

## 2.2 Importância de modelos matemáticos em estudos ambientais - estudo de caso: o Rio Macaé

*Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues\**

*Jader Lugon Junior\*\**

*Margarete Castro Tavares\*\*\**

### 1 Introdução

Uma das questões mais relevantes que se apresentam para a sociedade contemporânea é a preservação dos recursos hídricos existentes. No Brasil, a preocupação com essa matéria é evidenciada, entre outras, na Lei 9.433/97, que veio disciplinar o uso das águas no país, e nas resoluções CONAMA 01/86 e 357/2005 que, respectivamente, criaram e atualizaram o sistema de classificação das águas de acordo com seu uso preponderante. Dentre os instrumentos de controle previstos em nossa legislação, destacam-se o monitoramento e o diagnóstico da qualidade dos recursos hídricos, em especial de rios e estuários. Nesse particular, modelos matemáticos de qualidade de água podem ser ferramentas úteis. Tais modelos consistem em um conjunto de equações que, resolvidas, fornecem a distribuição espaço-temporal de constituintes que são transportados em solução e em suspensão pelo corpo hídrico. Essas equações, via de regra, são resolvidas numericamente, gerando o que se chama de simulação numérica, e o modelo, uma vez calibrado, permite traçar cenários futuros e passados em função das entradas que sejam prescritas. Assim, zonas de mistura, comportamento de plumas de poluentes e diluições podem ser devidamente calculadas e previstas pela simulação, sendo este estudo previsto na resolução CONAMA 357/2005.

Por meio dessas simulações, é possível avaliar situações críticas, tanto de operações industriais quanto ambientais e tomar decisões antecipadas sobre as mesmas. Sabendo como o sistema irá responder aos diversos fatores, é possível direcionar ações ambientalmente mais apropriadas. Por exemplo, uma represa pode liberar suas águas para aumentar, momentaneamente a vazão

---

\* Oceanógrafo. Ph. D. pela School of Marine Science and Technology, University of Newcastle, Inglaterra. Mestre em Geoquímica Ambiental (UFF). Professor Adjunto do Departamento de Modelagem Computacional da UERJ.

\*\* Engenheiro Mecânico (UFF). Doutor em Modelagem Computacional (UERJ). Mestre em Modelagem Computacional (UERJ). Coordenador Regional de Meio Ambiente do Sistema FIRJAN.

\*\*\* Química (CEFET). Especialista em Química da Termomacaé - UTE Mário Lago. MBA em Engenharia Ambiental (Universidade Salgado de Oliveira).

do rio e reduzir as concentrações de alguns poluentes ou uma empresa pode ser solicitada a não emitir efluentes com determinada característica durante uma época do ano.

O conhecimento do comportamento das plumas de contaminação pode ser considerado como uma ferramenta de aprendizagem, possibilitando experimentar, livremente, diversas alternativas e avaliar o resultado obtido, sem nenhum prejuízo ambiental.

Embora simulações tridimensionais do corpo hídrico em questão sejam desejáveis, aproximações que reduzam o problema a duas ou a uma dimensão são igualmente aceitáveis, sob determinadas condições. Tal é o caso de rios e alguns estuários. Assim, regiões estuarinas estreitas e pouco profundas, com modesto aporte fluvial, podem ser adequadamente simuladas por modelos bidimensionais, ou seja, as propriedades resolvidas são integradas na profundidade da seção, assumindo-se homogeneidade das propriedades na direção vertical.

### **Pluma de contaminação**

*Pluma de poluição* é o mesmo que *Pluma de contaminação*: emissão contínua de poluentes no subsolo a partir de uma fonte pontual e que tem uma expansão previsível, pois esta é influenciada pelo fluxo da água subterrânea (gradiente hidráulico, velocidade, tipo de recarga), pela permeabilidade do solo e pelos contaminantes que estão sendo despejados. Com o passar do tempo, a pluma de contaminação adquire um aspecto zonado, com áreas cada vez menos poluídas, na medida que os poluentes vão sendo degradados ou sofrendo diluição pelo maior volume de água atingida. A poluição provocada pelas fossas sépticas (que causam putrefação) adquire este aspecto. Estudos têm demonstrado que alguns poluentes são diluídos, como é o caso dos cloretos, ao passo que outros sofrem oxidação e vão se transformando em outras formas igualmente injuriosas. Este é o caso do nitrogênio orgânico, contido nos dejetos humanos. Quando atinge o nível freático, este composto encontra um ambiente redutor devido ao grande consumo de oxigênio pelo processo de oxidação da matéria orgânica.

Fontes:

Disponível em: [http://www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php?title=Pluma\\_de\\_polui%C3%A7%C3%A3o](http://www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php?title=Pluma_de_polui%C3%A7%C3%A3o). Acesso em: 22 nov. 2007.

BRAGA, Benedito et al. *Introdução à Engenharia Ambiental*: o desafio do desenvolvimento sustentável. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

Nesse trabalho são apresentadas algumas simulações geradas por um modelo 2D-horizontal da região do baixo Rio Macaé, situada no litoral norte fluminense. Essas simulações são discutidas sob a ótica de avaliação ambiental, como o transporte de poluentes ocasionalmente lançados nas margens do rio.

## **2 Material e métodos**

### *2.1 Caso estudado*

O Rio Macaé nasce na Serra de Macaé, próximo ao pico do Tinguá (1560 m de altitude), em Nova Friburgo, fluindo na direção leste-sudeste, numa extensão de cerca de 136 km, até a desembocadura no Oceano Atlântico (Figura 2). A população dos municípios incluídos em sua bacia é de 141.000 habitantes, sendo 93% situada no limite territorial do município de Macaé, sendo a área urbana desse município a maior densidade na bacia, estando localizada às margens da zona estuarina do rio. Assim, o estuário do Macaé recebe a influência do entorno urbanizado da cidade de Macaé, cuja principal consequência é a degradação das condições sanitárias deste trecho do rio. Além disso, diagnosticaram-se alguns dos problemas clássicos encontrados em cidades maiores, tais como a ocupação desordenada de áreas alagadas e ribeirinhas, a destruição da cobertura vegetal, a insuficiência de infra-estrutura e a falta de tratamento completo e adequado de esgotos (CONSÓRCIO MRA-5, 2004). Ainda, os municípios litorâneos da bacia constituem o pólo industrial do norte fluminense, e respondem pela produção, recebimento e distribuição, em grande escala, de petróleo e gás natural oriundos da bacia de Campos dos Goytacazes.

A Figura 1 destaca a região de interesse deste estudo, cujo domínio simulado compreendeu uma extensão de 3km, centrado no ponto de descarte de efluentes da Usina Termomacaé (UTE) Mário Lago.



Área de estudo

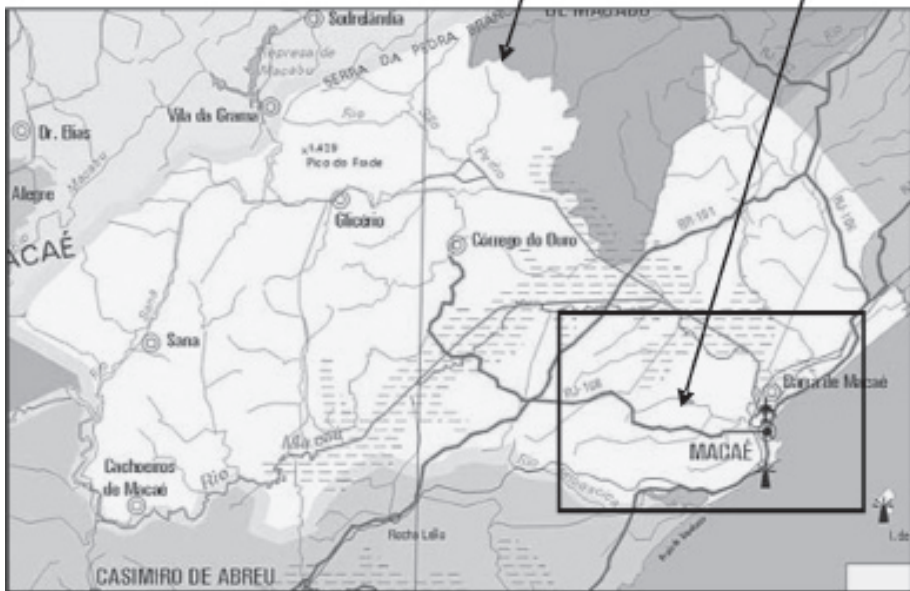


Figura 1: Localização do rio Macaé e detalhe do trecho simulado neste estudo

Fonte: Disponível em: <http://www.macaetour.com.br/mapas.html> (2007).

## 2.2 Metodologia

A Figura 2 representa, esquematicamente, a região simulada mostrando a localização do lançamento de contaminante e onde são realizadas as coletas de amostras para sua quantificação.

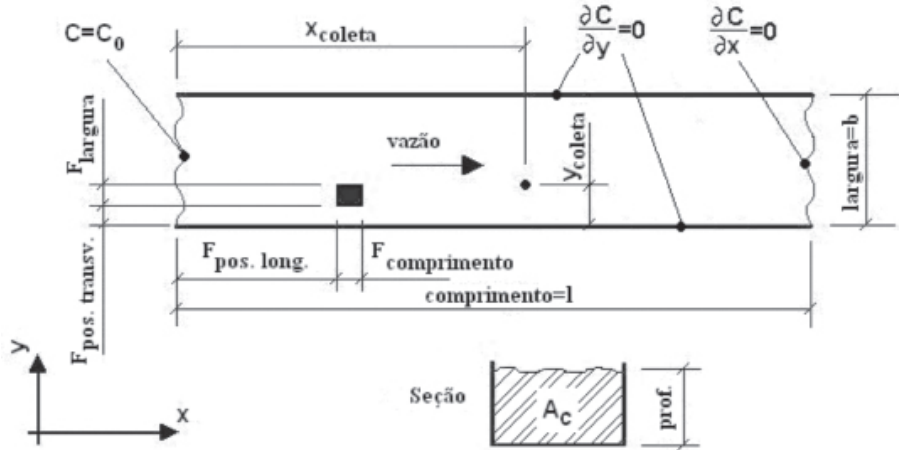


Figura 2: Representação esquemática do rio

Fonte: Elaboração própria.

O modelo foi formulado por meio da seguinte equação:

$$\frac{\partial C(x, y, t)}{\partial t} = u \frac{\partial C}{\partial x} + E_L \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right) + E_T \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (1)$$

onde  $C$  corresponde à concentração do contaminante,  $t$  é o tempo,  $x$  é a posição longitudinal,  $y$  é a posição transversal,  $u$  é a velocidade longitudinal,  $E_L$  é o coeficiente de dispersão longitudinal e  $E_T$  é o coeficiente de dispersão transversal. A velocidade  $u$  adotada foi a determinada para uma vazão de  $6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , considerando-se uma média para toda seção transversal (AMARAL, 2003), sendo obtida a partir da relação

$$u = \frac{Q}{A_c} \quad (2)$$

onde  $A_c$  é a área seção transversal, considerada uniforme para todo trecho simulado, e  $Q$  é a descarga do rio. Todas as entradas e coeficientes foram

assumidos constantes durante todo período de simulação. Assim, o modelo não só adota a simplificação da completa homogeneização vertical das propriedades transportadas, como assume, também, uma geometria simples, sendo o trecho simulado representado por um canal uniforme. Eventuais erros decorrentes dessas hipóteses simplificadoras podem, satisfatoriamente, ser compensados por meio dos coeficientes de dispersão.

No modelo foi adotada como condição inicial

$$C(x, y, 0) = C_0, \tag{3}$$

As condições de contorno adotadas foram

$$\left\{ \begin{array}{l} C(0, y, t) = C_0 \\ \frac{\partial C(l, y, t)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial C(x, 0, t)}{\partial y} = \frac{\partial C(x, b, t)}{\partial y} = 0 \end{array} \right. \tag{4}$$

A geometria e vazão adotadas na simulação são apresentadas no Quadro 1 e foram obtidas em estudos de campo na região de interesse na época de estiagem (AMARAL, 2003). Também e foram adotados os coeficiente de dispersão longitudinal e transversal de respectivamente  $5,0 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  e  $0,010 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , situados dentro dos valores experimentalmente obtidos por Barbosa Junior et al. (2005) para regime fluvial (geometria e descarga) semelhante ao aqui abordado

**Quadro 1**  
**Valores adotados na simulação**

Características do rio	Valores
Largura média [m]	42,2
Profundidade média [m]	0,71

*Continua*

Continuação

Vazão [m³/s]	6,0
Posição longitudinal de lançamento [m]	1.500
Posição transversal de lançamento [m]	0
Posição longitudinal de monitoramento a montante [m]	1.400
Posição transversal de monitoramento a montante [m]	0
Posição longitudinal de monitoramento a jusante [m]	1.600
Posição transversal de monitoramento a jusante [m]	0

Fonte: Elaboração própria.

A solução do modelo aqui proposto foi implementada por meio do Método de Volumes Finitos (MVF), implícito no tempo, os termos dispersivos sendo aproximados por diferença centrada e o termo advectivo pelo *Weighted Upstream Difference Scheme* (WUDS) (MALISKA, 2004). A discretização espacial gerou 3.040 células, sendo 154 na direção longitudinal e 20 na direção transversal. A solução numérica do modelo gerou a evolução no tempo da distribuição espacial (2D-horizontal), sendo que os resultados simulados foram comparados com observações de campo disponibilizadas pela Gerência da Usina.

O estudo da dispersão de um poluente, a partir de um modelo numérico, pode ser auxiliado por uma abordagem que adote algumas hipóteses simplificadoras. Assumindo-se as descargas permanentes do efluente e do rio e considerando que o contaminante esteja ausente no rio, a montante do ponto de lançamento, a concentração resultante ( $C_R$ ), a jusante do lançamento, pode ser estimada por:

$$C_R = \frac{C_E Q_E}{(Q_R + Q_E)} \quad (1)$$

onde  $C_E$  e  $Q_E$  são, respectivamente, a concentração e vazão do efluente e  $Q_R$  é a vazão a jusante do lançamento. Essa expressão é válida, no entanto, se for assumida ainda uma homogeneização completa do contaminante na seção transversal do rio. De fato, verifica-se que essa completa homogeneização só ocorre a uma determinada distância do ponto de lançamento, distância essa que recebe a denominação de comprimento de mistura. De acordo com Barbosa Junior et al. (2005), o comprimento de mistura pode ser calculado por:

$$L_0 = K \frac{ub^2}{E_T} \quad (6)$$

onde  $K$  é um coeficiente adimensional, cujo valor leva em conta o grau de mistura e o número e posição dos pontos de lançamento.

### 3 Resultados

É sabido que, mesmo para escoamentos unidirecionais, como os que predominam em rios, plumas de poluentes podem ser dispersadas para montante do lançamento se as velocidades de corrente predominantes forem suficientemente pequenas (JAMES, 1984). Velocidades pequenas são registradas, principalmente, durante as estações secas, como as simuladas nesse estudo. Tais resultados sinalizam que altas concentrações de alguns poluentes, eventualmente determinadas a montante do lançamento de algum efluente, não necessariamente devem ter sua origem atribuída a outra fonte que não o próprio efluente, principalmente, se o monitoramento for feito, sistematicamente, muito próximo a esse lançamento. Essa questão foi recentemente levantada pelos administradores da Usina Termoeletrica (UTE) Mário Lago, cujos efluentes são lançados na região do baixo Macaé (TENÓRIO, 2006). O Monitoramento sistemático da empresa, com estações localizadas em um raio de 100 m em torno do ponto de lançamento, indicou concentrações igualmente elevadas para alguns parâmetros tanto a jusante quanto a montante do efluente.

#### 3.1 Simulação de um contaminante hipotético

Num primeiro estudo foi simulado o lançamento de um contaminante hipotético, com concentração no efluente de  $2.000 \text{ mg/m}^3$ , considerando-se um lançamento de  $85 \text{ m}^3$  de efluente, abrangendo um período de 4 horas, modelando o lançamento de efluente por um período de 2 horas com uma vazão de  $11,8 \text{ l/s}$ .

Na Figura 3 é apresentada a evolução no tempo da concentração desse contaminante, simulada nos pontos localizados 100 m a montante e a jusante do lançamento, junto à margem próxima ao lançamento.



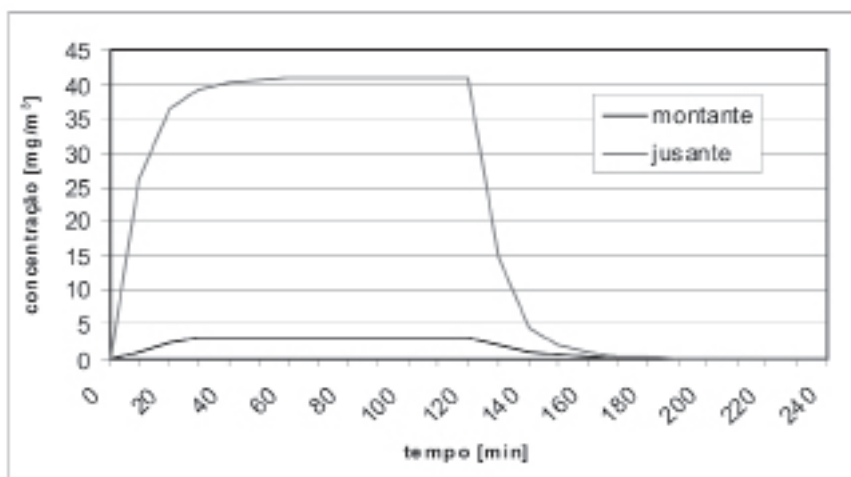


Figura 3: Evolução no tempo da concentração de um contaminante hipotético simulada nos pontos localizados 100 metros a montante e a jusante do lançamento, junto à margem próxima ao lançamento

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4 é apresentada a distribuição longitudinal da concentração do contaminante, após um período de 2 horas, onde é possível observar que as concentrações são baixas em toda transversal do rio, sendo mais altas na proximidade do ponto de lançamento e onde estariam sendo monitoradas pela UTE Mário Lago.

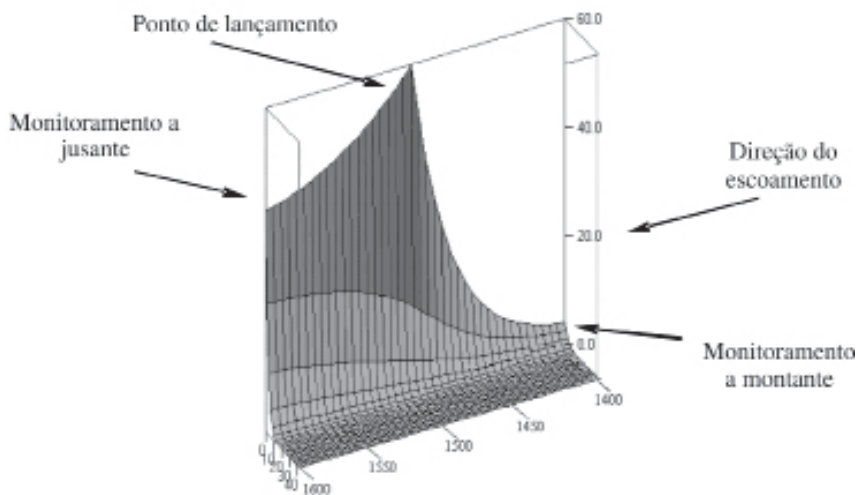


Figura 4: Pluma de um contaminante hipotético após lançamento do efluente por 2 horas

Fonte: Elaboração própria.

Utilizando a Eq. (5) para calcular a concentração após a zona de mistura, ou seja, considerando a homogeneização transversal do contaminante, chega-se ao resultado de  $11,7 \text{ mg/m}^3$ . É importante ressaltar que, de acordo com a Eq. (6), adotando-se um grau de mistura de 90%, o que implica  $K = 0,280$ , o comprimento de mistura para as condições de escoamento consideradas seria em torno de 9900 m, portanto muito superior à distância que separa o lançamento da estação de monitoramento a jusante.

### 3.2 Simulação do contaminante Cloro ( $\text{Cl}_2$ )

Estudou-se o lançamento do Cloro ( $\text{Cl}_2$ ), cuja concentração máxima permitida em efluentes é de  $200 \text{ mg/m}^3$  e em águas continentais de classe II de  $10 \text{ mg/m}^3$  (Resolução CONAMA 357/2005). Nota-se que, em média, o lançamento da empresa fica em torno de  $90 \text{ mg/m}^3$ , portanto abaixo do limite legal, enquanto o monitoramento sistemático registra médias de  $60 \text{ mg/m}^3$  e  $70 \text{ mg/m}^3$ , respectivamente, a montante e a jusante do ponto de lançamento.

A simulação considerou um período de 4 horas, modelando o lançamento de efluente por um período de 2 horas com uma vazão de  $11,81/\text{s}$ , correspondendo ao lançamento de um volume de  $85 \text{ m}^3$  de efluente.

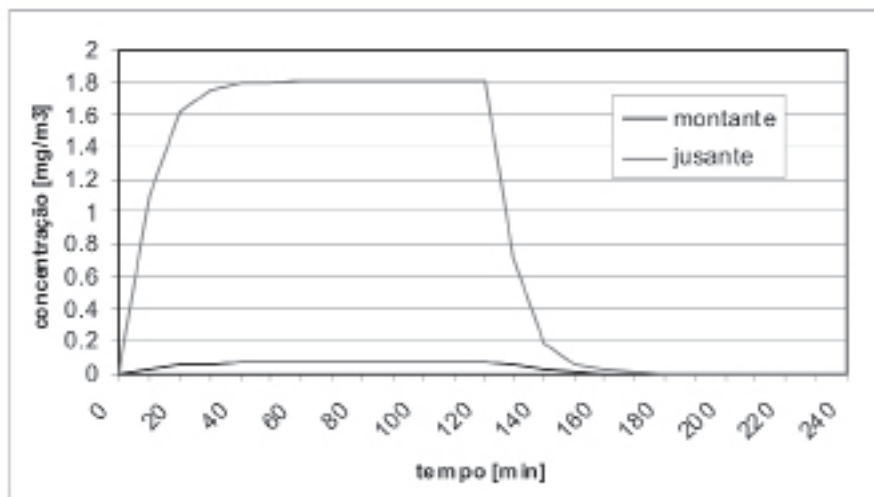


Figura 5: Evolução no tempo da concentração de Cloro ( $\text{Cl}_2$ ) simulada nos pontos localizados 100 metros, a montante e a jusante do lançamento, junto à margem próxima ao lançamento  
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 5 é apresentada a evolução no tempo da concentração de Cloro ( $Cl_2$ ) simulada nos pontos localizados 100 m, a montante e a jusante do lançamento, junto à margem próxima ao lançamento. Verifica-se que as concentrações simuladas nos pontos, a montante e a jusante do lançamento, são muito inferiores às efetivamente observadas no monitoramento do rio pela UTE Mário Lago, da ordem de 60 a 70  $mg/m^3$ .

Além disso, a concentração calculada após o comprimento de mistura, Eq. (5), seria de 0,16  $mg\ m^{-3}$ , igualmente bastante inferior aos valores medidos durante o monitoramento.

Analisando-se o resultado da simulação e também o valor calculado após homogeneização transversal do contaminante, conclui-se, realmente, que a origem do contaminante é externa à UTE Mário Lago e que as águas do rio Macaé já chegam à região com valores elevados.

#### **4 Conclusões e trabalhos futuros**

O modelo aqui desenvolvido mostrou-se bastante adequado para avaliar o comportamento de poluentes lançados em meio fluvial, em que pesem as simplificações adotadas na formulação bidimensional. Isto foi possível à custa de poucos parâmetros, os quais foram assumidos constantes para todo o domínio e inalterados para os diversos cenários simulados. Tal estratégia confere ao modelo boa capacidade de previsão para estações de estio, que normalmente causam maiores preocupações às autoridades ambientais, em face da baixa capacidade de diluição do corpo hídrico receptor. O modelo pode, ainda, servir de suporte a decisões concernentes à tomada de água, à diluição de efluentes e ao estabelecimento de zonas de mistura para a região do baixo Macaé, informações que hoje encontram forte demanda na legislação ambiental brasileira (RESOLUÇÃO CONAMA 357/2005).

Esta pesquisa será aprofundada mediante implementação de melhorias no monitoramento realizado pela UTE Mário Lago - Petrobras e pela investigação experimental dos coeficientes de dispersão longitudinal e transversal utilizando a abordagem de Problemas Inversos (LUGON et al., 2007).

## 5 Referências

AMARAL, K. *Estuário do rio Macaé: modelagem computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos*. 150 p. (Dissertação) Mestrado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

BARBOSA JUNIOR, A. R. et al. Métodos diretos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em cursos d'água naturais. Parte 2 - Aplicação e comparação dos métodos. *Revista Escola de Minas*, v. 58, n. 2, p. 139-145, 2005.

BRASIL. Lei das Águas. Lei n. 9.433, 8 jan. 1997.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA), n. 1, 23 jan. 1986.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA), n. 357, 17 mar. 2005.

CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL MRA-5. Projeto de Criação do Plano de Bacia na Bacia Hidrográfica do Rio Macaé, RJ: Rio de Janeiro, 52 p, 2004.

JAMES, A. *An Introduction to Water Quality Modelling*. Nova York: John Wiley and Sons Ltd., 1984, 234 p.

LUGON, J. Jr.; SILVA NETO, A. J.; RODRIGUES, P. P. G. W. Assessment of Dispersion Mechanisms in Rivers by Means of an Inverse Problem Approach. *Inverse Problems, Design and Optimization Symposium (IPDOS)*, Miami, USA: 2007.

MALISKA, C. R. *Transferência de Calor Computacional*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

TENÓRIO, Adriana. Macaé, Usina Termoeletrica Mário Lago. *Reunião Técnica na Empresa*, 30 out. 2006.

EMPRESA MUNICIPAL DE TURISMO DE MACAÉ (MACAETUR). Disponível em: <http://www.macaetour.com.br/mapas.html>. Acesso em: 05 out. 2007.

