7.306
Nitrogênio associado à média de 5 dias (ton/dia)	13,2	51,4	66,4
Fósforo associado à média de 5 dias (ton/dia)	1,59	6,22	8,04

Este quadro define os cenários críticos de qualidade da água associados com o enchimento do reservatório de Jirau.

4.7.2. Reservatório de Santo Antônio

Da mesma forma que em Jirau, o reservatório do AHE Santo Antônio tem um volume pequeno em relação à magnitude das vazões afluentes, de forma que seu enchimento também ocorrerá em poucos dias.

O cronograma de implantação do projeto estabelece o mês de outubro com meta para consolidação do fechamento do leito do rio pelas pré-ensecadeiras, com toda a vazão afluente passando pelo Vertedouro, parcialmente construído, nessa ocasião. Durante o mês seguinte, novembro, será dado início ao enchimento do reservatório até seu nível d'água máximo normal, na El. 70,00 m, em uma única etapa.

O tempo de enchimento foi calculado considerando a seguinte regra operacional para o Vertedouro:

- O Vertedouro será operado durante o período de elevação da ensecadeira (outubro) de modo a manter a igualdade entre as vazões afluentes e defluentes, até a consecução da cota final das ensecadeiras;
- Ao atingir as cotas finais das ensecadeiras (início de novembro) o Vertedouro é parcialmente fechado de forma a garantir uma vazão mínima para jusante, admitida por hipótese igual $3.293 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde ao valor de $Q_{7,10}$ em AHE Santo Antônio, possibilitando o enchimento do reservatório.

Admitindo a ocorrência de um ano hidrológicamente seco, definido como aquele com 90 % de permanência de vazões iguais ou maiores, a vazão afluente média mensal em novembro é igual a $6.336 \text{ m}^3/\text{s}$ e o nível d'água do reservatório é igual a 50,95 m (controlado pelo Vertedouro). O volume do reservatório entre esta cota e o NA normal operativo, 70,00 m, é igual a $1.967,63 \times 10^6 \text{ m}^3$. Nessas condições o tempo de enchimento do reservatório é de apenas 7,5 dias.

A Tabela 4.18 apresenta os cálculos de tempo de enchimento do reservatório de Santo Antônio no mês de novembro, considerando três situações hidrológicas distintas. Para efeito dos estudos de qualidade da água, a situação crítica corresponde, naturalmente, ao regime hidrológico mais seco, associado a uma permanência de 90% na Tabela. A Tabela mostra também o que ocorreria se o enchimento fosse realizado em dezembro, numa eventual hipótese de atraso no cronograma de execução da obra.

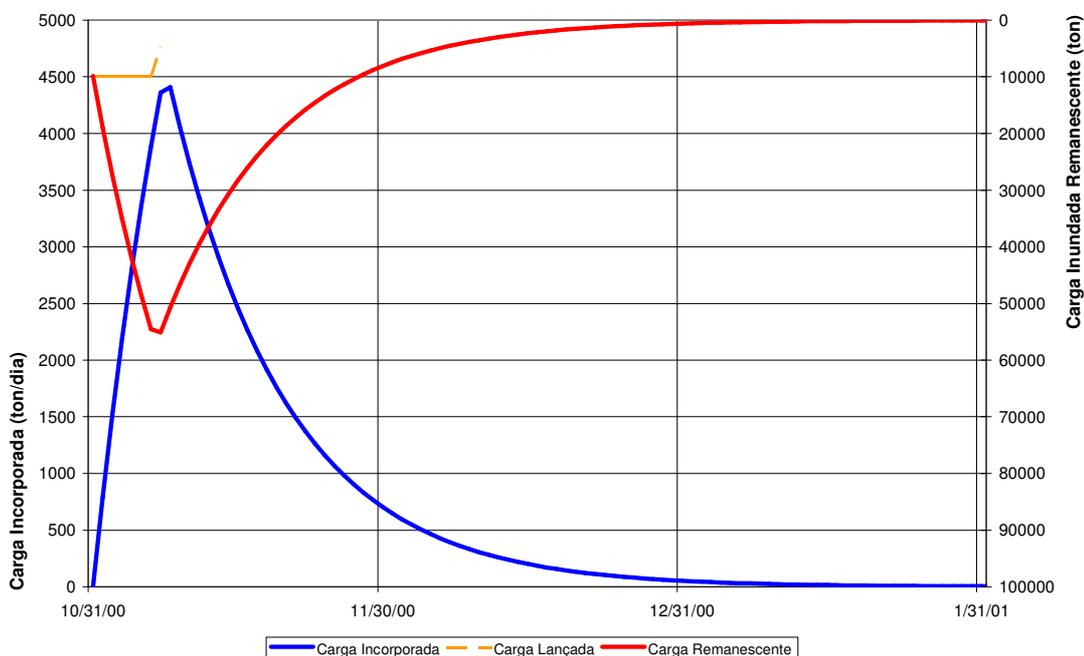
Tabela 4.18
Tempos de Enchimento do Reservatório de Santo Antônio

Mês de Enchimento	Regime Hidrológico	Permanência	Vazões Afluentes m ³ /s	Reservatório					Tempos de enchimento dias
				NA inicial m	Volume Inicial 10 ⁶ m ³	Volume Final 10 ⁶ m ³	Diferença Volume 10 ⁶ m ³	Vazão Defluente m ³ /s	
Novembro	Seco	90%	6.336	50,95	107,20	2.075,13	1.967,93	3.293	7,5
	Médio	50%	9.755	52,61	129,56	2.075,13	1.945,57	3.293	3,5
	Úmido	10%	14.654	54,55	166,56	2.075,13	1.908,57	3.293	1,9
Dezembro	Seco	90%	10.576	52,95	134,67	2.075,13	1.940,46	3.293	3,1
	Médio	50%	16.744	55,28	184,60	2.075,13	1.890,53	3.293	1,6
	Úmido	10%	21.166	56,79	230,19	2.075,13	1.844,94	3.293	1,2

Da mesma forma procedida para o reservatório de Jirau, foi feita uma simulação da incorporação do carbono rapidamente oxidável no reservatório de Santo Antônio, considerando o enchimento concluído em 7,5 dias, no mês de novembro. Admitiu-se, do mesmo modo, uma taxa de transferência de carbono de 0,080/dia sobre a massa de carbono remanescente.

A Figura 4.19 apresenta o resultado da simulação do enchimento do reservatório de Santo Antônio, informando a evolução cronológica da carga de carbono oxidável disponível e da carga transferida ao corpo hídrico.

Figura 4.19
Incorporação da Biomassa no Reservatório de Santo Antônio



Percebe-se que, com as taxas adotadas, o processo estará totalmente estabilizado no final de dezembro.

A Tabela 4.20 resume os principais resultados obtidos na simulação realizada, informando as cargas máximas verificadas no mês de novembro e as correspondentes vazões em trânsito (vazões com permanência de 90%). O Quadro apresenta ainda as cargas de DBO, Nitrogênio e Fósforo calculadas a partir da transferência de carbono, correspondente à carga máxima média de 5 dias, respeitando as relações DBO/C, N/C e P/C já definidas anteriormente.

Tabela 4.20
Cargas Transferidas ao Reservatório de Santo Antônio Pela Biomassa Afogada

	Enchimento em Novembro
Vazão com Permanência de 90 % (m ³ /s)	6.336
Vazão residual durante o enchimento (m ³ /s)	3.293
Nível d'água do reservatório (m)	70,00
Tempo de enchimento (dias)	7,5
Carga máxima de carbono oxidável (ton/dia)	4.408
Carga máxima média de cinco dias (ton/dia)	4.088
Carga máxima média de dez dias (ton/dia)	3.610
DBO associada à média de 5 dias (ton/dia)	11.038
Nitrogênio associado à média de 5 dias (ton/dia)	100,3
Fósforo associado à média de 5 dias (ton/dia)	12,15

Modelagem da Qualidade da Água dos Reservatório do Rio Madeira

Esta Tabela define o cenário crítico de qualidade da água associado com o enchimento do reservatório de Santo Antônio.

5 ESTABELECIMENTO DO MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA

5.1. DESCRIÇÃO DO MODELO UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES – QUAL2E

Para modelagem da qualidade da água na bacia do rio Madeira foi usado o modelo matemático QUAL2E, desenvolvido por Brown e Barnwell em 1985 (Referência 11) . A versão utilizada no presente trabalho possui interface para o ambiente Windows, tendo sido desenvolvida por Lahlou, Sayedul, Baldwin e Boyton para o U.S. Environmental Protection Agency, em 1995 (Referência 12).

O QUAL2E é um modelo bastante utilizado, capaz de simular um número grande de constituintes de qualidade da água, considerando que estão completamente misturados ao escoamento. O modelo assume que os principais mecanismos de transporte, advecção e dispersão, são significativos apenas ao longo da direção principal do escoamento (eixo longitudinal do rio ou canal). Em uma simulação, podem ser considerados vários pontos de lançamento (cargas industriais e domésticas), captações, entradas de tributários e de vazões incrementais, que podem ser positivas (contribuição do aquífero para o rio ou escoamento superficial que chega a calha do rio em um determinado trecho) ou negativas (contribuição do rio para o aquífero e retiradas de água).

O modelo pode ser operado como permanente ou dinâmico. Quando operado na forma permanente pode ser usado para estudo do impacto dos despejos (magnitude, qualidade e localização) na qualidade da água do rio. Na forma dinâmica permite o estudo dos efeitos das variações diurnas dos dados meteorológicos na qualidade da água (oxigênio dissolvido e temperatura) e das variações do oxigênio dissolvido devido ao crescimento e respiração das algas.

O modelo pode simular no máximo 15 constituintes de qualidade da água em qualquer combinação desejada pelo usuário. Estes constituintes são: oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), temperatura, algas, nitrogênio orgânico, amônia, nitrito, nitrato, fósforo orgânico, fósforo dissolvido, coliformes, constituinte não conservativo (arbitrário), três constituintes conservativos.

Também permite o cálculo das vazões necessárias para diluição quando um nível mínimo, pré-fixado, de oxigênio dissolvido não for alcançado. Para o caso específico da demanda bioquímica de oxigênio e do oxigênio dissolvido, analisa a biodegradação da matéria carbonácea, demanda bentônica e sedimentação da matéria orgânica.

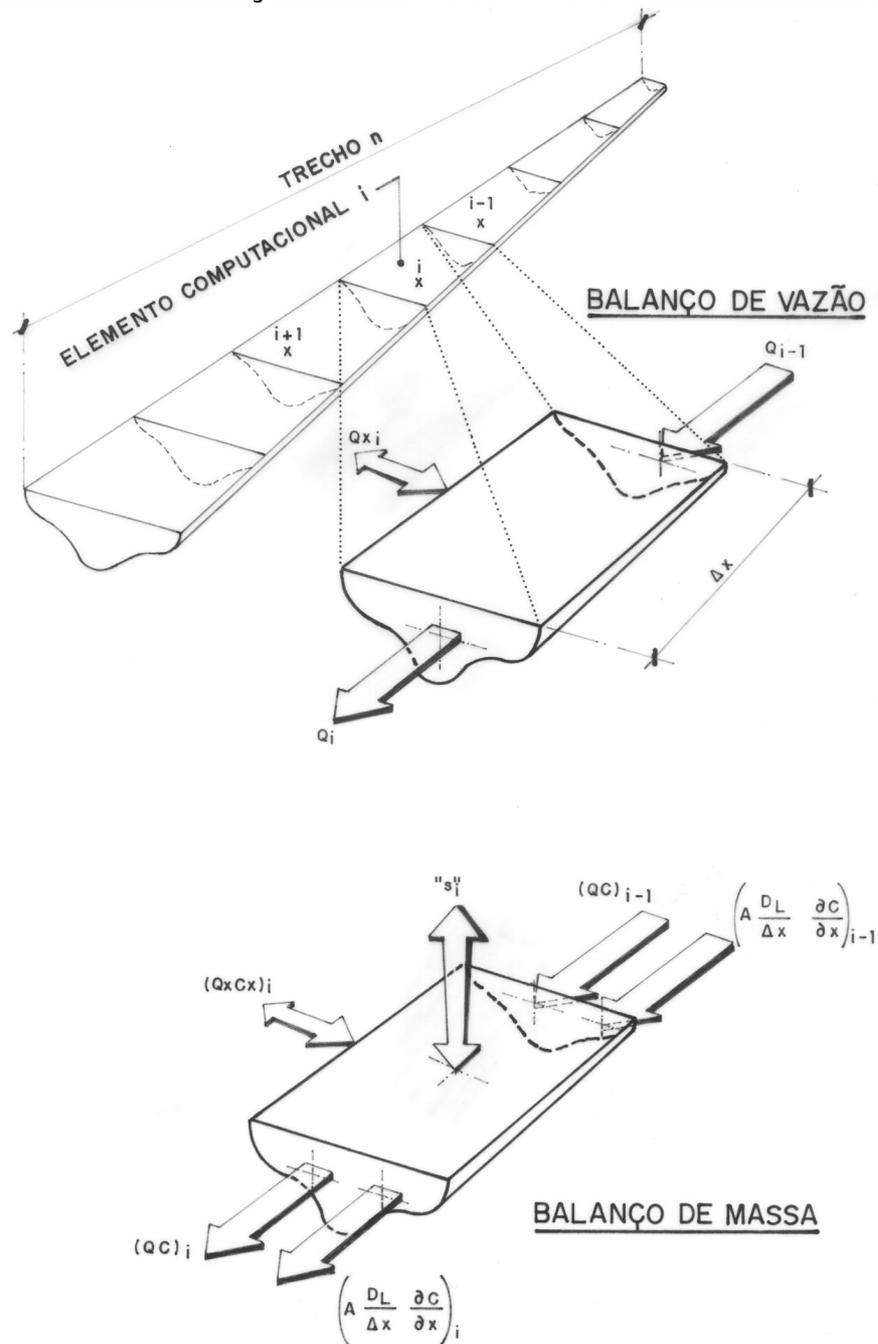
O QUAL2E, mesmo sendo bem geral, apresenta certas limitações computacionais, permitindo os seguintes valores máximos:

· Número de trechos	50
· Número de elementos computacionais	500
· Numero de elementos de cabeceira	10
· Número de junções	9
· Número de despejos e retiradas	50

5.1.1. Representação Conceitual do Modelo

A Figura 5.1 ilustra a discretização de um trecho de rio, dividido em sete subtrechos ou elementos computacionais de comprimentos longitudinais Δx .

Figura 5.1
Discretização de Um Trecho de Rio no QUAL2E



Para cada subtrecho (i), pode-se descrever o balanço hidrológico em termos das vazões de entrada a montante (Q_{i-1}), vazões de entrada ou saídas laterais (Q_x) e vazões de

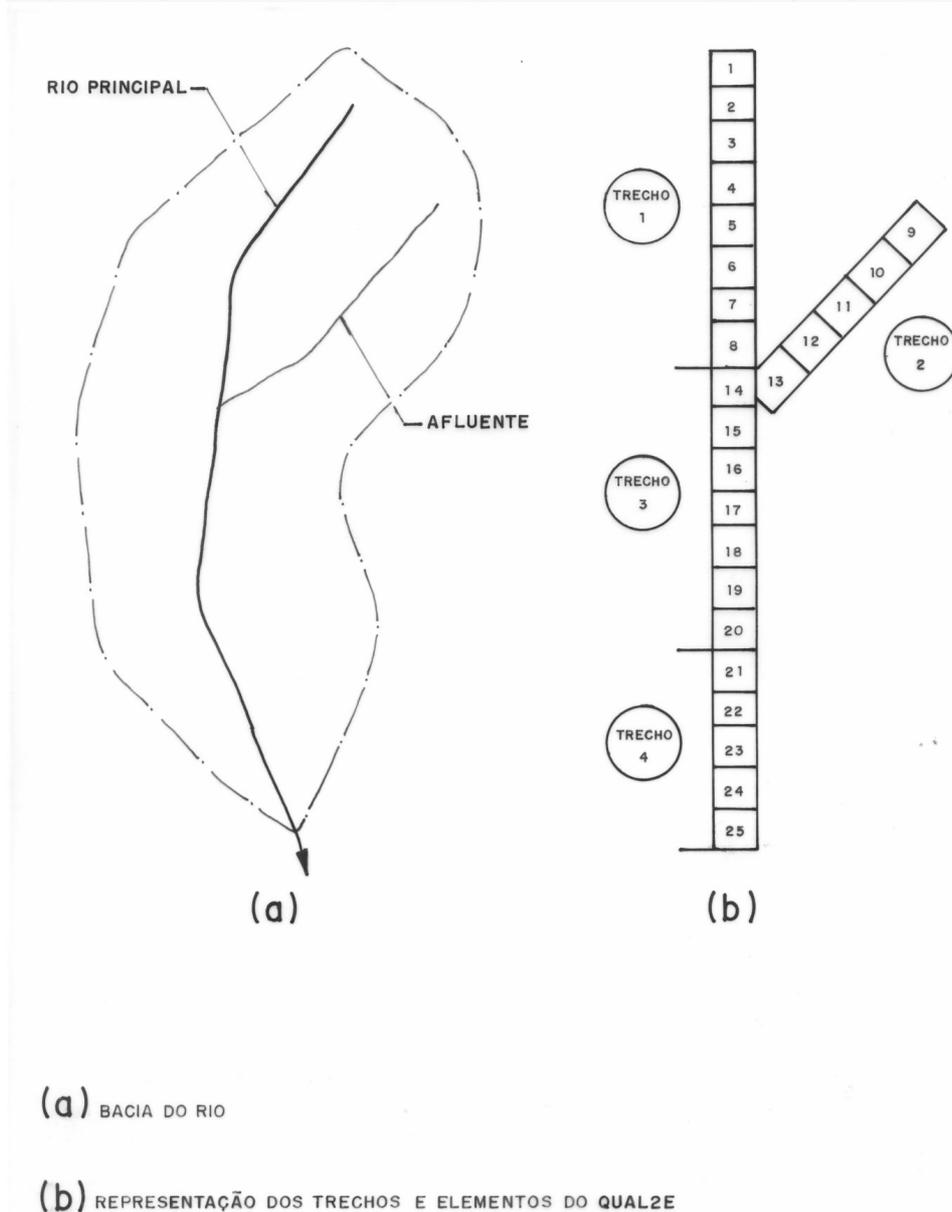
saída (Q_i). Da mesma forma, o balanço da massa para cada constituinte C pode ser descrito em termos do transporte advectivo e dispersivo, podendo sofrer ainda, ao longo dos subtrechos, acréscimos ou decréscimos devido a fontes ou sumidouros externos ou internos, estes no caso de transformações bioquímicas.

O rio ou trecho de rio a ser simulado é dividido em trechos com características hidráulicas homogêneas (declividade, rugosidade, seção transversal, etc.). Cada trecho é subdividido em elementos computacionais de comprimentos iguais. No total, podem ser utilizados sete tipos de elementos computacionais, descritos a seguir:

- **Cabeceira** - primeiro elemento do sistema principal e, eventualmente, de cada tributário;
- **Padrão** - é aquele que não se enquadra como nenhum dos seis elementos restantes;
- **Junção** - elemento que representa a entrada de um tributário a ser simulado;
- **Elemento à montante de uma junção;**
- **Último elemento do sistema;**
- **Despejos** - cargas domésticas e industriais, vazões e respectivas cargas de tributários que não estão sendo simulados;
- **Retiradas** - captações para abastecimento de cidades ou indústrias;

Os dados hidráulicos, os coeficientes de reação dos constituintes, as condições iniciais e as vazões incrementais são constantes para todos os elementos computacionais dentro de um trecho. A Figura 5.2, apresenta, como ilustração, a representação de um rio como uma rede composta de trechos e elementos computacionais.

Figura 5.2
Segmentação de Um Rio em Trechos e Elementos Computacionais



5.1.2. Representação Funcional do Modelo

A equação básica solucionada pelo modelo é a equação de transporte de massa (advecção-dispersão), que é integrada numericamente num intervalo de tempo, para cada constituinte de qualidade da água simulado. Esta equação inclui os efeitos de diluição, advecção, reações e interações dos constituintes, fontes e consumidores de oxigênio. Para qualquer constituinte simulado, C , a equação poderá ser escrita como:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial \left(A_x D_L \frac{\partial C}{\partial X} \right)}{\partial X} dx - \frac{\partial \left(A_x \bar{u} C \right)}{\partial X} dx + \left(A_x dx \right) \frac{dC}{dt} + s \quad 5.1$$

onde:

t = tempo(T);
x = distância(L);
C = concentração (ML⁻³);
Ax = área da seção transversal (L²);
DL= coeficiente de dispersão (L²T⁻¹);
 \bar{u} = velocidade média (LT⁻¹);
s = fontes ou consumidores externos (MT⁻¹);
M = massa (M).

Como M=V.C, temos:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial (VC)}{\partial t} = V \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial V}{\partial t} \quad 5.2$$

onde:

V= A_x.d_x = volume do subtrecho (m³).

Ao se assumir o regime permanente $\left(\frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \right)$; $\frac{V}{t} = 0$, a equação 5.2 torna-se:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = V \frac{\partial C}{\partial t} \quad 5.3$$

Combinando as equações 5.1 e 5.3, obtém-se:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial \left(A_x D_L \frac{\partial C}{\partial X} \right)}{A_x \partial X} - \frac{\partial \left(A_x \bar{u} C \right)}{A_x \partial X} + \frac{dC}{dt} + \frac{s}{V} \quad 5.4$$

onde os termos à direita representam, respectivamente, os mecanismos de dispersão, advecção, variação total de concentração e fontes ou sumidouros.

Sob condições de regime permanente, os gradientes locais de concentração serão nulos $\left(\frac{\partial C}{\partial t} = 0 \right)$ e as variações temporais de concentração de cada constituinte são definidas

pela derivada total $\frac{dC}{dt}$. Estas variações incluem reações físicas, químicas e biológicas (reaeração, respiração de algas, fotossíntese, decaimento de coliformes, etc).

As equações diferenciais do modelo são resolvidas numericamente por diferenças finitas, através de um esquema implícito regressivo. A base geral para este esquema consiste em se encontrar o valor da variável (concentração do constituinte), como função do espaço num certo tempo, uma vez conhecida a distribuição espacial num tempo anterior. O tempo zero corresponde à condição inicial. A solução numérica das equações pode ser encontrada nos estudos de Forattini (referência 15) e Chapra (referência 16).

5.1.3. Características Hidráulicas e Dispersão Longitudinal

O modelo assume que o regime hidráulico do rio ou canal é permanente, ou seja, $\partial Q/\partial t = 0$. Desta forma, o balanço hidrológico de um elemento computacional pode ser escrito como:

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)_i = (Q_x)_i \quad 5.5$$

onde $(Q_x)_i$ é a soma das entradas e/ou retiradas externas para este elemento.

Uma vez solucionada a equação acima para Q, as outras características hidráulicas são obtidas a partir das relações:

$$v = c \cdot Q^d \quad 5.6$$

$$A_x = \frac{Q}{v} \quad 5.7$$

$$h = a \cdot Q^b \quad 5.8$$

Onde:

a, b, c e d - constantes determinadas a partir das relações entre a velocidade e a vazão e a profundidade e a vazão;

v - velocidade média;

A_x - área da seção transversal;

h - profundidade média; e ,

Q - vazão média no trecho.

Alternativamente, se estão disponíveis dados da seção transversal em função da profundidade, v poderá ser obtido a partir da vazão Q e da equação de Manning, da seguinte forma:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A_x \cdot R_x^{2/3} \cdot S_e^{1/2} \quad 5.9$$

Onde:

R_x = raio hidráulico;

n = coeficiente de Manning;

S_e = declividade da linha de energia;

O valor de v é então determinado pela equação 5.6.

O coeficiente de dispersão longitudinal, D_L , é calculado no modelo através da seguinte equação empírica (Referência 17):

$$D_L = 3,11 \cdot K \cdot n \cdot v \cdot h^{5/6} \quad 5.10$$

Onde K é um parâmetro de dispersão e os demais símbolos já foram definidos.

5.1.4. Constituintes e Reações Considerados nas Simulações

Neste item são descritos alguns constituintes simulados pelo modelo, bem como as expressões associadas à sua cinética. Embora o modelo QUAL2E trate de maior número de constituintes e cinéticas, a descrição apresentada a seguir limita-se aos parâmetros efetivamente considerados no presente trabalho.

a) Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Oxigênio Dissolvido (OD)

O balanço de oxigênio em rios depende de sua capacidade de autodepuração. Esta capacidade é função dos processos de advecção-difusão e do déficit interno de oxigênio relativo aos valores de saturação.

Nesses sistemas, as principais fontes de produção de oxigênio estão relacionadas à reaeração atmosférica, fotossíntese e cargas afluentes (tributários). Já a depleção do oxigênio dissolvido está geralmente associada a oxidações bioquímicas da matéria orgânica carbonácea e nitrogenada (DBO-C e DBO-N), demandas bentônicas e processos de respiração.

As cinéticas para a demanda bioquímica carbonácea de oxigênio e para oxigênio dissolvido, da forma como tratadas no modelo QUAL2E, são apresentadas a seguir.

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 \cdot L - K_3 \cdot L$$

E

$$\frac{dO}{dt} = -K_2 \cdot (O_s - O) - K_1 \cdot L - \frac{K_4}{h}$$

Onde:

- L – demanda bioquímica carbonácea de oxigênio (mg/l);
- K_1 – taxa de decomposição de DBO (1/dia);
- K_3 – taxa de sedimentação de DBO (1/dia);
- O – concentração de oxigênio dissolvido (mg/l);
- K_2 – taxa de reaeração (1/dia);

O_s – concentração de saturação de oxigênio (mg/l);
 K_4 – demanda de oxigênio do sedimento (g/m²/dia)

A reaeração atmosférica está diretamente relacionada ao déficit de oxigênio dissolvido em suas águas, ou seja, à diferença entre as concentrações de saturação e as concentrações reais existentes. Daí a importância de determinações precisas destes valores. A solubilidade do oxigênio dissolvido em águas é diretamente proporcional à pressão atmosférica e inversamente proporcional à temperatura, sendo calculada no modelo a partir da formulação adotada pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 16^o ed., 1985.

Os mecanismos de reaeração em águas continentais têm sido alvo de muitos estudos, existindo grande profusão de modelos conceituais, empíricos e semi-empíricos. Existe consenso em afirmar que não existe uma formulação única capaz de enquadrar-se a todos os rios, havendo, portanto, a necessidade de avaliação e seleção daquela que melhor represente o processo para cada caso em particular.

O modelo QUAL2E possui a opção de ler diretamente valores medidos (ou estimados) do coeficiente de reaeração, ou calcular através de sete fórmulas empíricas, relacionadas com as características e geometria do canal.

b) Ciclo do nitrogênio

O ciclo do nitrogênio, ou nitrificação, é contemplado no modelo em três etapas:

- 1 - O nitrogênio orgânico, quando descarregado no corpo hídrico, sofre uma reação (hidrólise) resultando como produto final a amônia;
- 2 - A amônia, por sua vez, é oxidada sob condições aeróbicas, na presença de bactérias (nitrossomonas), dando origem ao nitrito.
- 3 - O nitrito formado é, em seguida, oxidado a nitrato, na presença de microorganismos (nitrobactérias).

Nessas etapas ocorre consumo de oxigênio, motivo pelo qual a nitrificação é uma fonte potencial de depleção de oxigênio em águas naturais. Estes processos são tratados, no QUAL2E, da seguinte forma:

• Nitrogênio Orgânico

$$\frac{dN_4}{dt} = \alpha_1 \rho A - \beta_3 N_4 - \sigma_4 N_4$$

Onde:

N_4 - concentração de nitrogênio orgânico (mg/l);
 β_3 - taxa de hidrólise de nitrogênio orgânico em amônia (1/dia);
 α_1 - fração de nitrogênio na biomassa das algas (mgN/mgA);

- ρ - taxa de respiração das algas (1/dia);
- A - concentração de biomassa de algas (mgA/l);
- σ_4 – taxa de sedimentação do nitrogênio orgânico (1/dia);

• **Amônia**

$$\frac{dN_1}{dt} = \beta_3 N_4 - \beta_1 N_1 + \sigma_3/d - F_1 \alpha_1 \mu A$$

Onde:

- N_1 - concentração de amônia (mg/l);
- N_3 - concentração de nitrato (mg/l);
- N_4 - concentração de nitrogênio orgânico (mg/l);
- β_1 - taxa de oxidação biológica da amônia (1/dia);
- β_3 - taxa de hidrólise de nitrogênio orgânico em amônia (1/dia);
- α_1 - fração de nitrogênio na biomassa das algas (mgN/mgA);
- σ_3 - taxa de fonte bentônica de amônia (1/dia);
- d - profundidade média do escoamento (m);
- F_1 – fração do nitrogênio das algas retirado da amônia;
- μ - taxa específica de aumento de algas (1/dia);
- A - concentração de biomassa de algas (mgA/l);

• **Nitrito**

$$\frac{dN_2}{dt} = \beta_1 N_1 - \beta_2 N_2$$

Onde:

- N_1 - concentração de amônia (mg/l);
- N_2 - concentração de nitrito (mg/l);
- β_1 - taxa de oxidação biológica da amônia (1/dia);
- β_2 - taxa de oxidação biológica do nitrito (1/dia);

• **Nitrato**

$$\frac{dN_3}{dt} = \beta_2 N_2 - (1 - F) \alpha_1 \mu A$$

Onde:

- F – fração de nitrogênio das algas retirado da amônia;

α_1 - fração de nitrogênio na biomassa das algas (mgN/mgA);
 μ - taxa específica de aumento de algas (1/dia);

c) **Ciclo do Fósforo**

No modelo, o ciclo do fósforo funciona de forma semelhante ao ciclo do nitrogênio. Assim, a forma orgânica de fósforo é gerada através da morte das algas e é convertida para a forma dissolvida, inorgânica. As equações que descrevem as transformações do ciclo do fósforo são apresentadas a seguir:

• **Fósforo Orgânico**

$$\frac{dP_1}{dt} = \alpha_2 \rho A - \beta_4 P_1 - \sigma_5 P_1$$

Onde:

P_1 - concentração de fósforo orgânico (mgP/l);
 α_2 - conteúdo de fósforo nas algas (mgP/mgA);
 ρ - taxa de respiração das algas (1/dia);
 A - concentração de biomassa de algas (mgA/l);
 β_4 - taxa de decaimento do fósforo orgânico (1/dia);
 σ_5 - taxa de sedimentação do fósforo orgânico (1/dia).

• **Fósforo Dissolvido**

$$\frac{dP_2}{dt} = \beta_4 P_1 + \sigma_2/d - \alpha_2 \mu A$$

Onde:

P_2 - concentração de fósforo inorgânico ou dissolvido (mg/l);
 σ_2 - taxa de oxigênio dissolvido produzido pela camada bentônica (mgP/m²/dia);
 d - profundidade média do escoamento (m);
 μ - taxa de crescimento das algas (1/dia);
 A - concentração de biomassa de algas (mgA/l).

5.1.5. Correção da Temperatura

Todos os coeficientes ou taxas de reação das variáveis de qualidade da água (com exceção da concentração de saturação de oxigênio), dependentes da temperatura, podem ser corrigidos para qualquer temperatura a partir da relação abaixo:

$$X_T = X_T^{20} \cdot \theta^{(T-20)}$$

Onde:

X_T = valor da variável à temperatura local;

X_T^{20} = valor da variável à 20°C;

T = temperatura (°C); e,

θ = constante empírica para cada variável dependente da temperatura.

O modelo utiliza:

$\theta = 1,0159$ para o cálculo de K_2

$\theta = 1,047$ para calcular todos os demais coeficientes

5.2. CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA AS CONDIÇÕES ATUAIS

5.2.1. Segmentação do Estirão Fluvial

O estirão fluvial do rio Madeira a ser simulado, desde sua confluência com o rio Abunã, a montante, até sua confluência com o rio Jamarí, a jusante, totalizando 329 km, foi segmentado em 29 trechos, escolhidos por apresentarem características hidráulicas aproximadamente homogêneas. Nesta segmentação foi considerada ainda a localização dos principais afluentes que ocorrem no estirão.

A caracterização hidráulica de cada trecho foi feita com base nas seções transversais disponíveis, obtidas dos estudos de remanso dos reservatórios e dos estudos sedimentológicos realizados. As seções do trecho situado a jusante de Porto Velho foram obtidas a partir do Atlas da Hidrovia Madeira-Amazonas de Itacoatiara a Porto Velho, produzido pela Diretoria de Hidrografia e Navegação do Ministério da Marinha em 1999.

A seção de Porto Velho foi obtida a partir de uma planta de estruturas do projeto da Ponte Sobre o Rio Madeira – Porto Velho.

A Tabela 5.3, a seguir, apresenta uma relação das seções topobatimétricas disponíveis para caracterização hidráulica do rio Madeira. Estas seções estão identificadas pela sua distância, em km, até a confluência do rio Madeira com o rio Jamarí, ou seja, sua distância ao limite de jusante da modelagem.

A Tabela indica também, quando existente, a correspondência entre os novos números das seções e a numeração empregada nos estudos de remanso (modelo HEC-RAS) e a numeração indicada nos desenhos dos Estudos de Viabilidade. Os trechos escolhidos estão enfatizados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3
Relação das Seções Transversais Disponíveis Para Modelagem

Seção	Trecho	Seção de referência		Observações
		HEC - RAS	Desenho	
329	1	42.3	S-42,3	Rio Abunã
327	1	42	S-42	
320	1	41.5	S-41,5	
315	1	41	S-41	
309	2	40.5	S-40,5	Cachoeira do Pederneira
306	2	40	S-40	
301	2	39	S-39	
292	3	38.5	S-38,5	
286	3	38	S-38	Cachoeira do Paredão
283	4	37	S-37	
279	4	36	S-36	
272	4	35	S-35	
267	5	34.5	S-34,5	
258	6	34	S-34	
256	7	33	S-33	Cachoeira Três Irmãos
255	7	32	S-32	Ilha Três Irmãos
253	8	31	S-31	
243	8	30	S-30	
228	9	29	S-29	
211	10	Cópia da seção 228	Cópia da seção 228	Seção auxiliar
210	11	28	S-28	
207	12	18	S-23	Salto do Jirau
200	12	17	S-22	Cachoeira do Inferno
195	13	16	S-21	
190	13	15	S-20	
184	13	14	S-19	Ilha da Pedra
172	14	13	S-18	Ilha Santana
166	14	12	S-17	
158	15	11	S-16	Ilha Niterói
151	16	10	S-15	Ilha São Patrício
145	17	9	S-14	Ilha Liverpool
139	17	8	S-13	
128	18	7	S-12	Cachoeira Morrinho
120	19	6	S-11	
110	19	5	S-10	

Tabela 5.3 (Continuação)
Relação das Seções Transversais Disponíveis Para Modelagem

Seção	Trecho	Seção de referência		Observações
		HEC - RAS	Desenho	
105	20	4	S-9	
98	21	3.5	S-8	Cachoeira de Teotônio
96	22	3	S-7	
88	23	2	S-6	
81	24	1	S-5	Cachoeira Santo Antônio
75	25	Ponte Projetada	Ponte Projetada	Porto Velho
63	26	Cópia da seção 75	Cópia da seção 75	Cópia da seção 75
42	27	Atlas	Atlas	
26	28	Atlas	Atlas	Ilha Jamarizinho
0	29	Atlas	Atlas	Foz do rio Jamari

Para cada trecho foi escolhida uma seção representativa, conforme apresentado na Tabela 5.4, a seguir.

Tabela 5.4
Limites dos Trechos do Modelo QUAL2E e Seções Representativas

Trecho	Seção Representativa	Pk inicial (km)	Pk final (km)
1	Mad1 - S315a	329	312
2	Mad2 - S315b	312	296
3	Mad3 - S292	296	284
4	Mad4 - S283	284	269
5	Mad5 - S267	269	262
6	Mad6 - S258	262	257
7	Mad7 - S256	257	253
8	Mad8 - S243a	253	238
9	Mad9 - S243b	238	224
10	Mad10 - S243c	224	210
11	Mad11 - Jirau	210	208
12	Mad12 - S200	208	197
13	Mad13 - S195	197	178
14	Mad14 - S166a	178	166
15	Mad15 - S166b	166	154
16	Mad16 - S151	154	145
17	Mad17 - S128a	145	134
18	Mad18 - S128b	134	124

Tabela 5.4 (Continuação)
Limites dos Trechos do Modelo QUAL2E e Seções Representativas

Trecho	Seção Representativa	Pk inicial (km)	Pk final (km)
19	Mad19 - S110	124	107
20	Mad20 - S105	107	98
21	Mad21 - S98teot	98	97
22	Mad22 - S96	97	92
23	Mad23 - S88	92	84
24	Mad24 - S81Sant	84	78
25	Mad25 - S63a	78	65
26	Mad26 - S63b	65	52
27	Mad27 - S26a	52	34
28	Mad28 - S26b	34	17
29	Mad29 - S26c	17	0

5.2.2. Características Hidráulicas dos Trechos

As características hidráulicas dos rios ou trechos de rios simulados são representadas através das equações que relacionam velocidade média e vazão e profundidade média e vazão, conforme descrito anteriormente. Os coeficientes a, b, c e d das equações 5.6 e 5.8, foram obtidos a partir dos dados resultantes das simulações com o modelo HEC-RAS, e são apresentados a seguir, na Tabela 5.5.

Tabela 5.5
Coeficientes Empregados na Caracterização Hidráulica dos Segmentos

Trecho	a	b	c	d
1	1.6796	0.2535	0.0014	0.6886
2	1.6796	0.2535	0.0014	0.6886
3	1.2984	0.2687	0.0018	0.6312
4	0.7504	0.3202	0.0030	0.6293
5	0.1334	0.4638	0.0143	0.5036
6	0.8996	0.3099	0.0020	0.6560
7	0.0263	0.5908	0.0989	0.2574
8	1.5275	0.2581	0.0020	0.6431
9	1.5275	0.2581	0.0020	0.6431
10	1.5275	0.2581	0.0020	0.6431
11	0.0363	0.5387	0.6686	0.2248
12	1.8906	0.2403	0.0012	0.6941

Tabela 5.5 (Continuação)
Coefficientes Empregados na Caracterização Hidráulica dos Segmentos

Trecho	a	b	c	d
13	1.3526	0.2697	0.0009	0.6900
14	4.1580	0.1053	0.0041	0.5544
15	4.1580	0.1053	0.0041	0.5544
16	0.0434	0.5223	0.0154	0.3907
17	0.1009	0.4792	0.0074	0.4968
18	0.1009	0.4792	0.0074	0.4968
19	0.3828	0.3435	0.0036	0.6276
20	0.1204	0.4333	0.0057	0.5468
21	0.0002	0.9917	2.0982	0.0760
22	0.0140	0.6249	0.5837	0.0499
23	0.1553	0.4538	0.0127	0.4830
24	0.6379	0.3235	0.0040	0.5981
25	2.2586	0.2135	0.0014	0.7035
26	2.2586	0.2135	0.0014	0.7035
27	2.4874	0.2241	0.0003	0.8090
28	2.4874	0.2241	0.0003	0.8090
29	2.4874	0.2241	0.0003	0.8090

No presente estudo foram considerados todos os principais afluentes do rio Madeira, representados no modelo como uma entrada pontual de despejo, com a concentração de DBO, oxigênio dissolvido e a vazão correspondente.

5.2.3. Cenários Escolhidos Para Calibragem e Condições de Contorno Associadas

Com base nos resultados das cinco campanhas de coleta de amostras para análise de qualidade da água realizadas, foram definidos cenários para calibração do modelo: Estiagem, Enchente, Cheia e Vazante. Na calibração foi dada maior ênfase ao primeiro cenário, Estiagem, por ser o mais representativo das condições críticas (baixas vazões) a serem consideradas nas simulações da qualidade da água dos futuros reservatórios.

Para cada cenário foram considerados como condição de contorno os valores de vazão afluente no início do trecho de montante do rio Madeira e nos tributários, bem como os parâmetros de qualidade da água associados.

A Tabela 5.6, a seguir, apresenta, de forma resumida, as vazões afluentes e respectivas concentrações, para cada cenário estudado. O cenário de cheia considerado foi o correspondente a março, com vazão de 33.000 m³/s.

Tabela 5.6
Condições de Contorno Adotadas na Calibração

MÊS	CENÁRIO	Vazão m ³ /s	Temperat. °C	OD mg/l	DBO mg/l	Norg mg/l	Amônia mg/l	Nitrato mg/l	Ortofosfato mg/l	Fósforo Orgânico
										mg/l
NOV	Enchente	10000	29,0	6,1	0,11	3,7	0,09	0,83	0,0098	0,0047
JAN	Cheia	24000	28,3	4,5	1,05	4,2	0,14	0,51	0,0013	0,0013
MAR	Cheia	33300	28,7	4,8	0,91	4,9	0,16	0,40	0,0052	0,0033
MAI	Vazante	22500	24,4	8,6	1,01	13,7	0,09	0,40	0,0103	0,0053
JUL	Estiagem	10500	25,8	7,1	0,78	6,8	0,10	0,17	0,0163	0,0128

5.2.4. Calibração dos Parâmetros

Os parâmetros de qualidade da água resultantes da calibração do modelo são apresentados na Tabela 5.7, a seguir. Trata-se do conjunto que apresentou melhor resultado considerando o critério de priorizar o ajuste para o período de estiagem, sem perder representatividade nos demais períodos.

Tabela 5.7
Parâmetros Obtidos na Calibração

Trecho	K ₁	K ₂	β ₃	σ ₄	β ₁	σ ₃	β ₂	β ₄	σ ₅	σ ₂
1	0,1	0,3	0,03	0,05	0,8	0,1	1	0,15	0,35	0,01
2	0,1	0,3	0,03	0,05	0,8	0,1	1	0,15	0,35	0,01
3	0,1	0,3	0,03	0,05	0,8	0,1	1	0,15	0,35	0,01
4	0,1	0,3	0,03	0,05	0,8	0,1	1	0,15	0,35	0,01
5	0,1	0,3	0,03	0,05	0,8	0,1	1	0,15	0,35	0,01
6	0,1	0,5	0,09	0,2	2	0,1	0,2	0,15	0,35	0,01
7	0,1	0,5	0,09	0,2	2	0,1	0,2	0,15	0,35	0,01
8	0,1	0,4	0,09	0,2	2	0,1	0,2	0,15	0,35	0,01
9	0,1	0,5	0,09	0,2	2	0,1	0,2	0,15	0,35	0,01
10	0,1	0,5	0,09	0,2	2	0,1	0,2	0,15	0,35	0,01
11	0,1	4,5	0,03	0,01	1	0,1	0,2	0,05	0,35	0,01
12	0,1	0,9	0,03	0,01	1	0,1	0,2	0,05	0,35	0,01
13	0,1	0,9	0,03	0,01	1	0,1	0,2	0,05	0,35	0,01
14	0,1	0,9	0,03	0,01	1	0,1	0,2	0,05	0,35	0,01
15	0,1	1,4	0,09	0,2	2	0,1	0,2	0,04	0,35	0,01
16	0,1	1,8	0,09	0,2	2	0,1	0,2	0,04	0,35	0,01

Tabela 5.7 (Continuação)
Parâmetros Obtidos na Calibração

Trecho	K_1	K_2	β_3	σ_4	β_1	σ_3	β_2	β_4	σ_5	σ_2
17	0,1	1,8	0,09	0,2	2	0,1	0,2	0,04	0,35	0,01
18	0,1	2	0,09	0,2	2	0,1	0,2	0,04	0,35	0,01
19	0,1	2,1	0,09	0,2	2	0,1	0,2	0,04	0,35	0,01
20	0,1	2,1	0,09	0,2	2	0,1	0,2	0,04	0,35	0,01
21	0,1	6	0,09	0,2	2	0,1	0,2	0,04	0,35	0,01
22	0,1	4	0,09	0,2	1,5	0,1	0,2	0,04	0,35	0,01
23	0,1	1,6	0,09	0,2	1,5	0,1	0,2	0,04	0,35	0,01
24	0,1	1,6	0,09	0,2	1,5	0,1	0,2	0,04	0,35	0,01
25	0,1	0,6	0,09	0,2	1,5	0,1	0,2	0,04	0,35	0,01
26	0,1	0,6	0,09	0,2	1,5	0,1	0,2	0,04	0,35	0,01
27	0,1	0,3	0,03	0,01	1	0,1	0,2	0,04	0,35	0,01
28	0,1	0,3	0,03	0,01	1	0,1	0,2	0,04	0,35	0,01
29	0,1	0,3	0,03	0,01	1	0,1	0,2	0,04	0,35	0,01

As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam os resultados obtidos na calibração do modelo, confrontando, para os cenários de estiagem e de cheia, os perfis de concentração dos diversos constituintes simulados com os dados medidos de qualidade da água nos diversos pontos monitorados ao longo do rio Madeira.

Figura 5.8
Calibração do Modelo QUAL2E – Período de Estiagem

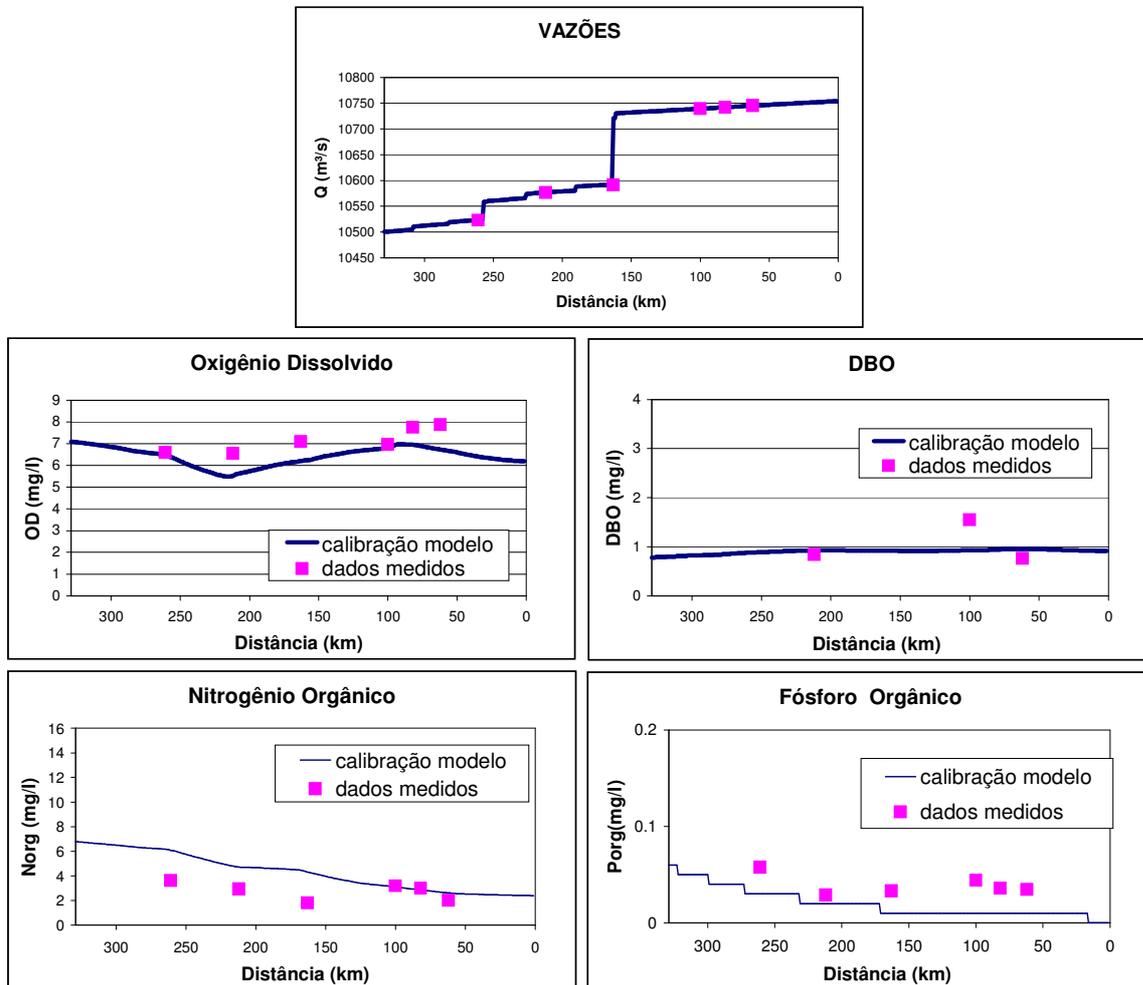
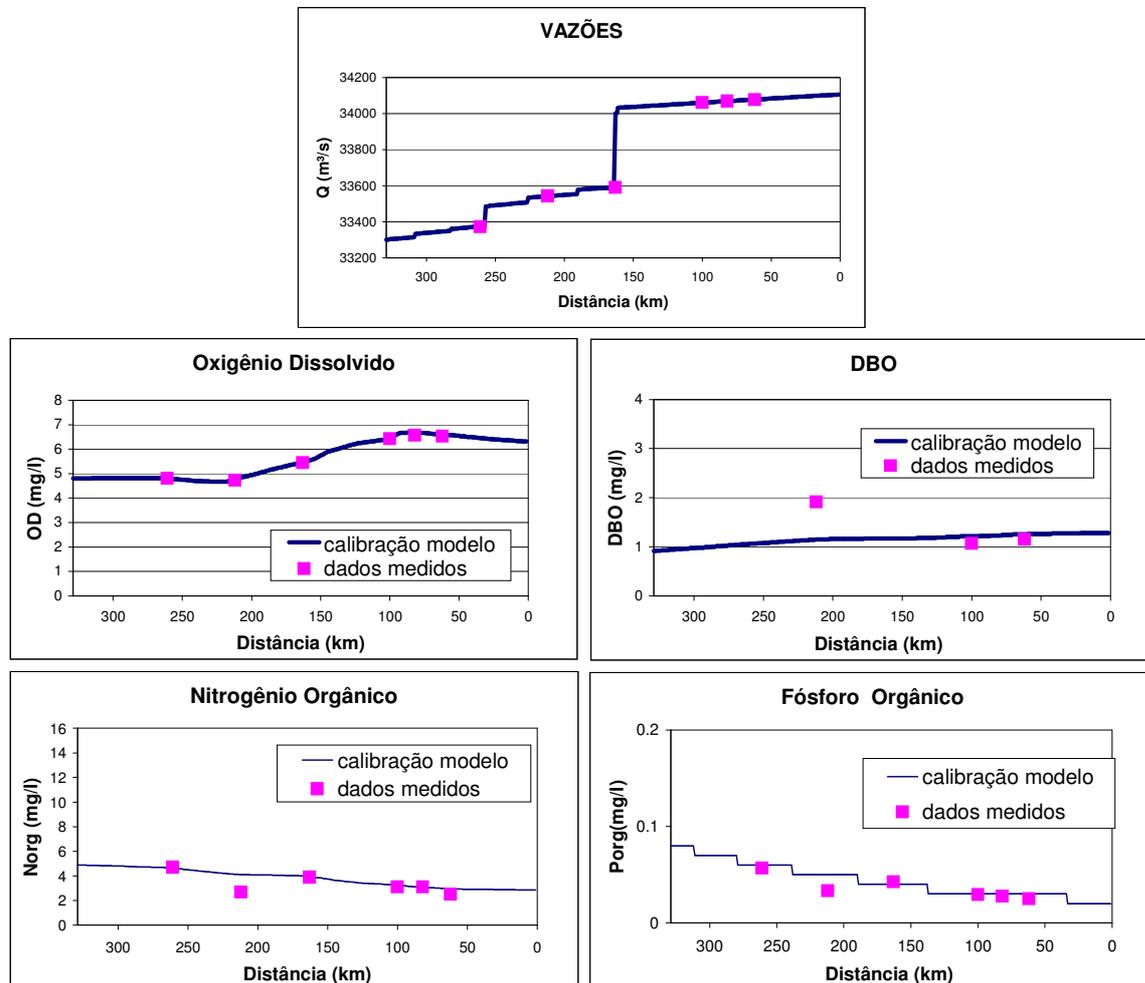


Figura 5.9
Calibração do Modelo QUAL2E – Período de Cheia



5.3. MODIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA CONSIDERAR O EFEITO DOS RESERVATÓRIOS

A implantação dos reservatórios irá afetar, principalmente, a capacidade de autodepuração do rio Madeira no trecho inundado, pois, com a redução das velocidades de escoamento a superfície líquida se tornará mais tranquila, reduzindo-se as trocas de oxigênio com a atmosfera.

Para levar em consideração este fato na modelagem, os coeficientes de reaeração estabelecidos na fase de calibração deveriam ser alterados (reduzidos). Esta tarefa seria automática, caso se houvesse optado, na fase de calibração, por empregar qualquer uma das fórmulas oferecidas pelo modelo para calcular os coeficientes. Entretanto, como não se obteve sucesso com nenhuma das fórmulas, os coeficientes foram ajustados individualmente para cada trecho.

Para a situação futura, com os reservatórios, como não se dispõe de uma referência, o cálculo dos novos coeficientes deve ser feito de forma criteriosa, para que os valores adotados não resultem arbitrários. No presente estudo, adotou-se o seguinte procedimento:

- Identificou-se, dentre os métodos disponíveis no QUAL2E, aquele que fornecia coeficientes de reaeração mais próximos dos calibrados;
- Com este método, calcularam-se os coeficientes de reaeração em cada trecho, nas condições atuais e futuras, com os reservatórios;
- Finalmente, admitiu-se como premissa que os coeficientes calibrados seriam modificados, pela presença dos reservatórios, na mesma proporção em que os coeficientes teóricos o foram.

Com esse procedimento foi possível alterar, de forma racional, os coeficientes de reaeração do rio Madeira, em cada trecho, para levar em consideração a presença dos reservatórios.

O método que apresentou coeficientes teóricos mais próximos daqueles definidos na calibração foi o de Thackston & Krenkel (referência 18). Os coeficientes de reaeração modificados são apresentados na Tabela 5.10, a seguir.

Tabela 5.10
Modificação dos Coeficientes de Reaeração Para Considerar os Reservatórios

Trecho	Coeficiente de Reaeração Atual	Coeficiente de Reaeração Modificado
1	0,37	0,18
2	0,37	0,21
3	0,37	0,19
4	0,37	0,10
5	0,37	0,04
6	0,61	0,17
7	0,61	0,09
8	0,49	0,19
9	0,61	0,27
10	0,61	0,61
11	5,51	0,14
12	1,10	1,00
13	1,10	1,03
14	1,10	0,02
15	1,71	0,34

Tabela 5.10 (Continuação)
Modificação dos Coeficientes de Reaeração Para Considerar os Reservatórios

Trecho	Coeficiente de Reaeração Atual	Coeficiente de Reaeração Modificado
16	2,20	1,73
17	2,20	1,58
18	2,45	0,78
19	2,57	0,68
20	2,57	0,39
21	4,96	0,05
22	4,89	0,18
23	1,96	0,22
24	1,96	1,78
25	0,73	0,73
26	0,73	0,73
27	0,37	0,37
28	0,37	0,37
29	0,37	0,37

Outra importante modificação introduzida pela implantação dos empreendimentos é a reaeração forçada associada aos vertimentos e também às turbinagens, devido à grande turbulência provocada, particularmente no primeiro caso. Para levar este fato em consideração, foi empregado um recurso adicional fornecido pelo modelo QUAL2E – reaeração em barragens. Conceitualmente, admite-se que o déficit de oxigênio a jusante da barragem (D_b) será modificado, devido à turbulência provocada pela queda, em função ao déficit de oxigênio das águas do reservatório (D_a), da temperatura da água (T) e da altura de queda (H), de acordo com a seguinte expressão:

$$D_a - D_b = \left[1 - \frac{1}{1 + 0,116 \cdot a \cdot b \cdot H \cdot (1 - 0,034 \cdot H) \cdot (1 + 0,46 \cdot T)} \right] \cdot D_a$$

Nesta expressão, a e b são parâmetros que dependem do grau de contaminação da água (a) e da estrutura hidráulica de descarga (b). Para as águas do rio Madeira, pode-se adotar $a=1,0$. Para as vazões turbinadas, pode-se adotar $b=0,05$, enquanto que para vazões vertidas, controladas por comportas, adota-se $b=0,40$.

6. SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NOS FUTUROS RESERVATÓRIOS

6.1. DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS

Conforme já exposto, o principal impacto decorrente do estabelecimento dos reservatórios do rio Madeira sobre a qualidade da água ocorrerá na fase de enchimento, em decorrência do afogamento da biomassa correspondente às áreas inundadas. Naturalmente, esta condição será crítica se o enchimento dos reservatórios ocorrer no período de estiagem, quando ocorrem as vazões mínimas.

A Tabela 6.1 apresenta as estatísticas de máxima, média, mínima e Q90% das vazões médias mensais do rio Madeira em Porto Velho. As vazões mínimas ocorrem no período de agosto a outubro, apresentando valores médios em torno de 7.000 m³/s, mas podendo chegar à casa dos 4.000 m³/s ou menos.

Tabela 6.1
Características das Vazões Médias Mensais do Rio Madeira em Porto Velho

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO
MÍNIMA	13.547	17.779	20.861	18.267	13.684	7.075	4.862	3.732	3.651	3.683	4.906	8.809	3.651
MÉDIA	24.268	29.582	34.207	30.706	23.107	16.155	10.750	6.938	5.691	6.944	10.553	16.896	17.983
MÁXIMA	44.794	40.802	47.492	47.069	39.476	27.384	21.144	13.126	12.608	15.455	20.089	34.155	47.492
Perm 90%	17.551	22.398	25.575	23.070	16.042	11.381	7.616	5.080	4.042	4.621	6.278	10.342	5.647

Conforme descrito no item 4, quando foram calculadas as cargas decorrentes do afogamento da vegetação para os dois reservatórios, a operação de enchimento de ambos está prevista para o mês de novembro. As exigências construtivas relacionadas a esta data permitem afirmar que ao será possível antecipar o início do enchimento – na verdade, os estudos de engenharia chegam a considerar a hipótese de haver um atraso de um mês nessa operação.

Assim, para os propósitos do presente trabalho, admitiu-se como condição básica início do enchimento dos reservatórios no mês de novembro, sabendo-se que um atraso nessa data conduziria a condições ambientais mais favoráveis, sob o ponto de vista da qualidade da água.

Como é interesse do estudo diagnosticar também os efeitos sinérgicos entre os dois reservatórios e também o desempenho do sistema em condições operativas, após a estabilização da biomassa, foram simulados, no total, cinco cenários prospectivos, a seguir descritos.

- Cenário 1 – Enchimento do reservatório de Jirau, implantado em primeira adição, recebendo as cargas decorrentes da biomassa afogada;
- Cenário 2 – Enchimento do reservatório de Santo Antônio, implantado em primeira adição, recebendo as cargas decorrentes da biomassa afogada;

- Cenário 3 – Enchimento do reservatório de Jirau, implantado em segunda adição (Santo Antônio já estabilizado), recebendo as cargas decorrentes da biomassa afogada;
- Cenário 4 – Enchimento do reservatório de Santo Antônio implantado em segunda adição (Jirau já estabilizado), recebendo as cargas decorrentes da biomassa afogada;
- Cenário 5 – Operação com ambos os reservatórios implantados e já estabilizados (condição operativa).

6.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO QUAL2E

Para os cinco cenários descritos no item anterior, foi simulada a evolução da qualidade da água do rio Madeira ao longo de todo o estirão de interesse, tendo sido dada ênfase no balanço entre oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de oxigênio (auto depuração) e nas concentrações de fósforo e nitrogênio (nutrientes).

O estudo do enchimento do reservatório do AHE Jirau exige a realização de três simulações, já que se processará em três etapas, conforme descrito anteriormente, não sendo possível estabelecer a priori qual delas será a crítica. Assim, os dois primeiros cenários dearam origem a 6 simulações de qualidade da água. Os cenários restantes correspondem cada um a uma simulação, de forma que no total foram realizadas 9 simulações de qualidade da água no rio Madeira.

Os resultados obtidos são apresentados em forma de gráficos, sendo os valores numéricos de maior importância discutidos individualmente.

6.2.1. Cenário 1 – Enchimento do Reservatório de Jirau em Primeira Adição

As Figuras 6.2 a 6.4 resumem os resultados obtidos nas simulações do cenário 1, considerando-se as três fases do enchimento do reservatório de Jirau. Observa-se uma depleção significativa nos níveis de oxigênio dissolvido dentro do reservatório na primeira fase da operação de enchimento, com as concentrações chegando a valores inferiores a 3 mg/l. Nas duas fases subseqüentes, como as vazões em trânsito já são maiores, as concentrações mínimas de OD ficam um pouco maiores, apesar das cargas lançadas serem também mais elevadas.

Conforme será visto mais adiante, na análise do Cenário 5 (operativo), o trecho do rio Madeira afogado pelo reservatório de Jirau apresenta grande número de corredeiras que, no mês de novembro, quando as vazões são mais baixas, propiciam condições excelentes de reaeração, ajudando a manter elevados os níveis de oxigênio dissolvido. Com a implantação do reservatório, e o conseqüente afogamento das corredeiras, este efeito deixa de existir. No caso do Cenário 1, aqui analisado, existe ainda a elevada carga de DBO associada com o afogamento da biomassa, que concorre para reduzir ainda mais as concentrações de oxigênio dissolvido no reservatório.

Nas três fases do Cenário 1, observa-se que há uma grande recuperação dos níveis de OD a jusante da barragem de Jirau, efeito provocado pela turbulência das vazões vertidas. Durante o enchimento, a maior parte da vazão descarregada para jusante passa pelo vertedouro, pois existem ainda poucas unidades geradoras instaladas e, via de regra, as unidades que já podem operar encontram-se ainda em fase de comissionamento.

Figura 6.2
Cenário 1 – Fase 1
Enchimento do Reservatório de Jirau (1ª Adição) Até a Cota 85,00 m – Novembro

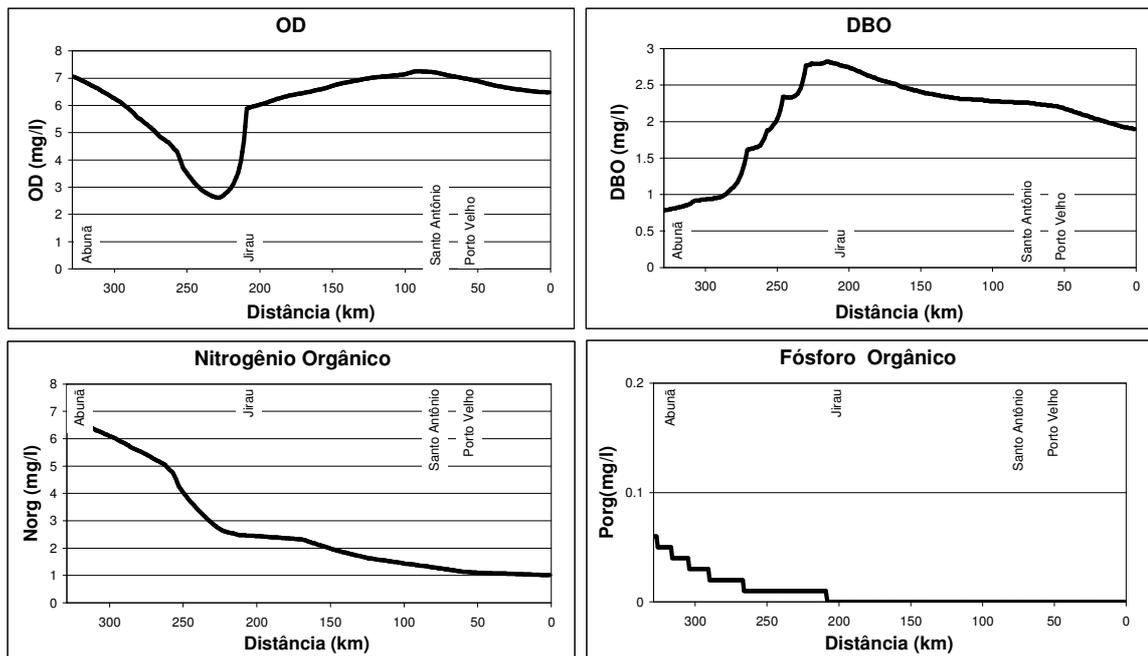


Figura 6.3
Cenário 1 – Fase 2
Enchimento do Reservatório de Jirau (1ª Adição) Até a Cota 87,50 m – Dezembro

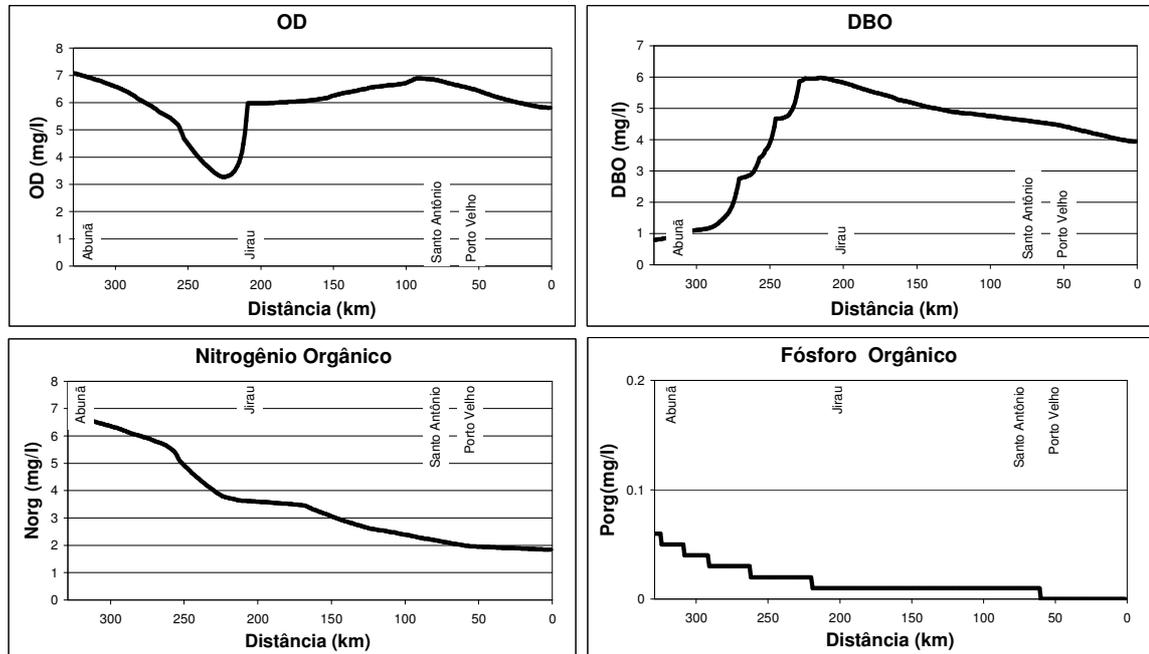
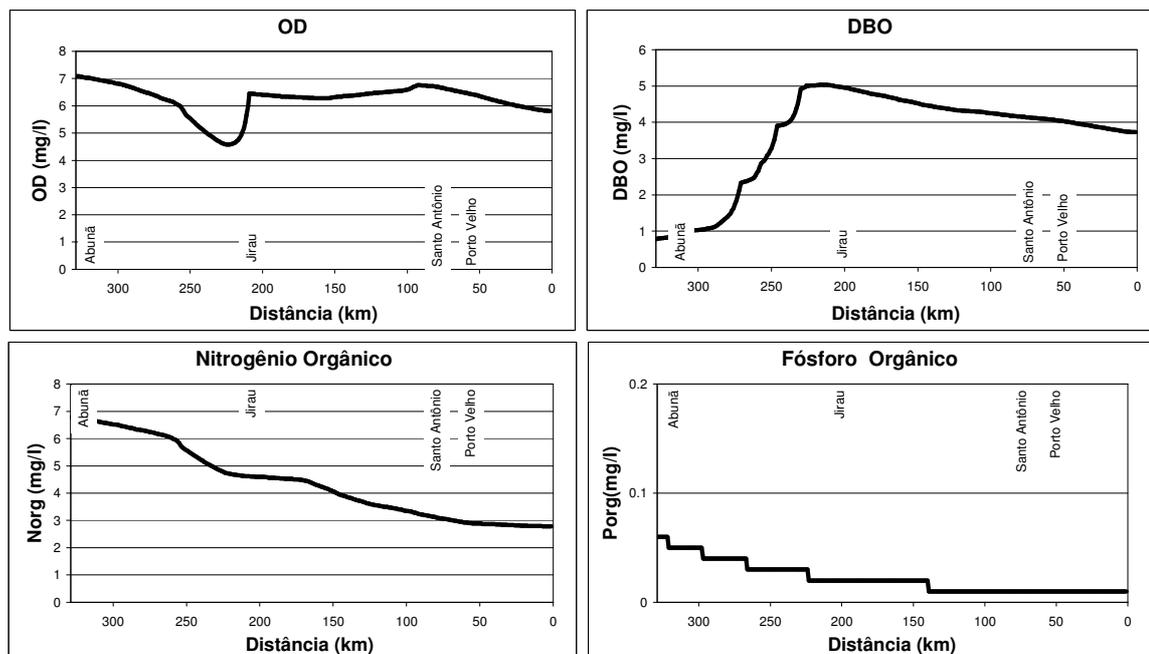


Figura 6.4
Cenário 1 – Fase 3
Enchimento do Reservatório de Jirau (1ª Adição) Até a Cota 90,00 m – Janeiro



6.2.2. Cenário 2 – Enchimento do Reservatório de Jirau em Segunda Adição

As Figuras 6.5 a 6.7 resumem os resultados obtidos nas simulações do cenário 2, considerando-se as três fases do enchimento do reservatório de Jirau, agora com o reservatório de Santo Antônio implantado e já estabilizado. Este Cenário acrescenta ao anterior uma condição desfavorável que é a redução da capacidade de reaeração do trecho correspondente ao reservatório de Santo Antônio. Como as cargas produzidas pela biomassa afogada são as mesmas que as do Cenário 1, as concentrações de OD a jusante de Jirau passam a ser mais baixas que no caso anterior.

Observa-se que, no mês de janeiro, apesar da vazão em trânsito ser maior que nos dois meses anteriores, os níveis de OD dentro do reservatório de Santo Antônio apresentam redução significativa, caindo abaixo dos 5,0 mg/l. Esta condição repercute ainda a jusante, com as concentrações de OD ficando próximas de 5 mg/l no final do trecho, a jusante de Porto Velho.

Figura 6.5
Cenário 2 – Fase 1
Enchimento do Reservatório de Jirau (2ª Adição) Até a Cota 85,00 m – Novembro

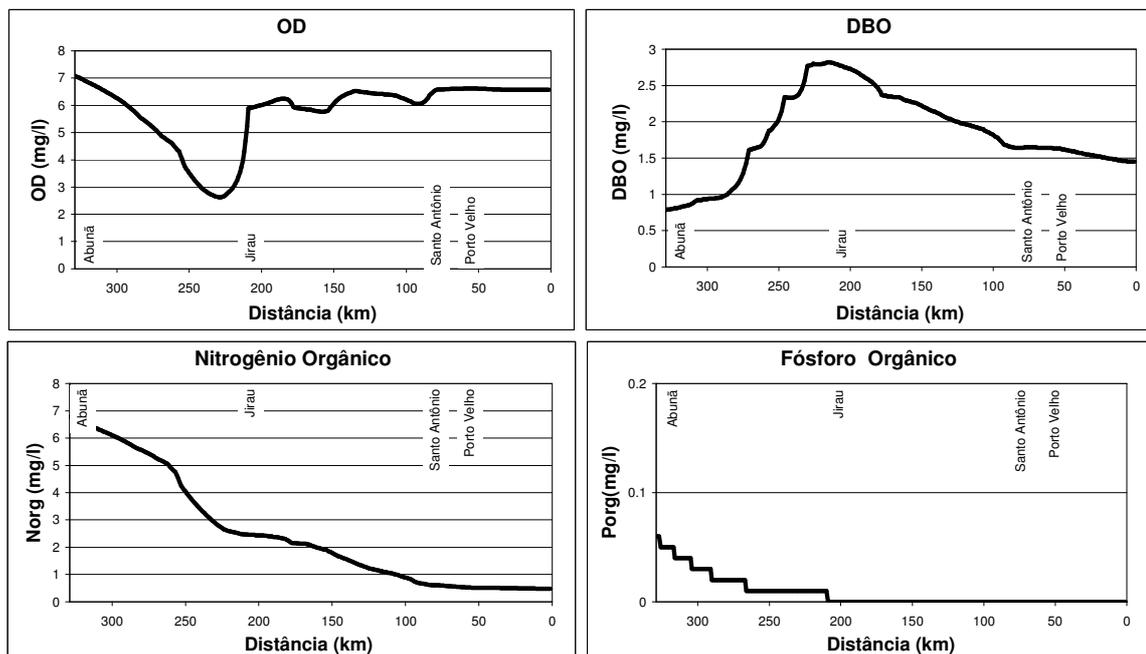


Figura 6.6
Cenário 2 – Fase 2
Enchimento do Reservatório de Jirau (2ª Adição) Até a Cota 87,50 m – Dezembro

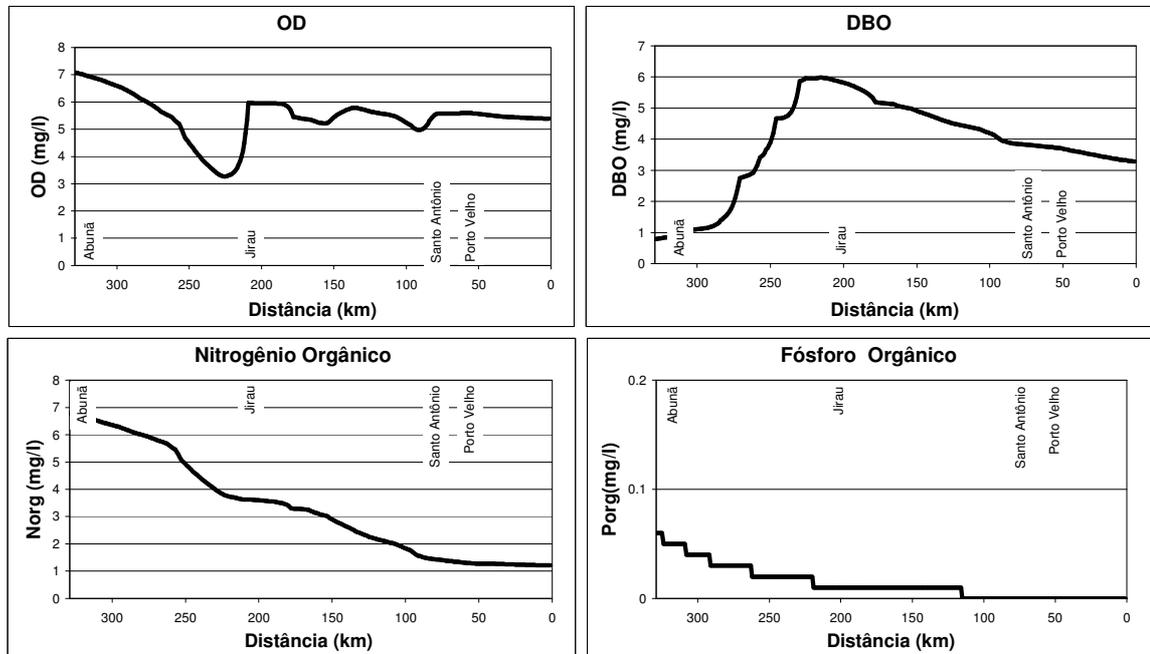
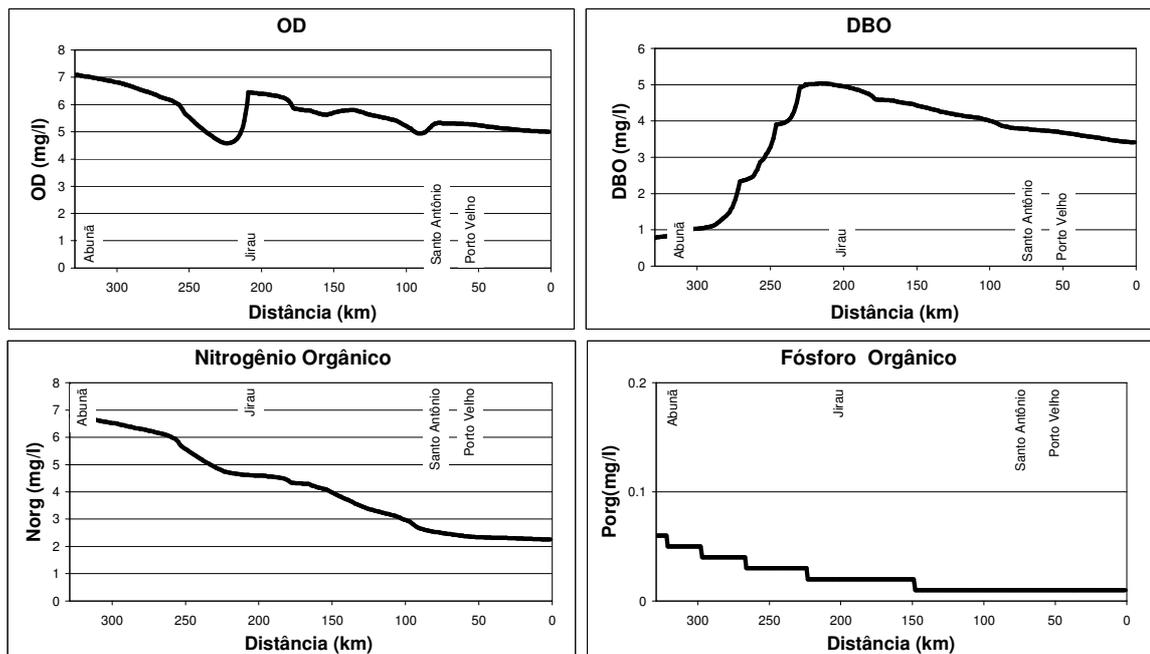


Figura 6.7
Cenário 2 – Fase 3
Enchimento do Reservatório de Jirau (2ª Adição) Até a Cota 90,00 m – Janeiro

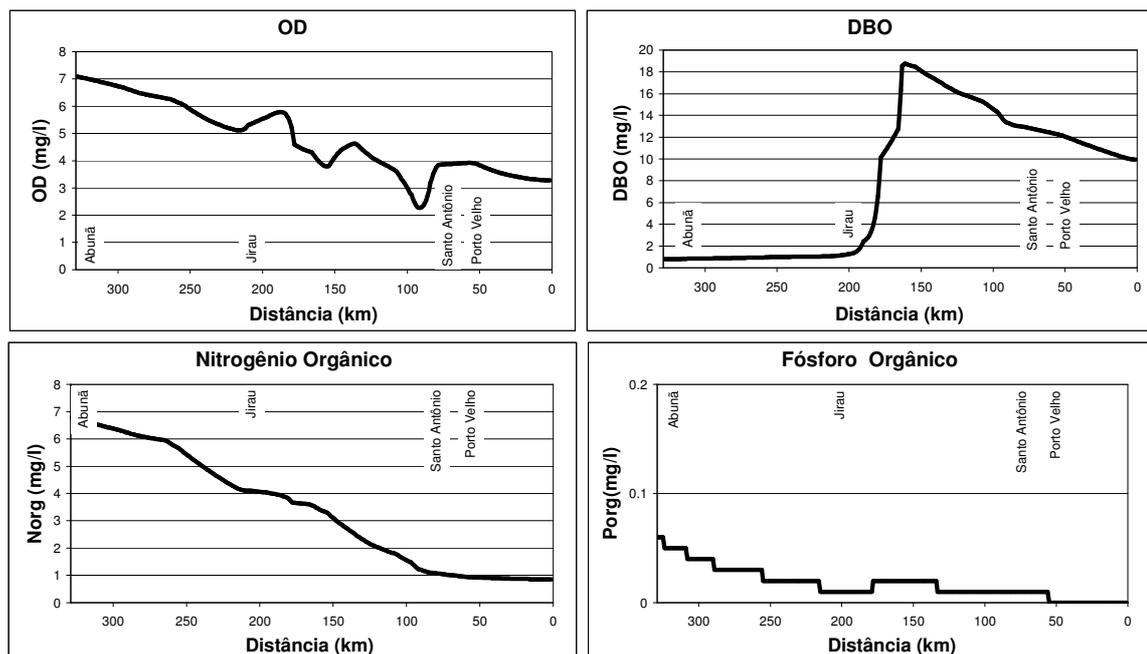


6.2.3. Cenário 3 – Enchimento do Reservatório de Santo Antônio em Primeira Adição

A Figuras 6.8 resume os resultados obtidos nas simulações do cenário 3, considerando-se o enchimento do reservatório de Santo Antônio. Observa-se as concentrações de DBO alcançam o valor máximo de 19 mg/l no trecho médio do reservatório, enquanto que as maiores depleções de oxigênio dissolvido ocorrem junto à barragem, com cerca de 2,3 mg/l. A recuperação de oxigênio dissolvido observada a jusante da barragem se deve à reaeração localizada propiciada pelo vertedouro, já que nessa fase de enchimento o fluxo para jusante é controlado pelo mesmo. No final do trecho simulado ainda se notam os efeitos da grande orgânica introduzida no sistema e ainda não estabilizada – as concentrações de OD neste ponto, em torno de 3,3 mg/l, já dão mostras de recuperação. Apesar da biomassa total afogada pelo reservatório de Santo Antônio ser menor que a do reservatório de Jirau, o processo de enchimento é realizado em uma etapa única, com duração de 7,5 dias, acarretando a solubilização de uma maior carga de carbono oxidável, cuja estabilização demanda maior quantidade de oxigênio.

Figura 6.8
Cenário 3

Enchimento do Reservatório de Santo Antônio Em Primeira Adição – Novembro



6.2.4. Cenário 4 – Enchimento do Reservatório de Santo Antônio em Segunda Adição

A Figuras 6.9 resume os resultados obtidos nas simulações do cenário 4, considerando-se o enchimento do reservatório de Santo Antônio, agora com o reservatório de Jirau implantado e já estabilizado. Apesar da presença do reservatório de Jirau a montante, este cenário não apresentou qualidade da água inferior que o cenário anterior. Se, por um lado, o reservatório de Jirau libera menores concentrações de OD para jusante, libera também, depois de estabilizado, menores teores de fósforo e nitrogênio, limitando a

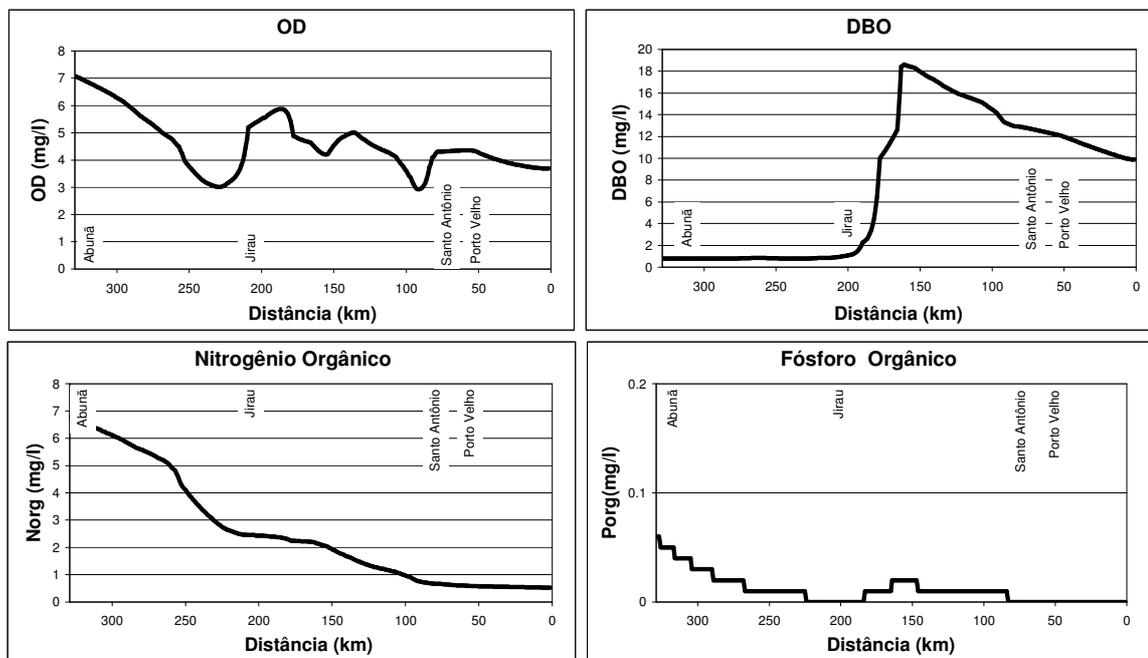
atividade biológica no reservatório de jusante. Com isso, a depleção de oxigênio dissolvido fica ligeiramente menor que no cenário anterior.

As diferenças porém são pequenas e os resultados são afetados por imprecisões nas premissas de simulação, como não considerar carga de sedimentos (que deve aumentar com o reservatório, mesmo estabilizado).

Os resultados da simulação, portanto, não permitiram distinguir com clareza os efeitos da presença do reservatório de Jirau sobre o enchimento de Santo Antônio, ou seja, não foi possível diferenciar, com segurança, os efeitos da implantação de Santo Antônio em primeira ou segunda adição.

Figura 6.9
Cenário 4

Enchimento do Reservatório de Santo Antônio Em Segunda Adição – Novembro



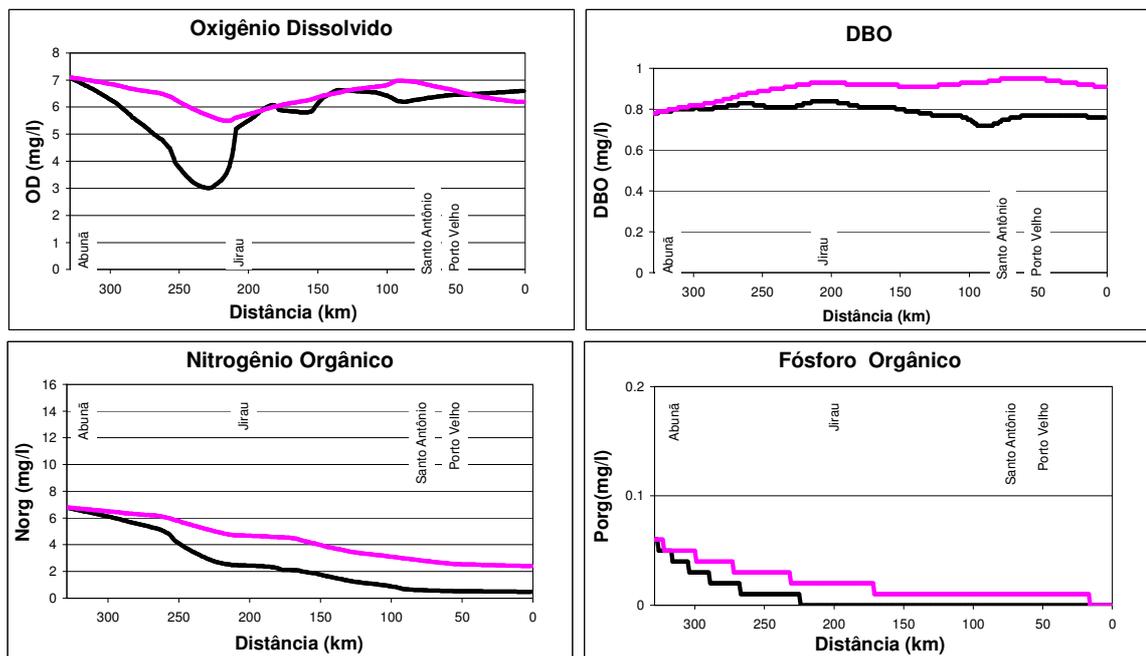
6.2.5. Cenário 5 – Qualidade da Água dos Dois Reservatórios em Condições Operativas

A Figura 6.10 resume os resultados obtidos nas simulações do cenário 5, que contempla a qualidade da água do rio Madeira com vazão em trânsito correspondente à observada durante a campanha de monitoramento, período de novembro de 2003 – enchente. Neste Cenário, admite-se a presença dos dois reservatórios com a biomassa afogada já estabilizada – computa-se apenas a diferença introduzida pelos reservatórios sobre a capacidade de autodepuração do rio Madeira.

A Figura 6.10 mostra também a simulação em condições naturais (linhas cor-de-rosa), permitindo que se perceba as diferenças mais marcantes de qualidade da água.

A modificação mais significativa foi a redução da capacidade de reaeração em Jirau, que é o reservatório mais profundo, trazendo como consequência uma maior depleção nas concentrações de oxigênio. Nota-se também nesses resultados as consequências de maior consumo de nutrientes, com os índices de fósforo e nitrogênio sendo reduzidos em Jirau, juntamente com a DBO consumida.

Figura 6.10
Cenário 5
Operação dos Dois Reservatórios Já Estabilizados



6.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As simulações realizadas permitiram avaliar o impacto da implantação dos Aproveitamentos de Jirau e Santo Antônio sobre a qualidade da água do rio Madeira, considerando os efeitos sinérgicos entre os dois reservatórios, tanto durante a fase de enchimento quanto na fase operativa, mais tarde.

As alterações na qualidade da água provocadas pelo enchimento do reservatório de Jirau são muito atenuadas pelo fato da operação ser executada em três fases, em atendimento à regra operativa definida nos Estudos de Viabilidade. A introdução das cargas decorrentes da biomassa afogada é feita de forma gradual, resultando numa redução dos impactos potenciais sobre a qualidade da água. Mesmo assim, foi simulada uma grande depleção nos índices de oxigênio dissolvido dentro do reservatório de Jirau.

O rio Madeira a jusante de Jirau apresentou excelente capacidade de recuperação, de forma que a qualidade da água não ficou comprometida pelo enchimento do reservatório, mesmo em segunda adição.

Já o enchimento do reservatório de Santo Antônio, executado em uma única etapa, apresentou conseqüências mais visíveis sobre a qualidade da água do rio Madeira, efeito que se propagou para jusante da barragem, cobrindo todo o estirão simulado (até a confluência com o rio Jamarí). Nas simulações de enchimento em segunda adição os resultados foram ligeiramente melhores, possivelmente devido ao efeito estabilizador do reservatório de Jirau, depois de consumida a biomassa de oxidação mais rápida, conforme já discutido.

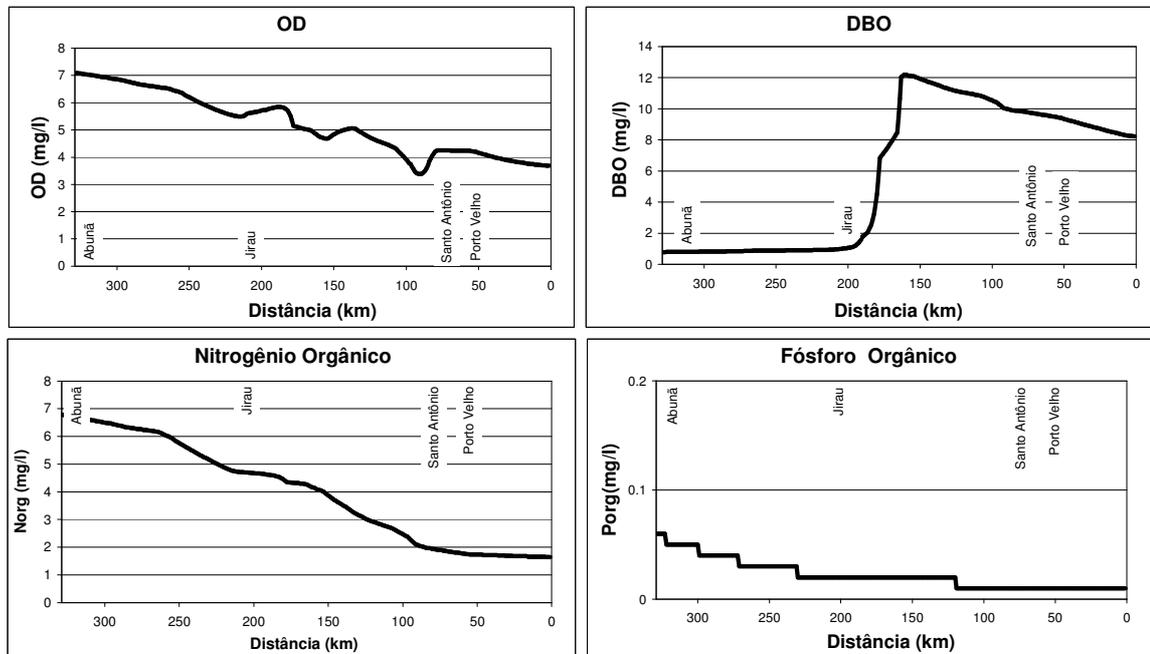
As concentrações de oxigênio a jusante da barragem de Santo Antônio atingiram níveis potencialmente críticos, abaixo de 3,0 mg/l, na fase de enchimento.

Buscando avaliar melhor o enchimento do reservatório de Santo Antônio, foi feita a simulação de um Cenário 3 Alternativo, admitindo que o enchimento fosse adiado para o mês de dezembro, quando as vazões em trânsito ficam maiores. A Figura 6.11 apresenta o resultado dessa simulação.

Pode-se ver, comparando a Figura 6.11 com a Figura 6.8, que houve uma pequena melhora nas concentrações de OD, tanto dentro do reservatório quanto a jusante da barragem, revelando que esta pode ser uma possível medida mitigadora para este impacto.

Outra possibilidade, que não foi simulada por falta de informações adequadas, seria dividir o enchimento de Santo Antônio em duas etapas, de forma similar ao que ocorre com Jirau.

Figura 6.11
Cenário 3 Alternativo
Enchimento do Reservatório de Santo Antônio (1ª Adição) Até a Cota 70,00 m
Análise da Transferência do Enchimento Para Dezembro



7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi realizada uma modelagem da qualidade da água ao longo do estirão do rio Madeira compreendido entre sua confluência com o rio Abunã, onde se inicia o reservatório do futuro AHE Jirau, e sua confluência com o rio Jamarí, cerca de 80 km a jusante do local previsto para implantação do AHE Santo Antônio.

O objetivo principal desta modelagem foi prognosticar as alterações de qualidade da água do rio Madeira provocadas pela implantação dos dois aproveitamentos, considerando sua seqüência de implantação e os efeitos sinérgicos associados. O trabalho procurou seguir o escopo estabelecido no Termo de Referência preparado pelo IBAMA, de acordo com o texto transcrito na introdução deste relatório.

Buscando encerrar as informações e análises realizadas em um único documento, e com isso evitar consultas desnecessárias, foi feita a reprodução de alguns trechos da Referência 1 necessários para a caracterização geral da qualidade da água atual do rio Madeira.

Os dois reservatórios a serem implantados apresentam características de corpos d'água de comportamento essencialmente fluvial, existindo poucos, mas importantes, trechos com escoamento de baixas velocidades. Mais que isso, as diferenças entre as velocidades de escoamento naturais e aquelas que ocorrerão após a implantação dos reservatórios são pequenas, de forma que os tempos de residência da água serão curtos, da ordem de horas ou poucos dias, mesmo durante as estiagens.

Por este motivo, adotou-se uma metodologia de modelagem de qualidade da água típica de rios, tendo-se empregado nos estudos o modelo QUAL2E, desenvolvido pela EPA – Environmental Protection Agency para simulação de qualidade da água de rios e estuários.

Os aspectos ambientais mais importantes decorrentes da implantação dos empreendimentos, sob o ponto de vista da qualidade da água do rio Madeira, e que nortearam o desenvolvimento dos estudos aqui apresentados, são:

- A presença dos reservatórios irá reduzir substancialmente a capacidade de reaeração do curso d'água, em virtude do afogamento de algumas cachoeiras existentes, responsáveis por criar condições localizadas de super-saturação de oxigênio dissolvido; e
- A grande quantidade de biomassa existente na área dos futuros reservatórios poderá provocar condições de qualidade da água críticas em determinados trechos dos reservatórios, durante o período de enchimento e no início de operação.

Na modelagem, procurou-se enfatizar o período de enchimento dos dois reservatórios, justamente por ser o momento em que as maiores cargas poderiam ser introduzidas no sistema, devido ao afogamento da vegetação existente na área inundada. Admitiu-se nas simulações, que toda a vegetação existente seria afogada, hipótese conservadora, mas condizente com o momento atual, de análise de viabilidade ambiental dos empreendimentos. Em estudos futuros, dispondo-se de um modelo mais elaborado espacialmente (bi-dimensional, pelo menos), será possível estudar estratégias de

supressão da vegetação existente, localizadas ou não, buscando minimizar os efeitos indesejáveis de seu afogamento pelo reservatório.

Os principais resultados obtidos nas análises permitiram extrair as conclusões apresentadas a seguir.

7.1 Período de Implantação dos Empreendimentos

7.1.1 AHE Jirau em Primeira Adição

A implantação do reservatório do AHE Jirau será feita em três etapas, em virtude de sua regra operativa, que determina níveis d'água variáveis mês a mês. Por esse motivo, a introdução das cargas decorrentes do afogamento da biomassa será gradual, sendo que a maior parcela dessa carga será incorporada no mês de janeiro, quando as vazões em trânsito são incrementadas.

Sob o ponto de vista do oxigênio dissolvido, a fase mais crítica será a primeira, no mês de novembro, quando do enchimento do reservatório até a El. 85,00 m. Com vazão de diluição mais baixa nesse mês (6.200 m³/s), a concentração de oxigênio dissolvido sofre uma depleção para valores reduzidos, porém próximos aos 3 mg/L.

Nos meses de dezembro e janeiro, mesmo que as cargas de DBO alcancem valores significativamente maiores, os níveis mínimos de OD superam essa marca (3 mg/L).

Como durante o enchimento do reservatório as vazões liberadas para jusante passam necessariamente pelo vertedouro, já que nessa ocasião os equipamentos já instalados encontram-se em fase de comissionamento, existe uma condição de oxigenação das águas favorável na saída do reservatório, de forma que a água será restituída para jusante em boas condições de qualidade.

7.1.2 AHE Jirau em Segunda Adição

Caso o AHE Jirau venha a ser implantado com o AHE Santo Antônio já em operação, o cenário analisado no item precedente sofre uma ligeira modificação, porque as condições de autodepuração do rio Madeira ficam diminuídas pela redução das velocidades e afogamento das corredeiras existentes a jusante do AHE Jirau.

Entretanto, como as condições de qualidade da água restituída do reservatório de Jirau serão boas, conforme descrito anteriormente, não se espera alterações significativas no corpo do reservatório do AHE Santo Antônio, nem a jusante, em nenhuma das três etapas de enchimento do reservatório do AHE Jirau.

7.1.3 AHE Santo Antônio em Primeira Adição

A implantação do reservatório do AHE Santo Antônio deverá ser feita em uma única etapa, no mês de novembro, de forma que toda a biomassa afogada ficará disponibilizada para solubilização em sete dias e meio ou menos, com 90% de garantia. Essas condições

são muito mais rigorosas, do ponto de vista da qualidade da água, que as provocadas pelo enchimento de Jirau.

Como consequência da incorporação de toda essa biomassa em uma única etapa, os níveis de oxigênio dissolvido dentro do reservatório podem cair a valores na faixa de 2 a 3 mg/L. Mesmo tendo havido aumento nos teores de oxigênio, a água restituída para jusante ainda pode apresentar concentrações de OD de 4,0 mg/L, portanto baixa, e DBO ainda acima de 10 mg/L, que resultaria em nova depleção de OD no estirão do rio Madeira a jusante deste aproveitamento, nos primeiros quilômetros. As concentrações de OD no estirão de jusante podem cair até valores próximos a 3,0 mg/L, dando indicações de estabilização, para posterior recuperação, no limite inferior do trecho estudado.

Como o enchimento do AHE Santo Antônio ocorre no pico do período de migração ascendente e desova das espécies de peixes que realizam grandes migrações, essa grande queda nos valores de OD a jusante da barragem poderá interferir nesse processo, ocasionando uma falha na desova e/ou no desenvolvimento inicial dos ovos e larvas, e afetando os estoques pesqueiros e a pesca. É importante salientar que esse efeito não será perceptível no primeiro nem no segundo ano, pois os “indivíduos que não nasceram” só atingiriam tamanhos de captura pela pesca comercial em três a seis anos, dependendo da espécie.

7.1.4 AHE Santo Antônio em Segunda Adição

Caso o AHE Santo Antônio venha a ser implantado após a formação e estabilização do reservatório de Jirau, as condições de qualidade da água resultantes do afogamento da biomassa ficam ligeiramente alteradas em relação às decorrentes da implantação em primeira adição. Os níveis de OD no reservatório caem até à faixa de 3 mg/L, se recuperando até valores na faixa entre 4 a 5 mg/L quando a água é restituída a jusante (devido ao efeito benéfico do vertedouro nessa fase de enchimento).

As melhores condições de OD verificadas no reservatório de Santo Antônio e a jusante, durante o enchimento em segunda adição, quando comparadas às condições decorrentes do enchimento em primeira adição, se devem, provavelmente, ao maior consumo de nitrogênio ocorrido no reservatório de Jirau, que reduz a demanda nitrogenada a jusante.

A implantação do AHE Santo Antônio em segunda adição é menos impactante, portanto, que sua implantação em primeira adição.

O efeito sobre os estoques de peixes se reduzem com o incremento das taxas de OD.

7.2 Período de Operação dos Empreendimentos

O perfil de qualidade da água do rio Madeira, após a implantação dos aproveitamentos de Jirau e Santo Antônio e a estabilização da biomassa afogada, será alterado principalmente no interior do reservatório de Jirau, onde a redução da capacidade de

reaeração é mais significativa, devido ao grande número de cachoeiras e corredeiras afogadas. Com isso, o equilíbrio hoje existente, com os níveis de saturação do oxigênio na faixa de 70% a 80% ficará alterado ocorrendo uma depleção nos níveis de OD, como analisado acima, para estabilizar a carga de background do rio Madeira.

Estes resultados são menos precisos que os apresentados na fase de enchimento do reservatório, porque a carga de background foi estabelecida por calibração com base em dados pontuais cobrindo um ano hidrológico e, praticamente, um único ponto amostral. Para melhor conhecimento dessa carga e, conseqüentemente, melhor representação da mesma na modelagem, seria necessário estudar melhor sua origem, para inclusive discutir sua evolução diante da implantação dos reservatórios. Nessa fase dos estudos, a mesma carga de background identificada por calibração nas condições atuais foi aplicada à condição futura, com reservatórios.

Os resultados da modelagem indicam, portanto, que durante a fase operativa dos empreendimentos poderá ocorrer, nos meses de estiagem, uma diminuição dos níveis de OD no reservatório de Jirau, sendo os níveis normais recuperados na saída do reservatório e no trecho inicial (mais raso) do reservatório de Santo Antônio.

Salienta-se que outros rios de águas brancas da planície amazônica, que não têm sistemas de corredeiras que proporcionam uma relevante aeração física, possuem níveis de saturação da ordem dos níveis previstos pelo modelo, para a fase de operação do complexo em estudo.

7.2 Recomendações

As alterações de qualidade da água do rio Madeira esperadas em decorrência da implantação e operação dos reservatórios de Jirau e Santo Antônio, considerando-se os resultados dos estudos ora apresentados, são de magnitude moderada e, a maior parte das alterações detectadas na modelagem ocorrem durante o enchimento, sendo, portanto, temporárias. Com relação à mitigação dessas alterações pode-se recomendar:

- Realizar a supressão da vegetação da área inundada do reservatório de Santo Antônio, de forma a minimizar a carga associada à biomassa afogada. Salienta-se que essa medida poderá limitar a instalação de peixes no reservatório devido, principalmente, à falta de abrigo.
- Para o reservatório de Jirau, realizar pelo menos uma limpeza seletiva da vegetação da área a ser inundada, localizada principalmente ao longo dos afluentes afogados e nos bolsões e zonas estagnadas que se formam lateralmente ao reservatório devido à irregularidade de suas margens;

Modelagem da Qualidade da Água dos Reservatório do Rio Madeira

- Proceder o enchimento do reservatório de Santo Antônio em duas ou mais etapas, como acontecerá em Jirau, de modo a promover a introdução mais lenta da carga decorrente da biomassa inundada.

Estas medidas podem ser programadas isoladamente ou de forma complementar, devendo ser realizadas simulações para avaliação da eficácia das mesmas.

Com relação à precisão e confiabilidade dos resultados da modelagem recomenda-se o aprofundamento dos estudos realizados até o presente, incluindo:

- Continuidade das campanhas de amostragem de qualidade da água, buscando aperfeiçoar os parâmetros já medidos e incluir novos parâmetros adequados para subsidiar novos estudos e modelagens.
- Aprofundamento da modelagem realizada de modo a incorporar as novas medições disponibilizadas e as análises das mesmas.
- Realização de modelagem específica dos bolsões laterais dos reservatórios para caracterizar a qualidade da água dos mesmos. Muitas dessas áreas já são alagadas anualmente, durante as cheias, podendo fornecer indicações preciosas sobre o que poderá vir a acontecer quando este alagamento ficar definitivo. Essa modelagem pode ser integrada à modelagem do corpo principal dos reservatórios (abordagem bi-dimensional), caso ocorram interações significativas.

8. REFERÊNCIAS

- Referência 1 – Diagnóstico Ambiental do Sistema Fluvial do Rio Madeira no Trecho de Implantação das Usinas Hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio (RO) – Relatório Técnico Final – Fundação Djalma Batista – Convênio FDB/INPA.
- Referência 2 – Diagnóstico do Uso da Terra e da Cobertura Vegetal das Áreas de Influência dos Aproveitamentos Hidrelétricos de Jirau e Santo Antônio – Leme Engenharia – Belo Horizonte – Fevereiro de 2005.
- Referência 3 – Golterman, H. L., R. S. Clymo & M. A. Ohnstad. 1978. Methods for Physical and Chemical Analysis of Fresh Waters. 2nd ed. IBP Handbook n° 8. Blackwell Scientific Publications, Oxford. Edinburgh London Melbourne. 214p.
- Referência 4 – MacKereth, F. J. H., J. Heron & J. F. Talling. 1978. Water Analysis: Some Revised Methods for Limnologists. Freshwater Biological Association, Special Publication 36. 120p.
- Referência 5 – APHA - American Public Health Association. 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 14a ed. Washington, DC. 1193 p.
- Referência 6 – Esteves, F. A. 1998. Fundamentos de Limnologia. Interciência.
- Referência 7 – Rai, H. & Hill, H. 1981. Physical and Chemical Studies of Lago Tupe, A Central Amazonian Black Water, Ria Lake. Int. Revue Ges. Hydrobiol.. 66I, 37-82.
- Referência 8 – Water Resources Engineers Inc., 1969. Mathematical Model for Prediction of Thermal Energy Changes in Impoundments. US EPA 16130.
- Referência 9 – Braga, B. e outros, 2002. Introdução à Engenharia Ambiental. Prentice Hall, São Paulo.
- Referência 10 – Estudos Sedimentológicos do Rio Madeira. PCE Engenharia, 2005.
- Referência 11 – Brown, L. C. e T. ^o Barnwell Jr., The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual. EPA/600/3-87/007, Athens, Ga, 1987.
- Referência 12 - Lahlou, M., S. Chaudhury, Y.Wu, K. Baldwin and D. Boyton, QUAL2E Windows Interface User's Guide. EPA/823/B/95/003, 1995.
- Referência 13 - BROWN, S., GILLESPIE, A.J.R. & LUGO, A.E. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. Forest Science 35:881-902.
- Referência 14 - Cardenas, J.D.R, 1982 - Estudos de ecologia e controle ambiental na região do Reservatório da UHE de Samuel - segmento estimativa da fitomassa do convênio ELN/MCT/CNPq/INPA 01.07.82

Modelagem da Qualidade da Água dos Reservatório do Rio Madeira

- Referência 15 – Forattini, G. D. 1982. Aplicação e Calibração de Um Modelo de Qualidade de Água. Tese de Mestrado, UFRJ, COPPE.
- Referência 16 – Chapra, S. C. 1997. Surface Water –Quality Modeling. WCB/McGraw-Hill.
- Referência 17 – Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., and Brooks, N. H. 1979. Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic, New York.
- Referência 18 – Tackston, E. L., Krenkel, P. A. 1969. Reaeration Prediction in Natural Streams. Journal of the Sanitary Engineering Division.