

## O comportamento do rio ao longo do reservatório observado a partir de Sensoriamento Remoto, dados in situ e ensaios de laboratório.

Arcilan Trevenzoli Assireu<sup>1,2</sup>  
Evelyn Márcia Leão de Moraes Novo<sup>1</sup>  
Fábio Roland<sup>2</sup>  
Felipe Siqueira Pacheco<sup>2</sup>  
Enner Herenio Alcântara<sup>1</sup>  
José Luiz Stech<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{arcilan, evlyn, enner, stech}@dsr.inpe.br

<sup>2</sup>Universidade Federal de Juiz de Fora LEA/UFJF  
CAMPUS Universitário – Bairro Martelos – 36036-900 - Juiz de Fora - MG, Brasil  
fabio.roland@edu.ufjf.br  
felipeufjf@yahoo.com.br

**Abstract.** In natural lakes inflows are usually restricted to overland flow and small streams. Their impact is usually confined to the littoral zone and surface waters. In contrast, in reservoirs, the largest inflow is usually at the reservoir entrance in the transition zone of the dammed river, and it can have a far larger impact in the reservoir hydrodynamics. The river dynamic within the reservoir was studied by integrating remote sensing data collected concurrently to field campaigns and laboratory experiments. The results from these different kinds of data and laboratory experiment corroborated the hypothesis that depending upon the density difference between the inflow and reservoir, the river can enter the epilimnion, metalimnion, or hypolimnion. Also, it was possible to set seasonal variation in the position of the plunge point. The determination of the plunge point is important because particle-laden underflows can influence bottom morphology by depositing, eroding, and dispersing large quantities of sediment particles.

**Palavras-chave:** river-reservoir transition, reservoir, density current, remote sensing, transição rio-reservatório, reservatórios, corrente de densidades, Sensoriamento Remoto.

### 1. Introdução.

A densidade das águas do rio que atingem o reservatório é normalmente diferente da densidade das águas de superfície do reservatório. Esta diferença de densidade faz com que o rio se comporte como uma corrente de densidade ao longo do reservatório (Ford, 1990). Os principais fatores que influenciam a densidade são a temperatura, os sólidos totais dissolvidos e sólidos em suspensão. Dependendo da diferença da densidade entre o rio e o reservatório, o rio pode fluir ao longo do reservatório como *overflow* (corrente de superfície), *underflow* (corrente profunda) ou *interflow* (corrente intermediária) (Martin e McCutcheon, 1999). Assim, após mergulhar, o rio pode fluir ao longo de sua antiga calha como um *underflow*.

O pressuposto teórico é que após o mergulho e durante seu curso ao longo do reservatório como *underflow* ou *interflow*, os constituintes do rio mantêm-se isolados das águas superficiais. Embora esta situação seja verdadeira em muitos casos, estudos recentes (Chen et al., 2006; Rueda et al., 2007) têm indicado que processos de mistura podem carregar os constituintes da água do rio para as camadas superficiais, embora suas condições de ocorrência sejam bastante incertas.

Assim, o melhor conhecimento sobre o comportamento do rio ao longo do reservatório é fundamental para a determinação da variabilidade espaço-temporal das características da água do reservatório, e das condições que controlam a disponibilidade dos nutrientes provenientes da bacia para a zona eufótica. Estas correntes de densidade como as do rio, podem transportar materiais como sólidos em suspensão ou nutrientes da bacia de drenagem para o corpo do

reservatório (Nix, 1981; Wetzel, 2001), e podem causar sedimentação (Annandale, 1987; De Cesare et al., 2001). Desta forma, o adequado gerenciamento de reservatórios, tendo em vista minimizar os efeitos da sedimentação e da deterioração da qualidade de água, requer conhecimento do comportamento do rio ao longo do reservatório.

Este trabalho descreve o uso de imagens do satélite Landsat-5 na faixa do espectro eletromagnético relativo ao visível e infravermelho (temperatura da água) para estudar a região de transição entre o rio e o reservatório formado a partir de seu represamento. Também, foram realizadas medidas in situ de parâmetros importantes para o entendimento do rio ao longo do reservatório: perfis de temperatura da água, oxigênio dissolvido, condutividade, turbidez, pH e parâmetros óticos. O comportamento do rio em função de sua densidade em relação à do reservatório foi estudada através de experimentos realizados em um tanque de experimento.

## **2. Material e Métodos**

Foram obtidas imagens do Satélite Landsat-5-TM sobre o reservatório de Manso referentes à estação chuvosa e seca (Figura 2). O nível de cinza nas imagens é representado como nível digital (ND) com variação entre 0 e 255 (8 bits). Foram usadas as bandas do visível (TM1, TM2, TM3) para gerar composições coloridas normal, as quais permitem identificar diferenças na concentração de partículas em suspensão na água. Para estimar a temperatura de brilho foi utilizada a faixa do infra-vermelho termal – TM6 (10.5–12.5 $\mu$ m). Para a conversão da radiância em temperatura de brilho foi utilizada uma equação desenvolvida pelo National Aeronautics and Space Administration (NASA) (Markham e Barker, 1986). O conteúdo de vapor d'água e as temperaturas atmosféricas, necessárias para alimentar a equação de correção atmosférica (Qin et al., 2001), foram medidos pelo Centro de Previsão do Tempo Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Concomitantemente à obtenção da imagem foram realizados 11 perfis verticais ao longo de eixo principal do Reservatório de Manso, que está localizado na região da Chapada dos Guimarães, próximo a Cuiabá-MT. Estes perfis estão separados de ~ 3km, sendo que na zona de transição rio-reservatório estas amostragens foram realizadas a cada 0,5 km. Foram adquiridos perfis verticais de temperatura da água (resolução de 0,01°C e acurácia de 5%), oxigênio dissolvido (resolução de 0,01 mg/L e acurácia de 2%) e condutividade (resolução de 1,0  $\mu$ S/cm e acurácia de 0.5% do valor da leitura) a partir da sonda limnológica YSI-6600. Também foi utilizado um fluorímetro perfilador (Satlantic) com resolução de 0,05  $\mu$ g/L.

### **2.1 Ensaio em Laboratório**

Para este estudo também foram realizados ensaios de laboratório utilizando um aquário com capacidade para 600 litros. Com uma rampa feita de vidro, o tanque foi dividido diagonalmente em duas partes, simulando o desnível típico que o rio sofre ao longo de um reservatório. Para simular a entrada do rio foi utilizado um béquer contendo 3 litros de água, sendo que em cada situação as águas foram coradas com anilina para que se pudesse visualizar o movimento. Nas três situações o tanque foi enchido com água na temperatura de 20°C. Para o interflow, o béquer foi enchido com água na mesma temperatura da do tanque e corada com anilina vermelha. Para o overflow, o Becker foi enchido com água na temperatura de 30°C e corado com anilina azul. Por fim, para representar o underflow, o Becker foi enchido com água na temperatura de 10°C e corado com anilina roxa. A água foi adicionada na parte superior da rampa, que serviu para representar a calha do rio como pode ser visto na Figura 1. A temperatura da água foi medida em cada etapa com um termômetro. Desta forma, foi possível observar o comportamento de entrada do rio quando a temperatura deste estava igual, mais quente e mais fria do que a do reservatório.

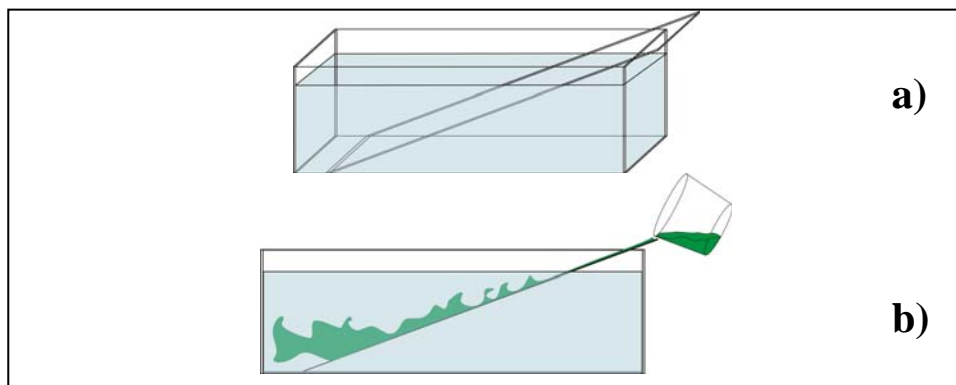


Figura 1. Esquema do tanque, com a rampa de vidro (a) e a forma como a água foi introduzida no tanque para simular a entrada do rio (b).

### 3. Resultados e Discussão

O rio apresenta variações importantes de temperatura em relação a do reservatório nos períodos das chuvas (dezembro-março) e da seca (maio-agosto). No período das chuvas, o rio apresenta maior turbidez (Figura 2a) e menor temperatura do que o reservatório (Figura 2b). Nesta condição, o rio tem maior densidade que a o reservatório e, como consequência, progressivamente mergulha e segue o antigo canal do rio (Figura 3) como uma corrente profunda parcialmente reforçada pela saída de água das turbinas. No período da seca as diferenças de turbidez entre rio e reservatório diminuem muito (Figura 2c) e a temperatura do rio tende a ser maior ou igual à do reservatório (Figura 2d).

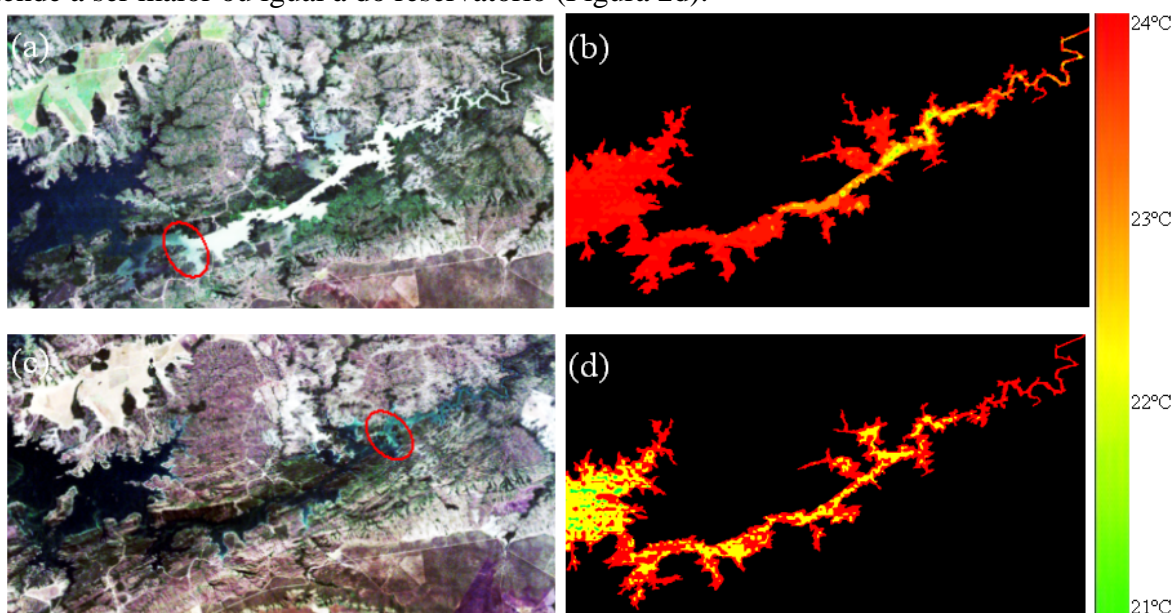


Figura 2. Imagens de satélite no período de chuva (25 de Março) (a,b) e período da seca (16 de julho) (c,d), indicando variações na posição de encontro do rio e reservatório (circulo em vermelho). As imagens são na faixa do visível (bandas 1, 2 e 3 – azul, verde e vermelho,

respectivamente) (a,c) e temperature da água (b,d) estimada a partir da banda do termal (canal 6) do Landsat-5-TM.

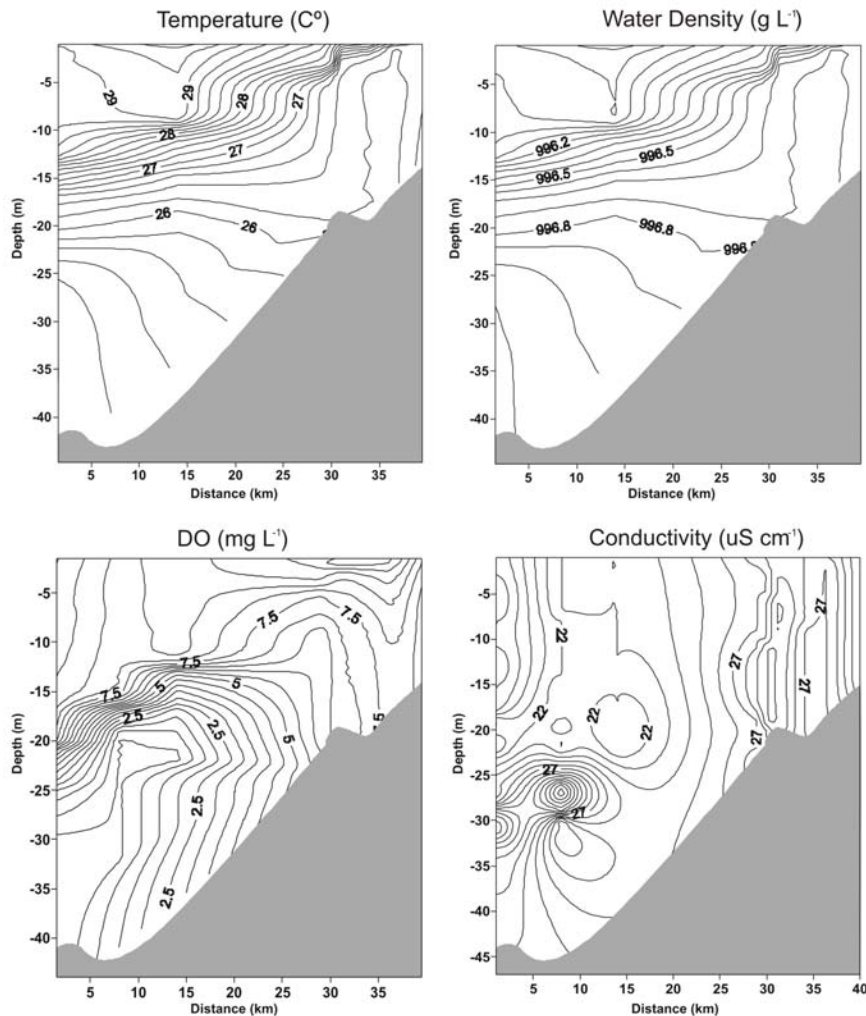


Figura 3. Isolinhas de temperatura, densidade, oxigênio dissolvido e condutividade, medidos no Reservatório de Manso durante o período das chuvas.

O rio apresentou valores similares de temperatura, condutividade e pH aos observados próximo á barragem (~ 39 km distante da posição de mergulho do rio) (Figura 4), o que indica que o rio fluiu ao longo de sua antiga calha como um *underflow*. Este comportamento foi corroborado pelos perfis verticais realizados em março de 2008 (Figura 3).

Reservatórios tropicais experimentam grandes variações sazonais e de curto prazo quanto a contribuição do rio, já que a vazão responde fortemente ao regime de chuvas. Como exemplificado para o Reservatório de Manso, as variações na vazão de entrada apresentam um padrão intermitente com elevados valores nos meses de verão e outono (Figura 5a). Este fato sugere que a vazão de entrada exerce influência sobre o tempo de residência em reservatórios tropicais, como verificado por Rueda et al. (2006) para o Reservatório Sau (Espanha).

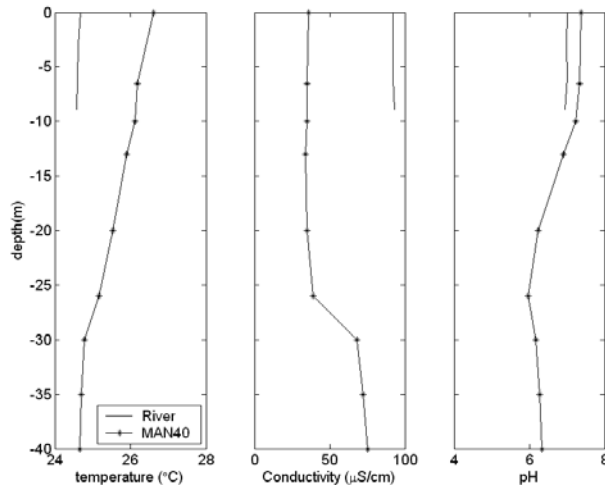


Figura 4. Temperatura, condutividade e pH medidos no rio e próximo à barragem (~ 39km distante da posição de mergulho do rio) (Julho de 2007).

As estimativas baseadas no espectro de potência para o deslocamento da termoclina e o fluxo devido à vazão de entrada, mostram variabilidades similares para frequências entre 0,3 e 0,6 cpd (Figura 5b).

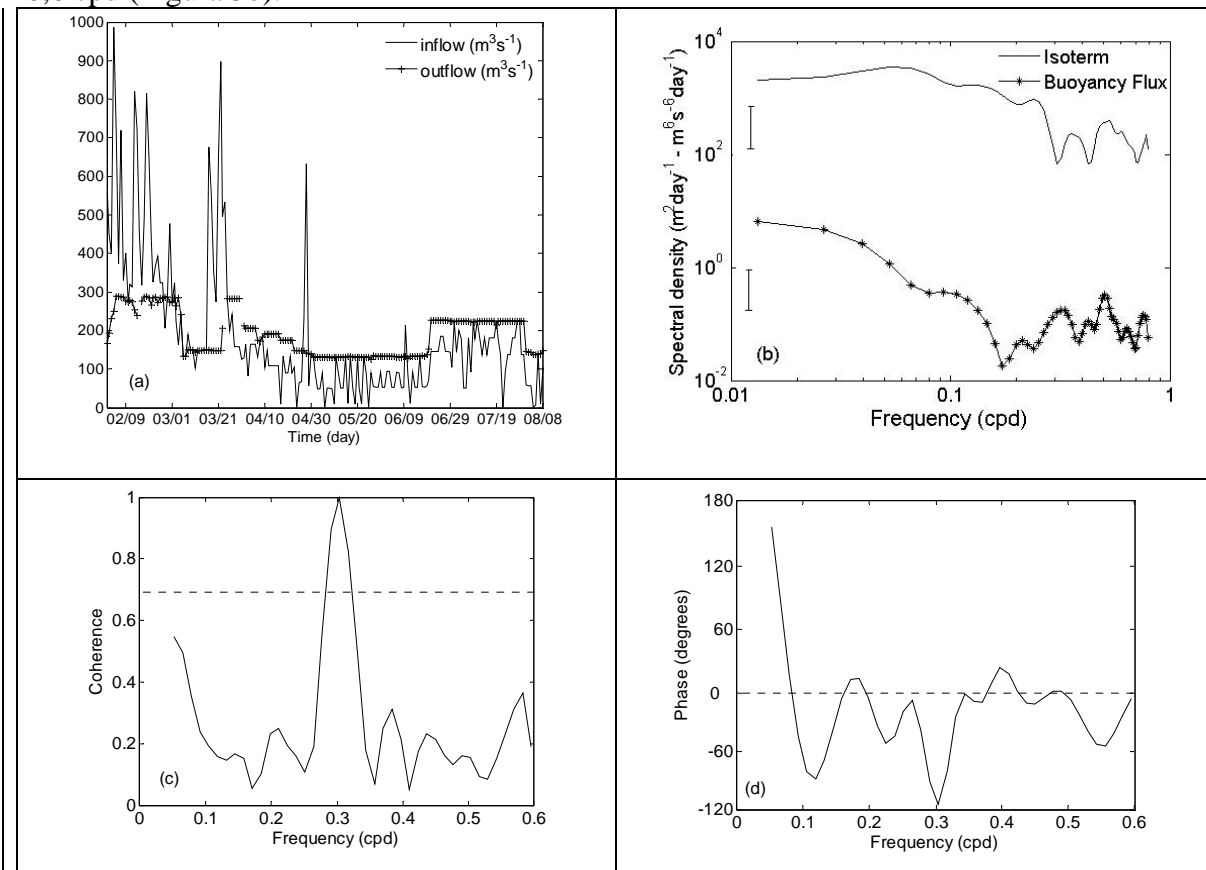


Figura 5. (a) vazão de entrada e de saída, (b) Espectro de energia da evolução temporal da termoclina e fluxo devido a vazão de entrada suavizados pelo filtro de Hanning (nível de confiança de 95% é indicado), (c) coerência (o nível a 5% para ausência de coerência é indicado) e (d) fase relativa entre a termoclina e o fluxo.

Se as amplitudes do sinal no intervalo entre 0,3 e 0,6 cpd forem indicativos de inter-relação entre oscilação da termoclina e fluxo devido á vazão, o sinal deveria ser coerente,

porém fora de fase (porque o sinal do fluxo de entrada tem que se propagar 39km até atingir a posição onde a estrutura termal foi monitorada). O espectro de coerência (Figura 5c) indica que oscilações no intervalo entre 0.3-0.6 cpd são coerentes e estão fora de fase em  $120^\circ$  (Figura 5d). Isto sugere que o fluxo devido à vazão de entrada é um importante mecanismo que influencia o deslocamento da termoclina.

Alguns exemplos de correntes de densidade simuladas em experimento de laboratórios são mostrados (Figura 6) para fornecer um amparo qualitativo aos argumentos acerca do comportamento do rio, discutidos neste trabalho. Os experimentos comprovaram a teoria:

1) Se a temperatura for maior que a do reservatório, o rio fluirá como uma camada superficial, na altura do epilímnio (*overflow*) (Figura 6a).

2) Se o rio tiver uma temperatura mais baixa que a do reservatório, mergulhará e seguirá sua antiga calha, fluindo sob o reservatório, na altura do hipolímnio (*underflow*) (Figura 6b).

3) Se tiver uma temperatura mais baixa do que a do epilímnio e mais alta do que a do hipolímnio do reservatório, ele fluirá nas camadas intermediárias, na altura do metalímnio (*interflow*) (Figura 6c).

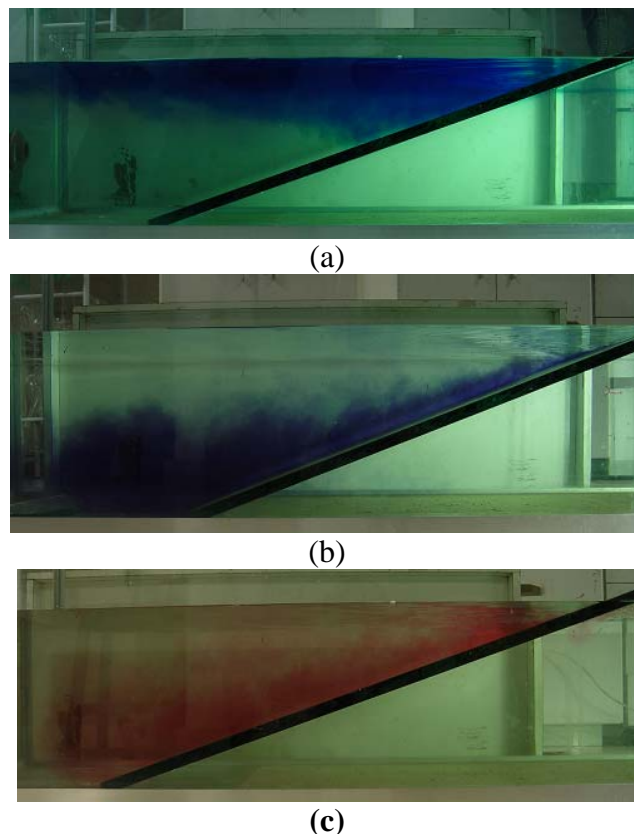


Figura 6. Simulação do comportamento do rio como função da temperatura: (a) rio com temperatura maior que a do reservatório (*overflow*), (b) rio com temperatura menor que a do reservatório (*underflow*) e rio com temperatura igual a do reservatório (*interflow*).

#### 4. Conclusão

Foi constatada neste trabalho a potencialidade do uso do sensoriamento remoto em determinar a posição de encontro entre as águas do rio e do reservatório. As variações sazonais verificadas na posição de encontro do rio-reservatório também puderam ser verificadas através do uso conjugado da imagem na faixa do visível e infravermelho. A partir dos dados medidos “in situ” e dos experimentos em laboratório, foi possível ver confirmada a hipótese de que o rio flui na superfície quando suas águas têm temperatura maior do que as do

reservatório e que flui como uma corrente profunda quando as águas do reservatório têm maior temperatura do que a do rio.

### **Agradecimentos**

Os autores são gratos a FURNAS Centrais Elétricas pelo suporte ao Projeto “Balanço de Carbono em Reservatórios Hidrelétricos”. Este trabalho é resultado da contribuição entre o Laboratório de Ecologia Aquática da Universidade Federal de Juiz de Fora e da Divisão de Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Programa Processos da Hidrosfera.

### **Referências Bibliográficas**

Annandale, G. W. **Reservoir sedimentation**. Elsevier, 1987.

Chen, S. Y., G. L. Eyink, M. P. Wan, and Z. L. Xiao. Is the Kelvin theorem valid for high Reynolds number turbulence? **Physical Review Letters** 97, 2006.

De Cesare, C.; Schleiss, A.; Hermann, F. Impact of turbidity currents on reservoir sedimentation. **J. Hydraul. Eng.** 127: 6-16, 2001.

Ford, D. E. Reservoir Transport Processes. In: Thornton, K. W., Bruce L. Kimmel, B. L. , Forrest E. Payne, F. E. (Org.). **Reservoir Limnology: Ecological Perspectives**. Wiley-Interscience. p. 15-41, 1990.

Markham, B. L.; Barker, J. L. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. **EOSAT Landsat Technical Notes**. 1: 3-8, 1986

Martin, J. L.; McCutcheon, S. C. **Hydrodynamics and transport for water quality modeling**. Lewis, 1999. 816 p.

Nix, J. Contribution of hypolimnetic water on metalimnetic dissolved oxygen minima in a reservoir. **Water Resour. Res.** 17: 329-332, 1981.

Qin, Z.; Karnieli, A.; Berliner, P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. **Int. J. Remote Sensing**. 22: 3719-3746, 2001.

Rueda, F.; Moreno-Ostos, E.; Armengol, J.. The residence time of river water in reservoirs. **Ecological Modelling** 191: 260-274, 2006.

Wetzel, R. G. **Limnology: lake and river ecosystems**. Academic Press, 2001. 850 p.