



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GIA 25  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

**GRUPO XI**

**GRUPO DE ESTUDO DE IMPACTOS AMBIENTAIS – GIA**

## **COMPLEXO RIO MADEIRA: PROGNÓSTICOS DE QUALIDADE DA ÁGUA CONSIDERANDO AS INTER-RELAÇÕES ENTRE O CORPO D'ÁGUA PRINCIPAL, TRIBUTÁRIOS E BOLSÕES MARGINAIS**

**Jonatas Costa Moreira(\*) Cássio B. P. Soares Maria Clara R. Xavier João Carlos M. Salgado**

**HICON - FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. - HICON - PCE**

### **RESUMO**

Os dois reservatórios previstos para o rio Madeira, Santo Antônio e Jirau, apresentam escoamento com características fluviais, mesmo nas proximidades das barragens, que possibilita representá-los através de modelos unidimensionais de qualidade da água.

Existem, entretanto, importantes áreas marginais alagadas (afluentes ou bolsões), que justificaram uma investigação mais aprofundada com emprego de modelos matemáticos uni e bi-dimensionais.

A partir da simulação das condições prováveis de qualidade da água desses corpos hídricos, foram identificados os principais impactos dos empreendimentos sobre o ambiente aquático desses compartimentos.

Ao final, as conclusões dos estudos foram estendidas para os demais compartimentos laterais não abordados diretamente.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Complexo Madeira, Modelagem Matemática, Qualidade da Água

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

As principais características dos reservatórios que constituem o Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira, Santo Antônio e Jirau, no que se refere à questão de suas modelagens hidráulicas e de qualidade da água são as seguintes:

- O reservatório de Santo Antônio será implantado com nível d'água na cota 70,00 m, apresentando uma área total de 271,26 km<sup>2</sup> (da qual 40% correspondem à área do curso natural do rio Madeira) e volume total de 2.075,13 hm<sup>3</sup>. O enchimento do reservatório de Santo Antônio será realizado no final do período de estiagem, estando previsto para o mês de novembro. O tempo esperado de enchimento em novembro é pequeno, sendo inferior a 3,6 dias com 90% de garantia. Em anos úmidos, este tempo pode ser inferior a um dia.
- O reservatório de Jirau será implantado na cota 90,00 m, apresentando uma área total de 244,03 km<sup>2</sup> (56% da qual corresponde à própria calha fluvial) e volume total de 2.014 hm<sup>3</sup>. O reservatório será operado com níveis variáveis ao longo do ano, como forma de evitar alterações no regime fluvial do rio

(\*) Avenida 28 de Setembro, 389 – sala 518 - CEP 20551-030 Rio de Janeiro, RJ – Brasil  
Tel: (+55 21) 2576-6090 – Fax: (+55 21) 2576-6090 – Email: jonatas@hicon.com.br

Madeira a montante de Abunã. Durante o período de cheia, de janeiro a abril, o NA normal do reservatório será na cota 90,00 m. À medida que as vazões afluentes vão diminuindo, o NA normal do reservatório vai sendo deplecionado, até alcançar o valor mínimo na cota 82,50 m, no mês de setembro. A partir de outubro, o NA normal volta a ser gradativamente elevado, até alcançar seu valor máximo, em janeiro. Como consequência dessa variação sazonal de nível d'água, o reservatório de Jirau irá apresentar um comportamento bem diferenciado ao longo do ano, não apenas devido à variação das vazões afluentes, mas também por causa das alterações significativas de volumes armazenados e de área inundada.

- A regra operativa sazonal do reservatório de Jirau irá afetar também seu enchimento, previsto para ser iniciado no mês de novembro, tal qual em Santo Antônio. Como o nível d'água normal só alcança a cota máxima (El. 90,00 m) em janeiro, o enchimento do reservatório será realizado em três etapas: até a cota 85,00 m em novembro, subindo para a cota 87,50 m em dezembro e finalmente alcançando a cota 90,00 m em janeiro.
- Ocorrem poucos bolsões laterais ao reservatório de Santo Antônio, sendo os dois mais importantes correspondentes aos braços afogados do rio Jaci-Paraná e do Igarapé Jatuarana.
- O reservatório de Jirau provoca sobrelevação no seu principal afluente, rio Mutum-Paraná, e em seu tributário, o rio Cotia, além de alagar um grande bolsão lateral pela margem esquerda, próximo à foz do Mutum-Paraná, que será denominado, neste trabalho, Bolsão do Mutum.

## 2.0 - ASPECTOS METODOLÓGICOS

Para a modelagem dos bolsões de inundação formados lateralmente nos afluentes dos reservatórios foi empregada a seguinte metodologia:

- Caracterização dos afluentes e bolsões laterais quanto à sua fisiografia, definindo suas curvas cota – área – volume, cobertura vegetal, regime fluvial e regime hidráulico de escoamento, antes e depois da implantação dos reservatórios;
- Caracterização do comportamento dos afluentes e bolsões selecionados quanto à qualidade da água [1], com emprego de modelos matemáticos bi-dimensionais ou unidimensionais, dependendo da fisiografia de cada um, e simulação das condições esperadas futuras de qualidade da água desses corpos hídricos, tanto para o período de enchimento dos reservatórios quanto para o período de operação dos mesmos, em condições estabilizadas;

Como resultado, os braços afogados em Santo Antônio, os do rio Jaci-Paraná e do Igarapé Jatuarana, foram estudados por modelagem unidimensional com o modelo QUAL2E e, em Jirau, no sistema lateral do rio Mutum-Paraná e seu Bolsão, foi empregada modelagem bi-dimensional, o modelo WASP-7, juntamente com seu módulo hidrodinâmico DINHYD.

Neste Informe Técnico será dada ênfase aos estudos e modelagens realizadas no sistema lateral do rio Mutum-Paraná e seu Bolsão.

## 3.0 - O SISTEMA LATERAL DO RIO MUTUM-PARANÁ

A caracterização fisiográfica dos braços laterais foi feita com base na restituição aerofotogramétrica, estabelecendo-se um modelo digital de terreno e obtendo-se as curvas cota-área e cota-volume para cada pequeno reservatório lateral. Foi necessário realizar uma estimativa das vazões afluentes em cada braço lateral, o que foi feito distribuindo-se a vazão incremental observada no rio Madeira entre Abunã Vila e Porto Velho pelos diversos tributários, proporcionalmente a sua área de drenagem.

Nesse sentido, os braços laterais do reservatório de Jirau mereceram especial atenção, já que a regra operativa prevê seu deplecionamento anual até a cota 82,50 m, manobra que imprime a estes corpos laterais uma dinâmica semelhante àquela existente em condições naturais, com os níveis d'água do rio Madeira (ou do futuro reservatório) subindo durante a enchente, se mantendo elevado durante a cheia, descendo durante a vazante e permanecendo baixo durante a estiagem.

### 3.1 Dinâmica dos Corpos Laterais – Balanço Hídrico Mensal

Uma primeira abordagem à questão da dinâmica dos braços laterais foi feita realizando-se o balanço hídrico mensal dos mesmos e calculando-se os tempos de residência da água mês a mês, antes e depois da implantação dos reservatórios.

A Tabela 1 apresenta as principais características dos corpos laterais estudados, tendo sido agrupados, nessa análise, o bolsão do Mutum com o rio Mutum-Paraná, que na verdade constituem um único sistema. Na mesma Tabela encontram-se as características dos bolsões em condições naturais, pois o rio Madeira já inunda parcialmente estes afluentes laterais em condições naturais, durante os períodos de cheia.

Tabela 1 - Comportamento do Rio Mutum-Paraná Antes e Depois da Implantação do Reservatório de Jirau

Mês	Vazão Média Mensal Madeira	Vazão Média Mensal Mutum	Condições Naturais					Condições Futuras					
			NA natural	Volume	Volume Acumulado	Vazão Acumulada	Vazão na Confluência	NA do Reservatório	NA do Bolsão	Volume	Volume Acumulado	Vazão Acumulada	Vazão na Confluência
			m	hm <sup>3</sup>	hm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m	m	hm <sup>3</sup>	hm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s
Setembro	5600	60.82	76.78	0.00	0.00	0.00	60.82	82.50	82.70	0.00	-0.18	-0.29	61.12
Outubro	6800	49.60	77.63	0.00	0.00	0.00	49.60	83.00	83.26	0.18	0.18	0.07	49.53
Novembro	10400	66.96	79.89	0.00	0.00	0.00	66.96	85.00	85.39	6.79	6.60	2.55	64.41
Dezembro	16600	70.06	82.75	0.00	0.00	0.00	70.06	87.50	88.09	34.27	27.48	10.60	59.46
Janeiro	23900	74.82	85.51	7.42	7.42	2.86	71.96	90.00	90.74	123.36	89.09	34.37	40.45
Fevereiro	29100	129.33	87.17	20.84	13.43	5.18	124.15	90.00	91.06	141.92	18.56	7.16	122.17
Março	33600	208.08	88.41	40.46	19.61	7.57	200.51	90.00	91.36	161.40	19.47	7.51	200.57
Abril	30200	265.57	87.49	24.87	-15.59	-6.01	271.58	90.00	91.13	146.28	-15.12	-5.83	271.40
Mai	22700	182.35	85.07	5.26	-19.61	-7.56	189.92	89.50	90.24	98.47	-47.81	-18.44	200.80
Junho	15900	116.86	82.47	0.00	-5.26	-2.03	118.89	87.00	87.60	26.40	-72.07	-27.81	144.66
Julho	10600	92.47	80.00	0.00	0.00	0.00	92.47	85.00	85.40	6.84	-19.56	-7.55	100.01
Agosto	6800	71.34	77.63	0.00	0.00	0.00	71.34	83.00	83.26	0.18	-6.65	-2.57	73.91
Setembro	5600	60.82	76.78	0.00	0.00	0.00	60.82	82.50	82.70	0.00	-0.18	-0.07	60.89

Um dos principais objetivos da aplicação do modelo foi definir a influência das variações de nível d'água do rio Madeira (e, posteriormente, do reservatório de Jirau) sobre as velocidades dentro do bolsão.

Para isso foi estabelecido um domínio para modelagem que inclui um trecho do rio Madeira (ou do futuro reservatório de Jirau) e o rio Mutum-Paraná, com seu bolsão lateral e seu afluente rio Cotia. A Figura 1 mostra o sistema do Bolsão do Mutum-Paraná nas águas baixas, enquanto a Figura 2 mostra a região inundada em março, ambas sob a influência do reservatório de Jirau,

### 3.2 Descrição do Modelo de Qualidade da Água Empregado – WASP-7

Um dos principais impactos causados pela implantação de reservatórios consiste na inundação de vegetação, que, por sua vez, desencadeia uma série de reações de natureza físico-química e biológica. Duas fases são identificadas no processo acima citado:

- **FASE DE ENCHIMENTO** do reservatório, quando se observa a ocorrência de condições mais críticas em relação à qualidade da água. A biomassa vegetal residente é afogada e se decompõe, liberando uma grande quantidade de compostos que provocam condições anóxicas.
- **FASE DE OPERAÇÃO**, período em que ocorre o consumo de toda a matéria orgânica inundada seguido da estabilização das condições bioquímicas do meio aquático. No caso específico do reservatório de Jirau, a fase de operação se aproxima bastante da fase de enchimento, devido à regra de operação adotada, que prevê o deplecionamento anual de até 7,50 m, praticamente repetindo anualmente, em uma escala alterada, o processo de enchimento inicial.

Para simular estes processos foi utilizado como ferramenta, o modelo de qualidade da água WASP7 (Water Quality Analysis Simulation Program) distribuído pela agência norte-americana EPA - Environmental Protection Agency. Através dos módulos presentes neste programa, são simulados os efeitos de advecção, dispersão e interação dos diversos constituintes considerados no processo.

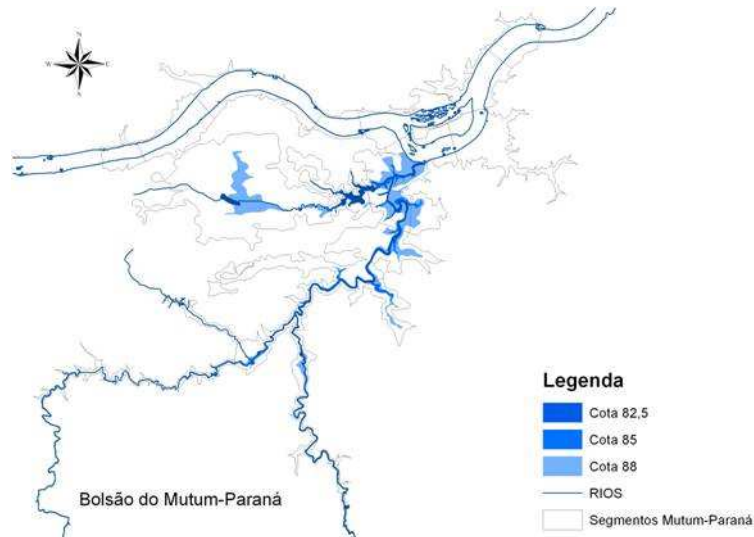
O módulo independente - DYNHYD – simula o movimento da água em rios, estuários ou reservatórios, cujo processo é representado matematicamente pelas Equações de Saint Venant. A Figura 3 apresenta a discretização espacial adotada no estudo.

### 3.3 Simulação do Enchimento Inicial e de um Ano Hidrológico Futuro, de Operação Normal

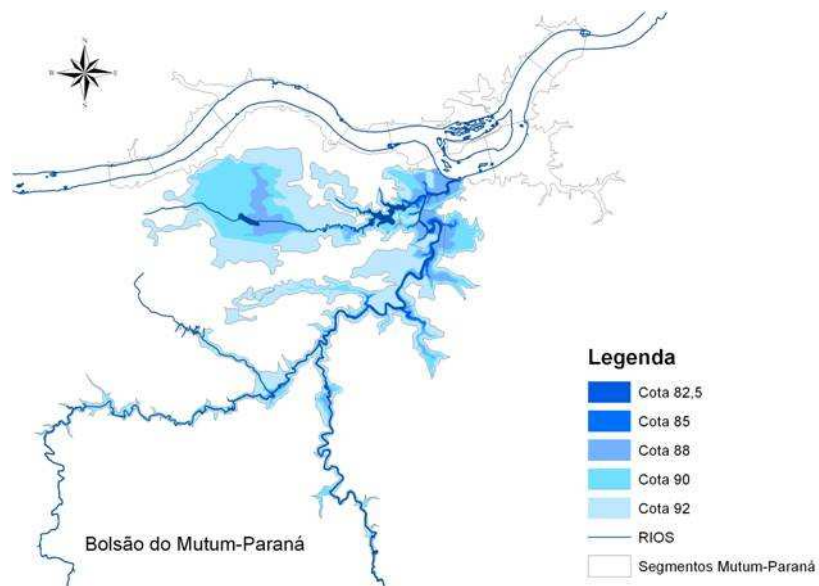
Para considerar de forma contínua a qualidade da água no Sistema Mutum-Paraná durante o processo de enchimento do reservatório de Jirau, seguido da operação normal do mesmo, que também envolve evoluções mensais de área inundada e, conseqüentemente, de fitomassa afogada, foi realizada uma simulação ao longo do período compreendido entre (datas fictícias) setembro de 2006 e setembro de 2008. A idéia foi simular, no primeiro ano hidrológico, as condições críticas decorrente do enchimento do reservatório e no ano hidrológico seguinte as condições estabilizadas que, espera-se, venham a ocorrer futuramente. Sabe-se que o processo de "enchimento" do reservatório de Jirau deverá se repetir anualmente, devido à sua operação sazonal, com deplecionamentos nas estiagens.

Para realizar esta simulação, com auxílio do modelo WASP-7, foi criado um pré-processador que calcula as cargas ao longo do tempo, em função da nova quantidade de fitomassa afogada (ou desafogada, no caso de esvaziamento do reservatório) e atualiza a massa residual para o dia seguinte. À medida em que o nível do reservatório de Jirau vai sendo elevado, o volume de vegetação afogada é atualizado, corrigindo-se o processo de incorporação da fitomassa resultante.

No primeiro ano, a carga aplicada ao modelo correspondeu à toda a biomassa afogada, com uma taxa de transferência do carbono orgânico rapidamente degradável presente na fitomassa afogada admitida constante, igual a 0,08/dia, ou seja, a cada dia 8% da carga de carbono remanescente é transferida ao corpo d'água. Esta taxa de transferência significa que ao final do primeiro mês a carga remanescente será inferior a 10% da carga inicial e ao final do segundo mês toda a parte lábil da fitomassa já terá sido transferida para o corpo hídrico.



**FIGURA 1: COM RESERVATÓRIO – MÊS DE DEZEMBRO - MÍNIMA INUNDAÇÃO**



**FIGURA 2: COM RESERVATÓRIO – MÊS DE MARÇO – MÁXIMA INUNDAÇÃO**



**FIGURA 3: SEGMENTAÇÃO ADOTADO PARA A MODELAGEM DO BOLSÃO DO MUTUM-PARANÁ**

Esta hipótese é conservadora por pelo menos duas razões: (1) a morte da vegetação não ocorre imediatamente após seu afogamento, mas gradualmente, com as espécies mais frágeis iniciando o processo de decomposição; e (2) porque a flutuação sazonal do nível de água do rio Madeira já influencia a estrutura e a dinâmica da comunidade vegetal, tanto ecologicamente quanto fisiologicamente, resultando em alterações florísticas e estruturais da vegetação (Junk et al, 1989), de forma que as áreas sujeitas a inundações mais freqüentes, como é o caso de toda a área em estudo abaixo da cota 88,00m (inundável anualmente) são povoadas por espécies adaptadas, resistentes a essa condição.

Quando as árvores são afogadas, as trocas gasosas realizadas pelo sistema radicular ficam impedidas (Larcher, 1929), podendo causar mortalidade mesmo nas espécies adaptadas, principalmente se o período de anoxia é extenso (Worbes, 1987). Assim, a vegetação que ocupa as áreas abaixo da cota 82,50m, permanentemente inundada após a implantação do reservatório de Jirau, deverá morrer e se decompor totalmente.

Já a vegetação acima da cota 88,00m, hoje raramente alagada, e que passará a ser inundada periodicamente, será submetida a um processo de seleção no qual as espécies naturalmente adaptadas irão predominar, diminuindo a freqüência de espécies mais sensíveis hoje lá presentes. Como as espécies mais sensíveis tendem a apresentar, quando inundadas, uma taxa de mortalidade maior que as espécies adaptadas, e menor capacidade de recuperação após a cheia, espera-se que a carga decorrente do afogamento da fitomassa seja decrescente ao longo do tempo, à medida que o sistema vai sendo estabilizado.

Para tentar simular este efeito, cuja magnitude é difícil de ser estimada com precisão, admitiu-se que a carga decorrente do afogamento da biomassa seria menor no segundo ano de simulação, o que pode ser considerado um exercício de sensibilidade. Arbitrou-se que a carga do segundo ano de simulação (que tenta representar uma situação futura, estabilizada) corresponde a 50% da carga estimada inicialmente.

#### 3.4 Resultados da Simulação do Ciclo OD-DBO

De acordo com o inventário florestal realizado, as cargas máximas de carbono rapidamente oxidável associadas às feições vegetais são da ordem de 10 ton/ha.

Dentro dessas premissas, foi simulado o ciclo OD-DBO ao longo do período de setembro de 2006 a setembro de 2008. As condições de contorno no rio Madeira foram impostas de acordo com os resultados do monitoramento

limnológico realizado para o diagnóstico do EIA. A Figuras 4 apresenta o gráfico de evolução de OD-DBO no Segmento 10 – Bolsão Lateral do Mutum, cuja localização aparece na Figura 3, apresentada anteriormente:

Observa-se nesses resultados que as concentrações de DBO atingem valores muito elevados, resultado da elevada carga orgânica considerada e dos baixos volumes de diluição e vazões de depuração envolvidos, principalmente nos pequenos afluentes e no próprio Bolsão Lateral.

Conseqüentemente, ocorre anoxia em todos os segmentos representados nas figuras, com períodos de duração que variam entre dois meses, no segmento mais de jusante, e sete meses, no Bolsão Lateral. É importante porém lembrar que este bolsão vai se extinguindo à medida que o NA do reservatório vai baixando, ficando reduzido apenas a um pequeno curso d'água a partir do mês de junho.

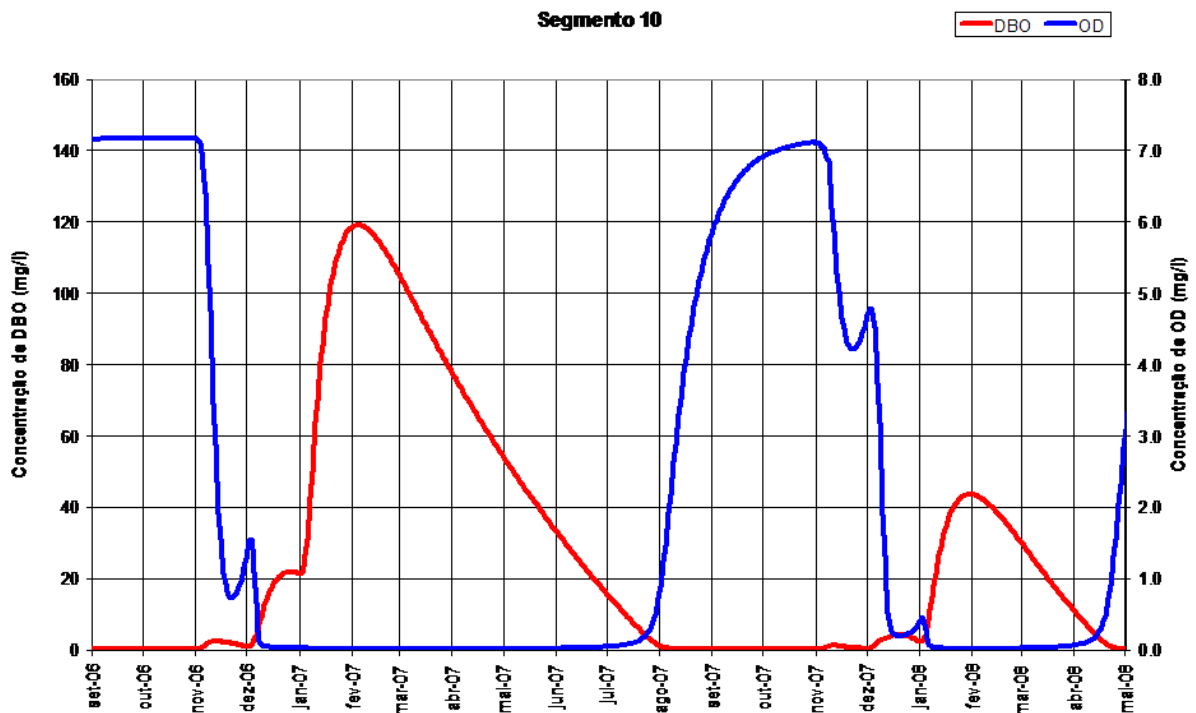


FIGURA 4: Evolução das Concentrações de OD-DBO no Segmento 10

O Bolsão do Mutum (segmento 10) apresenta comportamento mais problemático, com um período mais prolongado de anoxia. Os principais motivos deste comportamento são a maior área de vegetação afogada no segmento 10 e a pequena vazão afluente a este trecho. O fato de este segmento ser separado dos segmentos de jusante por um trecho de canal de pequena seção transversal é uma agravante, pois a área de contacto para dispersão sendo menor, o segmento também não se beneficia da melhora nas condições de qualidade da água dos segmentos vizinhos.

Visando facilitar esta análise, foram elaborados mapas de variação das concentrações dos constituintes simulados ao longo do período de enchimento do reservatório. Nas Figuras 5 a 12, organizadas em duas colunas: a coluna da esquerda refere-se às concentrações de DBO enquanto que a da direita mostra as concentrações de OD.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

A análise os resultados da simulação realizada revelou que o armazenamento lateral funciona com um atenuante da carga total lançada no rio Madeira, fazendo com que parte das reações se processem localmente, a partir do afogamento da vegetação, sendo a água com qualidade degradada liberada paulatinamente para o curso principal do rio, em função das vazões do afluente. O resultado final é uma introdução mais gradual da carga no corpo principal do rio Madeira. Localmente, todavia, as condições de redução no oxigênio dissolvido são severas, embora de curta duração.

De fato, a elevada carga orgânica e conseqüente redução dos teores de oxigênio dissolvido no rio Madeira são indicadores de que processos como os aqui simulados devem ocorrer naturalmente nos braços laterais afogados periodicamente durante as enchentes.

Este alagamento é feito com águas provenientes do próprio Mutum-Paraná e de seu afluente, o rio Cotia. Apenas excepcionalmente águas do rio Madeira invadem o bolsão, o que somente ocorre em períodos de cheia intensa (duas ocorrências no período histórico).

Após a implantação do reservatório, o Bolsão do Mutum passará a ser inundado no período de novembro a julho. As inundações posteriores à implantação do reservatório serão mais prolongadas e profundas, afetando maiores áreas.

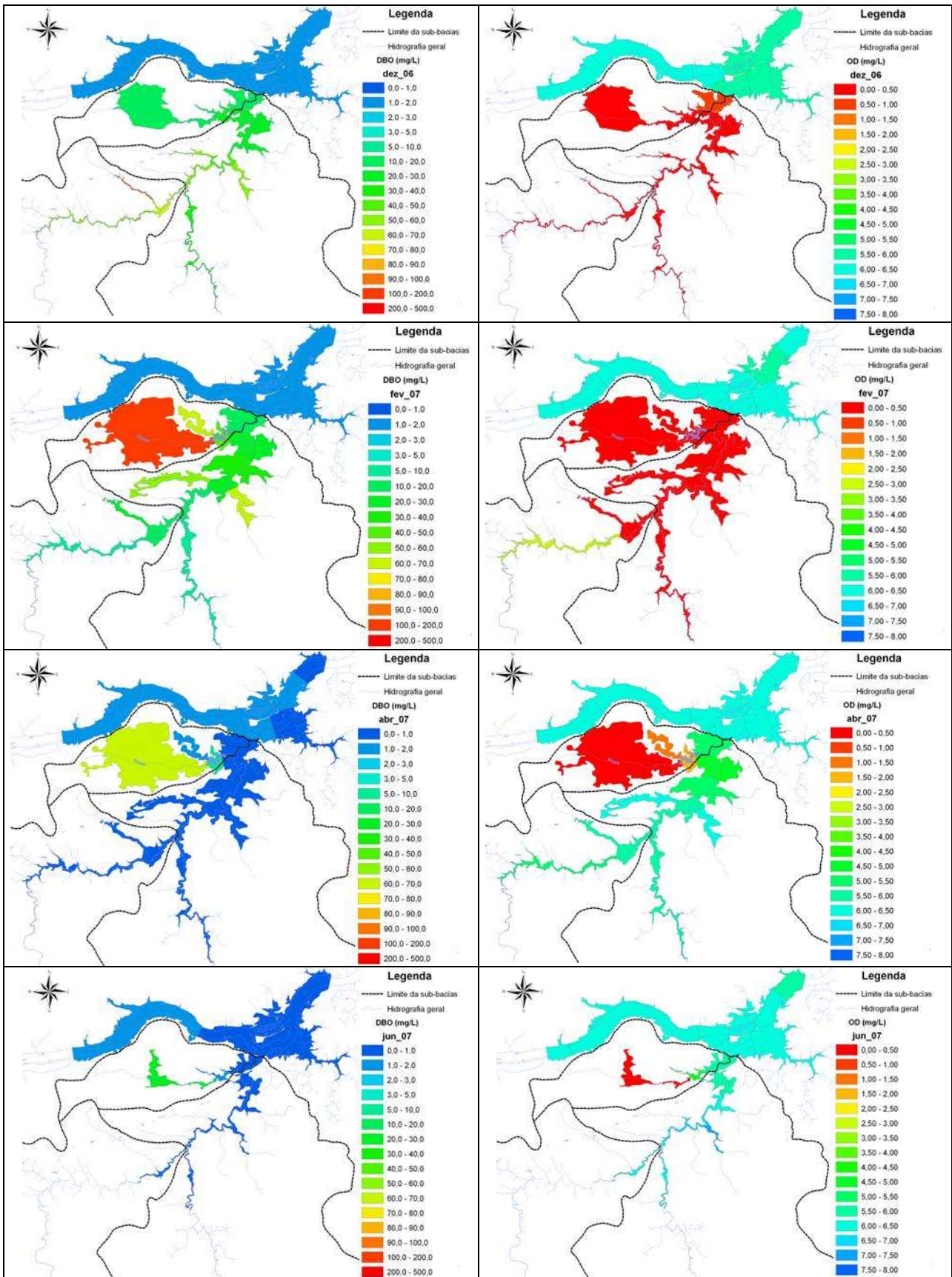
O curso principal rios Mutum Paraná e Cotia apresentam tempos de residência pequenos, da ordem de 10 dias no máximo, não apresentando tendência à estratificação ou à criação de zonas anóxicas, a não ser durante o enchimento do reservatório, por curto período.

Já o Bolsão Lateral do Mutum tem sua circulação totalmente associada à variação de níveis do rio Madeira. Após a implantação do reservatório, estas variações ficarão reduzidas no período de janeiro a abril, quando o reservatório opera em seu nível máximo, criando condições desfavoráveis para a qualidade da água. Esta situação é interrompida anualmente ao final do período de cheias, quando o bolsão é totalmente esvaziado devido ao deplecionamento do reservatório.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (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.
- (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.
- (3) Estudo de Impacto Ambiental dos Aproveitamentos Hidrelétricos de Jirau e Santo Antônio – Leme Engenharia – Belo Horizonte – 2005.
- (4) Wool, T.A., R. B. Ambrose, J. L. Martin, E. A. Comer (2001), Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) – Version 6.0 – Draft: User's Manual.
- (5) Brown, L. C., T. ° Barnwell Jr. (1987), The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual. EPA/600/3-87/007, Athens, Ga, 1987.
- (6) Lahlou, M., S. Chaudhry, Y.Wu, K. Baldwin and D. Boyton (1995), QUAL2E Windows Interface User's Guide. EPA/823/B/95/003, 1995.
- (7) PCE e Odebrecht (2005). Estudos de Viabilidade da UHE Jirau – Relatório Final. Estudos de Remanso do Reservatório.
- (8) PCE e Odebrecht (2005). Estudos de Viabilidade da UHE Santo Antônio – Relatório Final. Estudos de Remanso do Reservatório.
- (9) PCE e Odebrecht (2005). Modelagem da Qualidade da Água dos Reservatórios do Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira, maio de 2005. Anexo 2, volume 7/8 do EIA.
- (10) Junk, W. J.; Bayley, P. B. & Sparcks, R. E. 1989. The flood pulse concept in river-flood plain systems. In: Dodge, D.P. (Ed). Proceedings of the international large river symposium. Can. Spec. Pulse Fish Aquatic Sci., pp. 110-127.
- (11) Larcher, W. 1929. Ecofisiologia vegetal. Editora Pedagógica e Universitária Ltda. 319p.
- (12) Worbs, M. 1997. The forest ecosystem of the floodplain. In: Junk, W. J. (ed). The central Amazon Floodplain, Spring-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin.
- (13) Ferreira, L.V.; 1997; Is there a difference between the white water floodplain forests (Várzea) and black water floodplain forest (Igapó) in relation to number of species and density? Revista Brasileira de Ecologia, 01: 60-62.





**FIGURAS 5 a 12:** Evolução das Concentrações de OD-DBO no sistema lateral do rio Mutum-Paraná de DEZ/06 a JUN/07