



GRUPO XI
GRUPO DE IMPACTO AMBIENTAL (GIA)

**SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DA UHE FUNIL COM O MODELO CE-QUAL-W2:
COMPARAÇÃO ENTRE DUAS FORMAS DE REPRESENTAÇÃO ESPACIAL**

Cássio Botelho Pereira Soares*

Furnas Centrais Elétricas S.A.

RESUMO

Amostragens bimestrais foram realizadas na UHE Funil, de FURNAS S.A., e subsidiaram o estudo por modelo bi-dimensional de homogeneidade lateral que simula os fenômenos hidrológicos e de qualidade da água - CE-QUAL-W2. O trabalho comparou resultados modelados por duas estratégias de representações espaciais de custos de implementação bem distintos:

A primeira - Representação Rigorosa - foi concebida partindo dos perfis batimétricos e processamento com sistema de informação geográfica - ALTO CUSTO.

A segunda - Representação Simplificada - foi concebida partindo da função cota-área-volume, do comprimento longitudinal e do perfil de elevação do fundo - BAIXO CUSTO.

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade da Água, Reservatório, Modelagem Matemática, CE-QUAL-W2

1.0 INTRODUÇÃO

UHE Funil, do complexo de FURNAS, é um projeto único no Brasil, com estrutura em concreto em arco. Concluída em 1969, a UHE Funil tem uma importância considerável pois supre energia para o sul fluminense, atenua o impacto das cheias sobre as áreas urbanas e eventualmente compõe o abastecimento de água do município do Rio de Janeiro (1).

Na bacia paulista do rio Paraíba do Sul existem 31 municípios que apresentam em sua maioria alta densidade demográfica, associadas com as atividades econômicas da área. As águas do rio Paraíba do Sul e

seus afluentes abastecem 27 cidades e transportam toda a carga de esgoto, que é apenas parcialmente removida nas estações de tratamento existentes. No trecho paulista, encontram-se instaladas indústrias de grande porte ligadas a atividades metalúrgicas, alimentícias, petroquímicas e outras, que constituem a principal fonte de poluição química ao rio.

O reservatório de Funil serve como um decantador natural de material em suspensão e é considerado uma verdadeira barragem à poluição recebida do Vale Paraíba Paulista, melhorando a qualidade das águas do rio Paraíba do Sul a jusante do reservatório. Por outro lado, na UHE de Funil são realizadas periodicamente descargas de fundo que, em caráter rotineiro, têm por objetivo reduzir o acúmulo de sólidos junto à barragem. Nestas condições ocorre o transporte do material de fundo para o trecho a jusante do rio.

Devido à reconhecida importância regional deste sistema fluvial, sobretudo no Estado do Rio de Janeiro, justifica-se um esforço intensivo de aquisição de dados e modelagem do uso e ocupação das bacias hidrográficas que são os agentes decisivos, capazes de alterar a qualidade da água.

2.0 DESCRIÇÃO DA UHE FUNIL

O reservatório de Funil possui cerca de 40 km² no nível máximo operacional e acumula um volume de 890 x 10⁶ m³, cujo tempo de residência varia de 10 a 50 dias, dependendo da estação do ano. A profundidade média do lago é de cerca de 22 m e a máxima pode alcançar 70 m. O nível do espelho d'água pode variar entre as cotas altimétricas 454,0 e 466,50 m .

O reservatório tem formato alongado com dois braços longos, porém estreitos situados na margem direita do

*Furnas Centrais Elétricas S.A.

terço final do lago. A tomada d'água localiza-se próxima do fundo, de modo que todo o volume é renovado.

3.0 MONITORAMENTO LIMNOLÓGICO DA QUALIDADE DA ÁGUA

Ciente da importância desse reservatório, FURNAS retomou o monitoramento limnológico do lago, iniciado originalmente pela Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (Feema). Executou, nos mesmos pontos de coleta da rede de amostragem estabelecida pela Feema, um monitoramento limnológico no período de 07/94 até 06/96, onde foram realizadas amostragens bimestrais que subsidiaram o presente estudo de modelagem.

Para cada ponto foram registradas as condições do tempo e aspectos do espelho d'água; medidos os perfis de temperatura e oxigênio dissolvido, a transparência da água, o pH e a condutividade elétrica. Foram coletadas amostras de superfície, meio e fundo e analisados os parâmetros NO_3 , NO_2 , NH_4 , N-Kjeldahl, P-total, PO_4 , silicato, clorofila, feofitina e sólidos suspensos, seguindo os procedimentos determinados por (2) e (3).

Os dados de campo e de laboratório resultantes desse trabalho encontram-se em (4).

4.0 DESCRIÇÃO DO MODELO CE-QUAL-W2

O CE-QUAL-W2 é um modelo bi-dimensional que simula os fenômenos hidrológicos e de qualidade da água que ocorrem nos eixos longitudinal e vertical do corpo d'água. Devido a sua característica de homogeneidade lateral, este modelo é bastante indicado para representar corpos d'água relativamente longos e estreitos como rios, algumas categorias de lagos, estuários e, sobretudo, reservatórios onde os gradientes verticais e longitudinais das grandezas relacionadas a qualidade da água são mais significativos.

Na sua abordagem hidrodinâmica, o CE-QUAL-W2 estabelece uma estrutura de distribuição espacial de velocidades, densidades e temperaturas. O modelo prediz também as elevações da cota da superfície do reservatório. Os algoritmos de qualidade da água são capazes de simular o comportamento e as interações entre 21 parâmetros, além da temperatura, nas mais diversas condições.

A tarefa de reunir e preparar os dados necessários para um estudo de caso com auxílio do CE-QUAL-W2 é, com certeza, a mais extensa e trabalhosa. Apesar do modelo ser bastante flexível quanto à frequência e disponibilidade de informações, grandes volumes de

dados, de diversas categorias e disciplinas, são fundamentais para que um problema esteja bem representado (5).

Os dados relevantes para uma simulação podem ser divididos em quatro grupos: geométricos, hidrológicos, meteorológicos e de qualidade da água (6).

Os dados geométricos subsidiam a estruturação espacial do objeto em estudo, conferindo-lhe dimensões físicas e situando-o geograficamente. Mapas topográficos, perfis batimétricos e tabelas cota-área-volume são as matérias primas para a construção do grid computacional que é a representação em diferenças finitas do corpo d'água.

A partir dos dados hidrológicos, basicamente as vazões de entrada e saída do corpo principal e dos tributários, são determinados os balanços de massa, o volume acumulado e as variações da cota da superfície. Estes dados possibilitam, também, a determinação dos perfis de velocidade e, conseqüentemente, dos fluxos verticais e longitudinais.

Com os dados meteorológicos (referentes à nebulosidade, à precipitação, à evaporação, à direção e velocidade dos ventos, à temperatura do ar, à umidade relativa) o modelo calcula os balanços térmicos e complementa os balanços materiais. Desta forma ele estabelece os gradientes verticais e longitudinais de temperatura no grid computacional e, por conseqüência, determina a distribuição de densidades.

Os dados de qualidade da água são fundamentais para que o modelo simule as interações dos parâmetros físico-químicos do corpo hídrico em estudo. A temperatura, o pH, a condutividade elétrica, as concentrações das substâncias dissolvidas e/ou em suspensão determinam os balanços materiais por componentes, além de complementarem os demais balanços.

5.0 REPRESENTAÇÃO RIGOROSA - (SEGMENTOS VARIÁVEIS)

A representação espacial do corpo d'água é um ponto fundamental para a simulação do comportamento do ambiente que se quer estudar, pois é o que basicamente dá identidade ao problema.

O volume total de água armazenada (assim como os intermediários), a área da superfície e o perímetro de contorno respondem, sobretudo, pela massa contida no sistema, pelos fluxos de troca de energia e fluxos de cargas materiais a cada instante, respectivamente. Portanto, quanto mais precisa for a representação numérica destas grandezas, melhor estará configurado

especialmente o problema, com suas individualidades devidamente ressaltadas.

A Representação Rigorosa, foi concebida partindo de dados oriundos do conjunto de pontos batimétricos onde foram geradas curvas de volume e área como função da elevação e, o perímetro, o formato do contorno do reservatório e o traçado da calha original do rio Paraíba do Sul foram determinados por sistema de informação geográfica sobre imagens do satélite Landsat.

nós e os contornos altamente irregulares das margens sejam substituídos por seções retangulares de mesma área que as das originais.

A forma tridimensional de cada uma destas seções na Representação Rigorosa resulta do ajuste de parábolas parametrizadas pela distância entre as margens (abertura da curva) e pela cota do fundo (ponto de mínimo da parábola). Uma representação esquemática de todo este processo é mostrada na **Figura 1**.

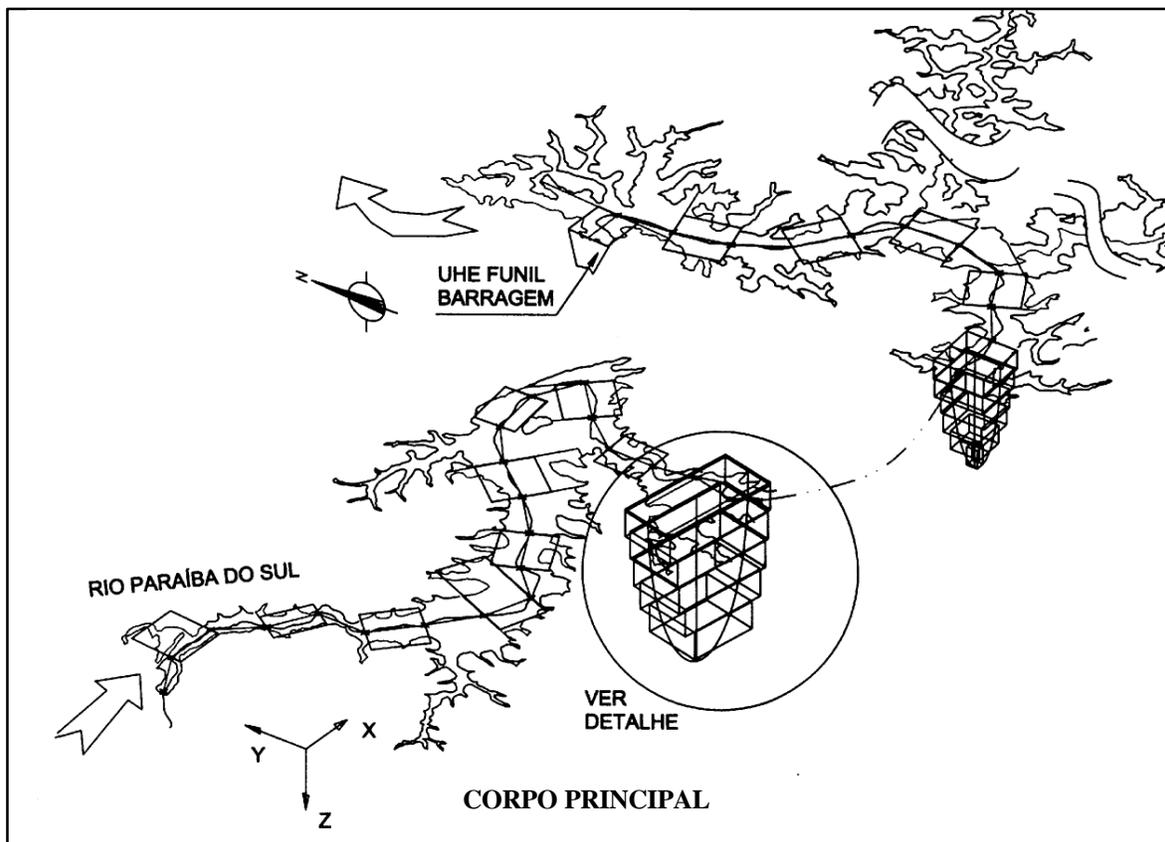


FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO RIGOROSA – VISÃO ESQUEMÁTICA

O modelo CE-QUAL-W2 substitui a conformação irregular do reservatório por uma matriz de elementos equivalentes, portanto, o traçado da calha foi subdividido em 32 segmentos de igual comprimento de arco, gerando-se assim 33 nós.

Um segmento perpendicular ao lineamento da calha, limitado pelos contornos das margens, foi traçado passando por cada um dos nós. Com isso foram estabelecidas as 32 seções do grid computacional e com auxílio de SIG foram calculados as áreas e os ângulo de inclinação de seus eixos formadores (o segmento entre os dois nós de marcação).

Pela hipótese da homogeneidade lateral, é fundamental que as seções determinadas pelos segmentos sobre os

O eixo de simetria vertical de cada um destes sólidos parabólicos foi dividido em, no máximo, 34 segmentos idênticos às espessuras de cada uma das camadas do grid computacional.

Partindo das seções retangulares da superfície, paralelepípedos foram definidos dentro de cada sólido parabólico cujas dimensões são: X = comprimento do eixo formador ($\cong 1$ km), Y = distância entre os dois ramos da parábola ajustada e Z = espessura de cada camada do grid ($\cong 2$ m), onde o elemento está situado. Desta forma, elementos de larguras parabólicamente decrescentes foram determinados a partir da superfície e na seção correspondente ao ponto mais profundo do reservatório foram sobrepostos 34 paralelepípedos, um a cada camada do grid computacional.

Os valores das espessuras das camadas foram ajustados para minimizar a diferença entre o perfil de volumes contidos no grid e o perfil previsto pela curva cota-área-volume.

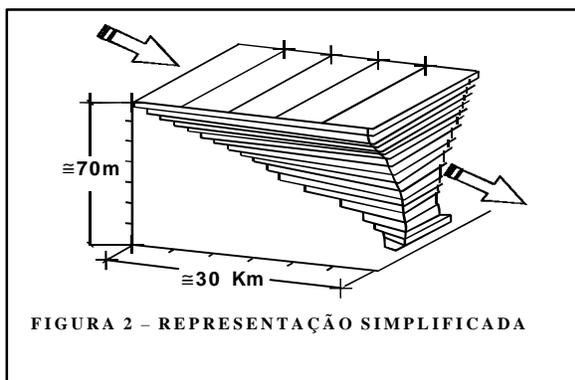
6.0 REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA - (SEGMENTOS IDÊNTICOS)

A proposta da representação simplificada é gerar o grid computacional $V=V(Z)$ partindo apenas das informações do volume como função da elevação, do comprimento longitudinal (L), isto é, do ponto de entrada do rio principal até a barragem, das espessuras de cada uma das camadas do grid (ΔZ_i) e do perfil longitudinal (X) de elevação do fundo do reservatório como função da profundidade das camadas (Z_i).

No caso estudado, foram empregadas a curva cota-área-volume do reservatório da UHE Funil, o comprimento do traçado da calha original do rio Paraíba do Sul (L), os espaçamentos, regulares, para as camadas do grid ($\Delta Z_i = \text{constante} \cong 2\text{m}$) e um perfil linear de profundidades, ou seja, o ponto de entrada do rio principal recebe o valor mínimo e o da barragem ($X=L$) recebe a profundidade máxima.

Fixando-se a posição da barragem, pode-se calcular com facilidade as dimensões do paralelepípedo (p_i), **Figura 2**, formado por: $V_{pi} = X_{pi} * Y_{pi} * \Delta Z_i$, com Z_i variando de Z_{min} até $Z_{\text{máx}}$.

1. $\Delta Z_i = Z_i - Z_{i-1} = \text{constante}$; elevações das camadas i e $i-1$ respectivamente;
2. $X_{pi} = X_{pi}(Z_i)$; distância entre a barragem e perfil longitudinal;
3. $V_{pi} = V(Z_i) - V(Z_{i-1})$; volume do sólido contido na camada i , calculado a partir da curva cota-volume;
4. $Y_{pi} = V_{pi} / (X_{pi} * \Delta Z_i)$; largura do sólido (p_i).



Desta forma são determinados e posicionados os paralelepípedos formadores da representação simplificada, respeitando fielmente a distribuição de volumes ao longo da profundidade. Dividindo-se o sólido da superfície (primeira camada) em seções de mesmo comprimento longitudinal ($\cong 1 \text{ km}$), fica

estabelecido o grid computacional, com segmentos idênticos em cada camada.

7.0 HIPÓTESES E SIMPLIFICAÇÕES NA MONTAGEM DO PROBLEMA DE SIMULAÇÃO

7.1 BATIMETRIA – RIGOROSO E SIMPLIFICADO:

Não foram consideradas as contribuições dos braços laterais do reservatório de Funil, pois essas não têm uma participação significativa nos fluxos que determinam o comportamento da qualidade da água. Toda modelagem foi feita para corpo central do reservatório descartando-se estas duas ramificações – **Figura 1**. Para tanto foi ajustada uma nova curva cota-área-volume que retrata apenas o comportamento morfométrico do corpo central.

7.2 METEOROLOGIA:

Os dados meteorológicos utilizados nas simulações tiveram uma periodicidade de doze horas e foram medidos por uma estação meteorológica próxima ao reservatório de Funil ao longo do ano de 1996. Os parâmetros meteorológicos mais importantes na condução das simulações foram a temperatura do ar, a temperatura de orvalho, a direção e a velocidade do vento e a cobertura de nuvens. A temperatura de orvalho foi calculada a partir da umidade relativa do ar e para a cobertura de nuvens foi feita uma aproximação onde ficou estipulado que os dias em que ocorreram precipitações receberam o valor máximo da escala – 10, e os demais, o mínimo – zero.

7.3 PARÂMETROS REFERENTES AO RIO :

Os dados de entrada e saída do reservatório de Funil, foram uma série de vazões de afluência e temperatura de água medidas em um ponto do rio Paraíba do Sul, localizado na entrada do reservatório. As concentrações de entrada dos parâmetros resultaram das medições de campo realizadas neste mesmo local ao longo de 1996. As vazões de saída são aquelas registradas pelo controle de operação da Usina.

A disponibilidade, assim como a frequência em que os dados estão lançados na simulação diferem para cada um destes parâmetros. As vazões de entrada e saída, temperatura da água e os dados meteorológicos estão presentes em maior quantidade, distribuídos de modo uniforme ao longo de 1996, enquanto os demais têm uma distribuição mais esparsa.

As condições iniciais de modelagem para estas simulações foram ajustadas para coincidirem com os dados observados nos trabalhos de campo de 08/05/96. A temperatura inicial dos elementos do grid computacional foi interpolada a partir dos dados medidos nesta ocasião.

A temperatura da água e as vazões afluentes e defluentes foram alimentadas com uma frequência de 24 hs ao longo de todo este ano. O nível inicial do reservatório foi ajustado para o valor registrado naquela ocasião e as concentrações dos parâmetros químicos dentro dos elementos do grid computacional foram inicializadas com o valor nulo para um maior contraste de visualização no acompanhamento destas variáveis no transcorrer das simulações.

É importante ressaltar que estas simulações não levaram em consideração os processos biológicos, portanto, não foram quantificados os efeitos decorrentes tanto da fotossíntese e respiração quanto das inter-relações da cadeia alimentar sobre a qualidade da água, sobretudo na superfície. Isto é sem dúvida uma limitação importante na veracidade das simulações dos nutrientes influenciando principalmente as concentrações de PO_4 . No entanto, podem ser bem acompanhados os relacionamentos deste parâmetro com os sólidos suspensos nos processos de sedimentação e ressuspensão que ocorrem no reservatório.

8.0 PARÂMETROS SIMULADOS E RESULTADOS

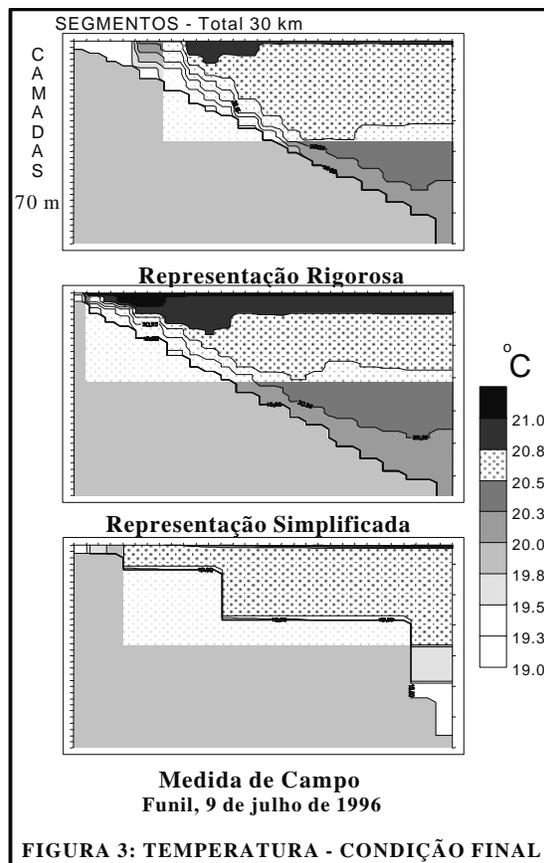
As simulações tiveram as suas condições iniciais ajustadas para àquelas observadas no trabalho de campo executado em 08/05/96. O modelo calculou como que se dariam as distribuições de massa e energia até a data de 09/06/96 quando ocorreu outra verificação de campo, interpolando os parâmetros a partir da série de dados disponíveis para 1996.

Os dados reais observados pelas estações automáticas, de meteorologia, de entrada e saída de vazão e de temperatura, foram alimentados neste período entre as condições iniciais e finais de simulação.

Os parâmetros simulados na representação do reservatório da UHE Funil são:

- Temperatura, por ser o indicador de como a modelagem está se comportando nos cálculos do balanço de energia, seja por advecção-difusão, seja através das trocas na superfície livre do reservatório **Figura 3**.

- Oxigênio Dissolvido, por sua importância aos seres vivos no ecossistema aquático, pela sua interação com as substâncias dissolvidas na água que podem consumi-lo até uma completa extinção, gerando regiões anóxicas nos corpos d'água **Figura 4**.



- Sólidos suspensos, para que se verificasse o desempenho do modelo nos processos de sedimentação e ressuspensão que são extremamente importantes em todos os reservatórios.

- Amônia e Nitrato, por serem nutrientes básicos do ecossistema aquático. A relação amônia, nitrato e oxigênio dissolvido foi selecionada, também, para se observar a capacidade do modelo em retratar os fenômenos de oxi-redução.

- Ortofosfato, por ser classicamente utilizado como o nutriente indicador de estados tróficos. Buscou-se, também, acompanhar como é tratada a relação do ortofosfato com os processos de sedimentação.

Embora o entendimento completo de um problema limnológico requiera o acompanhamento de outras variáveis, pode-se dizer que o conjunto escolhido para o caso estudado é bastante representativo e capacitado para a indicação dos fenômenos de estratificações térmicas e químicas, como também, na visualização dos estados tróficos.

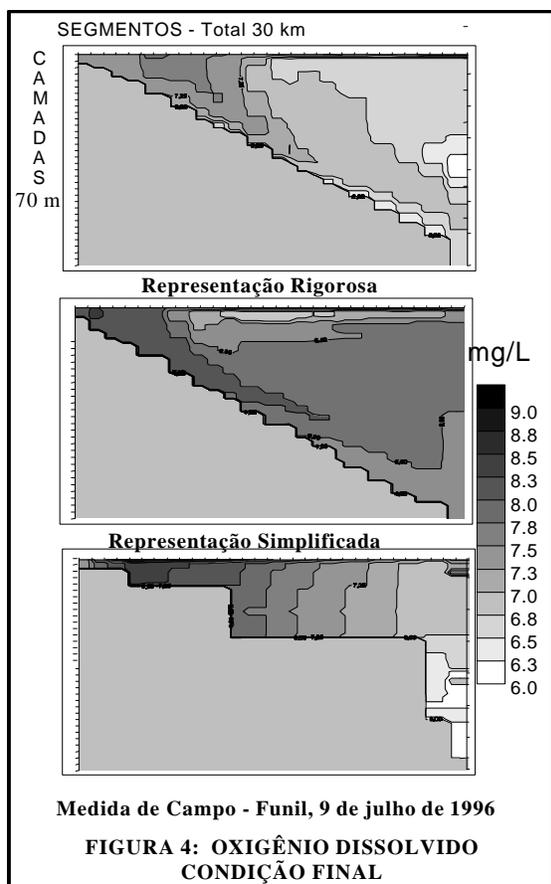


FIGURA 4: OXIGÊNIO DISSOLVIDO
CONDIÇÃO FINAL

9.0 CONCLUSÕES:

O levantamento e montagem dos dados morfométricos e geográficos dentro da estratégia de Representação Rigorosa envolve uma variedade grande de profissionais e tem custos elevados. No entanto, esta forma de representação, além de respeitar as características de volume e área do reservatório, ela agrega ao grid computacional as informações sobre as direções assumidas pelo eixo longitudinal e quanto estão afastadas as margens, seção à seção. Estes dados são característicos de cada reservatório.

A Representação Simplificada depende apenas de um conjunto mínimo de informações sobre o projeto. Os elementos do grid computacional podem ser calculados com grande facilidade, podendo ser implementados rapidamente.

O resultado gerado pela representação rigorosa retratou o que se espera dos inter-relacionamentos destes parâmetros mantendo a coerência com as bases teóricas. Também foi boa a concordância com o que se observou em campo a 09/06 onde se deu um grande

acerto em termos qualitativos e, de certa forma, uma aproximação quantitativa satisfatória.

Outro resultado importante decorrente deste trabalho é a semelhança entre os prognósticos gerados pela modelagem com a representação rigorosa e a simplificada pois a primeira tenta retratar fielmente a situação geográfica existente enquanto a segunda se atém à representação exata das grandezas volumétricas e de área, mas desobedecendo por completo as propriedades lineares e de contorno.

Evidentemente a Representação Rigorosa gerou os resultados mais acurados, no entanto, os panoramas calculados pela Representação Simplificada tiveram o mesmo acerto qualitativo e, tecnicamente esta não diferiu no seu tratamento quantitativo do resultados da outra estratégia. Vale ressaltar que os desvios observados entre os valores calculados nas duas representações não têm grande significação em termos práticos.

Os resultados obtidos sugerem que, no caso da aplicação do CE-QUAL-W2 em modelagem de qualidade da água visando uma caracterização geral, a Representação Simplificada pode ser suficiente.

10.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ÁVILA, J. P.; BICUDO, R. I. "Main Brazilian Dams". Ed. Técnica Ltda. (1982)
- (2) APHA/AWWA/WEF. "Standard methods for the examination of water and wastewater". 18th Ed (1992).
- (3) GOLTERMAN, H.L.; CLYMO, R.S. ; ONHSTAD, M.A.M.. "Methods for physical and chemical analysis of fresh waters". IBP Handbook No. 8. 2nd Ed. Blackwell Sci. Publ. Oxford (1978).
- (4) SÁ JÚNIOR, W.P.; DE FILIPPO, R.; SOARES, C.B.P. & LIMA, M.N." Caracterização limnológica do reservatório da Usina Hidrelétrica do Funil". III Congresso de Ecologia do Brasil, em Brasília-DF, (1996).
- (5) THOMANN, R.V., "Principles of Water Quality Methods Modeling and Control", Ed. Harper Collins Publishers (1987).
- (6) COLE, T. M.; BUCHAK, E. M." CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 2.0". Environmental Laboratory. U.S. Army Corps of Engineers (1995).