

# Uso de traçadores fluorescentes para determinar características de transporte e dispersão no Rio Piabanha (RJ) para a modelagem quali-quantitativa pelo HEC-RAS

*Use of dye tracers to determine transport and dispersion parameters in Piabanha River (RJ) for its quali-quantitative modeling with HEC-RAS*

Paulo Vitor Ribeiro Marques da Silva<sup>1</sup>, José Otávio Goulart Peclý<sup>2</sup>, José Paulo Soares de Azevedo<sup>3</sup>

## RESUMO

Um estudo de campo foi realizado em um trecho de aproximadamente 70 km do rio Piabanha, localizado entre Petrópolis e Areal, na região serrana do Estado do Rio de Janeiro, para estimar as características de transporte e dispersão de contaminantes usando técnicas de traçadores fluorescentes. A análise dos resultados de dois trabalhos de campo, realizados no outono de 2012, permitiu determinar os valores de tempo de trânsito, vazão líquida, velocidade média e coeficiente de dispersão longitudinal. Utilizou-se os dados de vazão e velocidade média obtidos nos ensaios com traçadores para calibrar o modelo hidrodinâmico unidimensional *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System* (HEC-RAS). Considerando que parâmetros hidráulicos obtidos por métodos clássicos em rios com geometria muito irregular, como a do rio Piabanha, não são adequados para representar as características médias de um trecho, os ensaios com traçadores representaram uma boa alternativa para obtenção de parâmetros necessários a modelos hidrodinâmicos. Os resultados obtidos pelo modelo HEC-RAS apresentaram ótima concordância com os dados obtidos por meio dos ensaios com traçadores fluorescentes.

**Palavras-chave:** traçadores fluorescentes em hidrologia; transporte e dispersão de poluentes; modelagem hidrodinâmica e de transporte.

## ABSTRACT

A field study was carried out on a reach of approximately 70 km of Piabanha river, located between Petrópolis and Areal, in the highlands of Rio de Janeiro State to estimate the transport and dispersion characteristics of contaminants using dye tracers techniques. The results of field campaigns, conducted in the fall of 2012, allowed to determine the values of transit time, flow rate, mean flow velocity and longitudinal dispersion coefficient. The flow rate and mean velocity obtained in situ with dye tracers were used to calibrate the one-dimensional hydrodynamic model *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System* (HEC-RAS). Whereas hydraulic parameters obtained by classical methods for rivers with very irregular geometry such as Piabanha river are not suitable for representing the average characteristics of a river stretch, the results obtained with tracers represented a good alternative to obtain parameters used in hydrodynamic models. The results obtained by the HEC-RAS are in excellent agreement with those obtained by the experiments with fluorescent tracers.

**Keywords:** fluorescent tracers in hydrology; transport and dispersion of pollutants; hydrodynamic and transport modeling.

## INTRODUÇÃO

As consequências de acidentes ambientais e o estudo de qualidade da água são uma preocupação constante e, por isso, segundo Okubo (1968) e Büge (1990), modelos numéricos têm sido utilizados para previsão do comportamento dos contaminantes em corpos d'água naturais. Entretanto, nem sempre é adequado explicar com abordagens teóricas

o processo de dispersão em corpos hídricos naturais, levando assim à necessidade de estudos empíricos envolvendo experimentos de campo (LIMA & GIORGETTI, 1997; MACHADO *et al.*, 2008).

A equação de difusão-advecção unidimensional é utilizada para prever a qualidade da água em ambientes naturais, sendo o coeficiente de dispersão longitudinal ( $D_L$ ) um dos parâmetros mais importantes

<sup>1</sup>Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

<sup>2</sup>Doutor em Engenharia Oceânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

<sup>3</sup>Ph.D. em Mecânica Computacional pelo Wessex Institute of Technology - Southampton, Grã-Bretanha.

**Endereço para correspondência:** Paulo Vitor Ribeiro Marques da Silva - Rua Carvalho de Mendonça, 13 - Copacabana - 22020-050 - Rio de Janeiro (RJ), Brasil - E-mail: paulovitormarques@coc.ufrj.br

Recebido: 28/05/15 - Aceito: 03/06/16 - Reg. ABES: 150187

para a modelagem unidimensional. A determinação de  $D_L$  pode ser feita a partir de ensaios de campo com traçadores fluorescentes, pois, quando esses são bem misturados com o corpo hídrico, simulam de forma realista o movimento e a dispersão de um poluente solúvel passivo. Os ensaios com traçadores fluorescentes também fornecem dados que podem ser usados para alimentar e calibrar modelos hidrodinâmicos, necessários para a determinação de parâmetros de advecção.

Neste trabalho, são descritas as seguintes etapas conduzidas durante o estudo:

1. planejamento e realização de ensaios de campo com traçadores fluorescentes;
2. avaliação das condições de mistura lateral;
3. determinação da velocidade média, tempo de trânsito e coeficientes de dispersão;
4. avaliação do desempenho dos traçadores fluorescentes Amidorodamina G e Uranina; e
5. emprego dos resultados obtidos no experimento de campo com traçadores fluorescentes para calibrar um modelo hidrodinâmico unidimensional.

Como resultados, o trabalho contribui com informações sobre características hidráulicas e parâmetros de transporte e dispersão em um trecho do rio Piabanha com aproximadamente 70 km de extensão, situado entre a confluência dos rios Avelá-Leman e Piabanha, na cidade de Petrópolis, e o município de Areal, ambos situados na bacia do rio Piabanha, no estado do Rio de Janeiro.

### Outros trabalhos relacionados ao tema

A técnica de uso de traçadores fluorescentes (ROLDÃO; PECLY; TRENTO, 1996; SILVA *et al.*, 2009) é utilizada para determinar parâmetros de transporte e dispersão, por meio de ensaios *in situ*, cuja finalidade é auxiliar o planejamento de ações e sistemas de alerta para minimizar problemas ocasionados por despejos acidentais de poluentes em corpos de água naturais.

A metodologia para estudo das características de transporte e dispersão é usada como subsídio para a modelagem de despejos acidentais de poluentes solúveis em um sistema fluvial, propiciando, assim, antever e avaliar, para diferentes cenários, suas consequências para a qualidade da água (JAMES, 1984; BROER, 1991; SCHNOOR, 1996).

O estudo de Machado *et al.* (2008) utilizou dados de um traçador ambiental não fluorescente (no caso, o sódio) para determinar o coeficiente de dispersão usado como parâmetro em um modelo de dispersão de efluentes no rio Atibaia (SP).

Estudos para a avaliação de riscos relacionados ao lançamento de produtos em corpos d'água sem tratamento utilizaram o modelo QUAL2E e dados obtidos em campo através de uma combinação

de técnicas hidrométricas e estudos com traçadores fluorescentes (MCAVOY *et al.*, 2003).

A metodologia de traçadores fluorescentes foi utilizada em um estudo nos rios Mondego, Douro e Tagus, em Portugal, para calibrar um modelo de qualidade da água e simular diferentes cenários produzidos após o lançamento acidental de cargas poluentes no trecho estudado (DUARTE & BOAVENTURA, 2008).

Como ferramenta para o gerenciamento de acidentes, aplicativos baseados em Sistemas de Informações Geográficas têm sido empregados para calcular a concentração e o tempo de trânsito de contaminantes (SAMUELS *et al.*, 2006). Os resultados obtidos nos estudos com traçadores fluorescentes foram usados para avaliar e calibrar o aplicativo, usado para obter a resposta a acidentes ambientais e auxiliar o planejamento de ações para proteger locais específicos no corpo hídrico.

## METODOLOGIA

### Local de estudo

A bacia do rio Piabanha localiza-se no reverso da Serra do Mar, com uma área de drenagem de aproximadamente 2.065 km<sup>2</sup>, abrangendo quatro municípios fluminenses (Areal, Teresópolis, São José do Vale do Rio Preto e Petrópolis) onde vivem cerca de 400 mil habitantes. A Figura 1 apresenta um mapa da bacia do rio Piabanha com a localização das seções monitoradas no estudo de campo, das estações fluviométricas de Petrópolis, Pedro do Rio e Moura Brasil e dos municípios abrangidos pela bacia.

Com sua nascente na Serra do Mar a 1.546 metros de altitude, o rio Piabanha possui uma extensão de aproximadamente 80 km e deságua, pela margem direita, no rio Paraíba do Sul, o mais importante do Estado do Rio de Janeiro. Seu principal afluente é o rio Preto, que tem aproximadamente 54 km de curso. O rio Paquequer, afluente do rio Preto, apresenta extensão de 37 km e banha Teresópolis, em seu trecho inicial.

Devido à sua importância, uma série de estudos para a bacia do Piabanha tem sido realizada — incluindo os de Rosso (1986), Kling (2005) e Paula (2011). Estudos visando atividades de gerenciamento incluem o Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul (COPPETEC, 2007), Plano de Manejo da Área de Proteção Ambiental (APA) Petrópolis (ECOTEMA, 2004) e o relatório do Estudos Integrados de Bacias Experimentais (EIBEX) (COPPETEC, 2010).

A partir do sítio HidroWeb (<http://hidroweb.ana.gov.br/>) da Agência Nacional de Águas (ANA), escolheu-se as estações Petrópolis, Pedro do Rio e Moura Brasil para realizar uma caracterização simplificada do regime hidrológico. O ano hidrológico da bacia do rio Piabanha corresponde ao período de setembro a agosto do ano subsequente. As maiores vazões ocorrem de dezembro a março e as mínimas de julho a setembro.

## Ensaio com Traçadores Fluorescentes

O rio Piabanha possui diferentes características ao longo de sua extensão, com grandes variações de geometria em sua calha, diferentes campos de velocidade alternando trechos de acentuada e de baixa declividade.

Os métodos hidrométricos clássicos são eficazes para medir a velocidade média em seções transversais; porém, são inadequados para representar um escoamento com as características do rio Piabanha. Tendo em vista que ensaios com traçadores fluorescentes fornecem velocidades médias para trechos pré-determinados, seus resultados podem auxiliar na calibração de um modelo hidrodinâmico unidimensional (SILVA, 2013).

### Uso de traçadores para simular o transporte de um contaminante solúvel

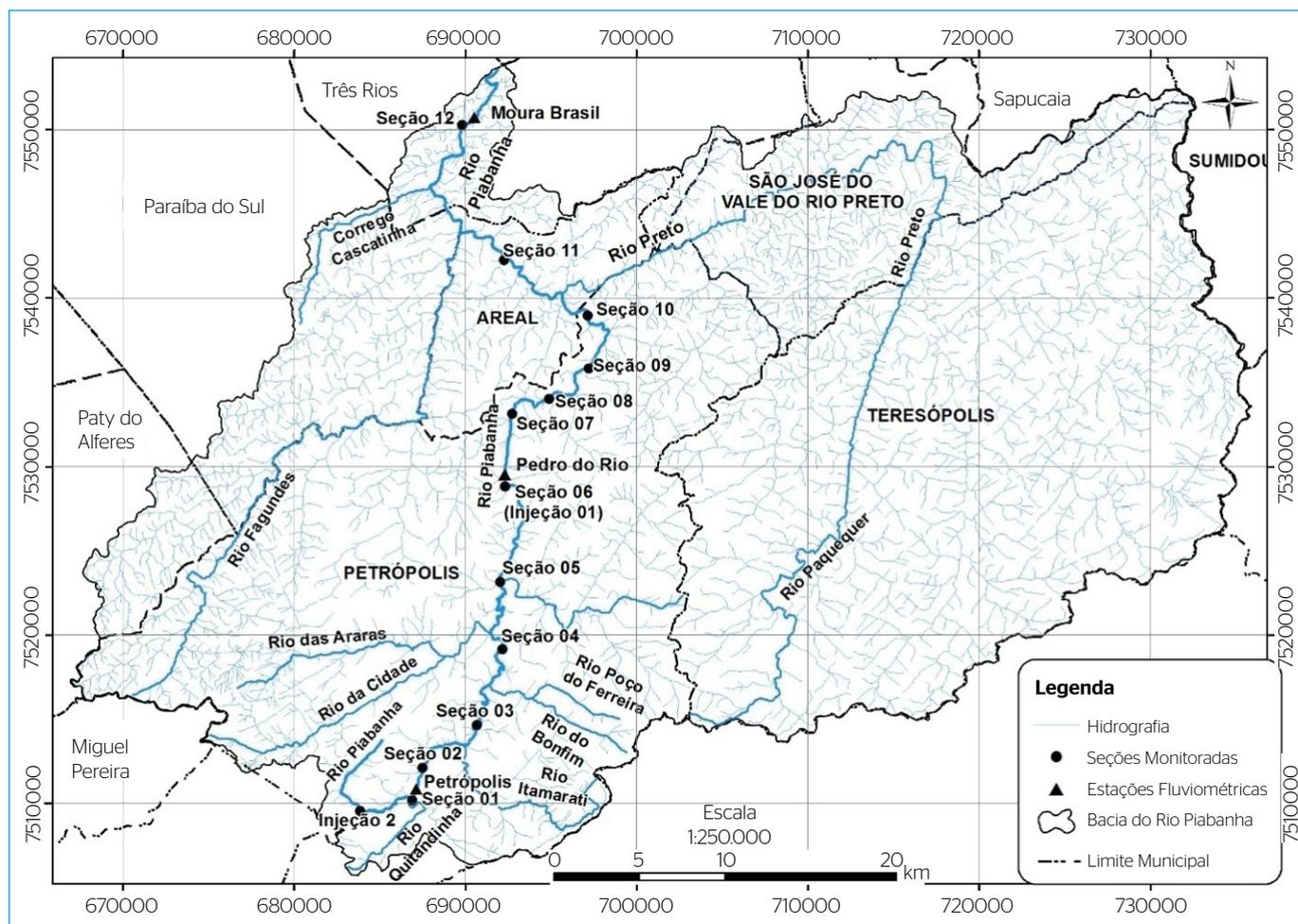
O uso do método de traçadores fluorescentes requer que algumas hipóteses sejam satisfeitas (ROSSO, 1986; GIORI; PECLY; AZEVEDO, 2013):

- escoamento deve apresentar regime permanente;

- inexistência de contribuições laterais e de tomadas de água significativas no trecho estudado;
- o traçador fluorescente deve ser conservativo durante o trecho estudado; e
- mistura completa do traçador com o corpo hídrico.

O processo de mistura do traçador com o corpo hídrico depende de suas características hidráulicas. Ao ser lançado no corpo hídrico, o traçador sofre um processo de mistura — associado à turbulência do escoamento —, que ocorre simultaneamente nas dimensões: vertical, transversal e longitudinal do escoamento. Esse processo é associado a coeficientes de dispersão vertical, transversal e longitudinal. Esses coeficientes descrevem a capacidade ou o grau de mistura entre o traçador e o corpo hídrico.

Para o caso de aplicação em rios, a mistura é mais rápida na dimensão vertical do que na transversal. A mistura ao longo da longitudinal é um processo mais lento. Para estudar trechos de rios, é usual que os ensaios sejam realizados em seções onde já ocorreu a mistura completa



**Figura 1** - Mapa da bacia do rio Piabanha com a localização das seções de injeção e de monitoramento, das estações fluviométricas e dos municípios abrangidos pela bacia.

ao longo das dimensões vertical e transversal ao escoamento. Nessas seções, observa-se somente a dispersão ao longo da dimensão longitudinal. Assim, é fundamental, para a modelagem unidimensional, a determinação de  $D_L$ .

### Pré-dimensionamento

A visita prévia ao local de estudo forneceu informações para um pré-dimensionamento utilizando informações preliminares de vazão e velocidade do escoamento do ensaio de campo para otimizar fatores relacionados aos custos e a segurança da equipe e dos equipamentos envolvidos. De posse dessas informações, simulou-se o ensaio utilizando a solução analítica da equação de dispersão unidimensional conhecida como equação de Taylor (TAYLOR, 1954), arbitrando-se valores para o coeficiente de dispersão longitudinal.

Essa simulação visou fornecer dados para avaliar a massa de traçador a injetar e o tempo associado à passagem do traçador pelas seções de monitoramento. Assim, informações para dimensionar o número de equipes e sua movimentação, bem como os equipamentos a usar em seções consecutivas de monitoramento, foram adquiridas.

A partir das simulações, optou-se por dividir o rio Piabanha em dois trechos nomeados como trecho superior (entre Petrópolis e Pedro do Rio) e inferior (entre Pedro do Rio e Areal), realizando uma campanha para cada intervalo. Para ambos os trechos foram selecionadas sete seções, cuja localização pode ser vista na Figura 1, sendo uma para injeção e seis para coleta de amostras.

### Trabalho de campo

A campanha teve seu início com o deslocamento das equipes e com a injeção da solução contendo os traçadores fluoescntes Uranina e a Amidorodamina G para fins de comparação de desempenho. A injeção de traçadores foi realizada de forma instantânea, lançando no centro do rio, em local previamente estabelecido, a solução contendo ambos os traçadores. No trecho superior foi injetada de maneira instantânea uma solução de 5 litros de água contendo 100 g de Amidorodamina G e 70 g de Uranina. No trecho inferior, a solução de 5 litros continha 200 g de Amidorodamina G e 120 g de Uranina.

Após a injeção, as equipes de monitoramento coletaram as amostras de água do rio nas seções de monitoramento a jusante em intervalos regulares de tempo. Nas seções mais próximas aos pontos de injeção dos traçadores fluoescntes, foram coletadas amostras em duas verticais para verificar a hipótese de mistura transversal completa.

A Figura 2 mostra um diagrama unifilar com informações das contribuições laterais e das distâncias entre as seções de monitoramento e os pontos de injeção de traçador fluoescnte.

A Tabela 1 reúne informações sobre os pontos de injeção e sobre as seções de monitoramento nos trechos superior e inferior do rio Piabanha.

Para avaliar o grau de mistura ao longo da transversal, nas seções próximas ao ponto de injeção, foram coletadas amostras em dois pontos, neste trabalho sendo denominado vertical. Uma vertical foi definida entre o centro de escoamento e a margem direita e outra entre o centro do escoamento e a margem esquerda. Foram coletadas 50 amostras em cada vertical, de

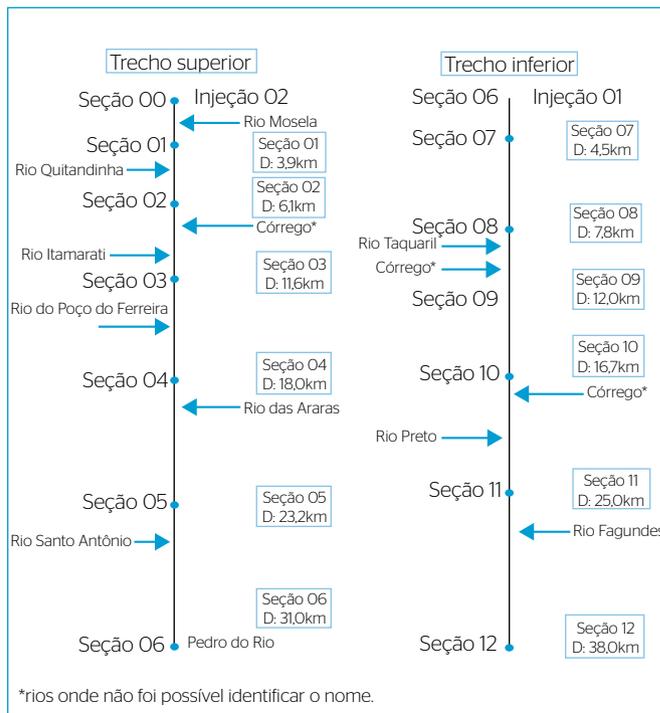


Figura 2 - Diagrama unifilar das seções estudadas do rio Piabanha. Algumas contribuições laterais foram identificadas como Córrego\*, pois não se obteve seus respectivos nomes.

Tabela 1 - Informações sobre as seções de injeção e de monitoramento.

Seções	Distância (km)*	nº de verticais	nº de amostras	Intervalo de amostragem (min)
Injeção 02	0,0	-	-	-
Seção 01	3,9	2	100	2,5
Seção 02	6,1	2	100	5,0
Seção 03	11,6	1	50	10,0
Seção 04	18,0	1	50	10,0
Seção 05	23,2	1	50	10,0
Seção 06	31,0	-	-	-
Injeção 01	0,0	-	-	-
Seção 07	4,5	2	100	5,0
Seção 08	7,8	2	100	5,0
Seção 09	12,0	1	50	5,0
Seção 10	18,0	1	50	5,0
Seção 11	25,0	1	50	10,0
Seção 12	38,0	-	-	-

\*Distância em relação ao ponto correspondente de injeção de traçadores fluoescntes.

modo a obter uma boa representação da curva de passagem do traçador. Assim, para as seções com duas verticais, foram obtidas 100 amostras.

A análise das amostras coletadas em campo foi realizada no Laboratório de Traçadores do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) por meio de um espectrofluorímetro. Os dados relativos às amostras analisadas foram usados para construir curvas de passagem (que descrevem a concentração de traçador em função do tempo) e permitiram calcular alguns parâmetros do escoamento:

- a vazão líquida;
- o tempo de trânsito;
- a velocidade média do escoamento; e
- o coeficiente de dispersão longitudinal.

## Determinação de Parâmetros do Escoamento

### Vazão líquida

A vazão líquida (Q) foi determinada a partir da curva de passagem dos traçadores fluorescentes, utilizando a Equação 1 (KILPATRICK & COBB, 1985)

$$Q = \frac{M}{\int_0^{T_D} C(t) dt} \quad (1)$$

onde:

Q = vazão líquida, m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>;

M = massa de traçador injetada, g;

C = concentração do traçador, g.m<sup>-3</sup>.

### Tempo de trânsito

O tempo de trânsito  $\bar{t}$  (HUBBARD *et al.*, 1982) é definido pela diferença entre os tempos associados aos centróides de duas curvas de distribuição temporal observadas em seções de monitoramento.

### Velocidade média

A velocidade média (U) é calculada a partir da distância entre seções de monitoramento e o tempo de trânsito como indicado na Equação 2

$$U = \frac{x}{\bar{t}} \quad (2)$$

onde:

U = velocidade média, m.s<sup>-1</sup>;

x = distância entre as seções de monitoramento, m;

$\bar{t}$  = diferença entre os tempos associados aos centróides das duas curvas de distribuição temporal C(t), s.

### Coeficiente de dispersão longitudinal

O coeficiente de dispersão longitudinal ( $D_L$ ) foi obtido como resultado do ajuste da equação de Taylor (Equação 3) à curva de passagem (curva de concentração versus tempo)

$$C(x, t) = \frac{M}{A \cdot \sqrt{4 \cdot D_L \cdot t}} \exp \left[ -\frac{(x - U \cdot t)^2}{4 \cdot D_L \cdot t} \right] \quad (3)$$

Onde:

A = área da seção transversal, m<sup>2</sup>;

C = concentração de traçador, g.m<sup>-3</sup>;

$D_L$  = coeficiente de dispersão longitudinal;

M = massa de traçador injetada, g;

t = tempo, s;

( $\bar{t}$ ) = tempo de trânsito, s;

U = velocidade média, m.s<sup>-1</sup>;

x = distância, m.

É importante observar que, na Equação 3, x é a distância entre o local de injeção e a seção medida enquanto U é a velocidade média entre o local de injeção e a seção medida.

## Modelagem hidrodinâmica e de transporte de massa

### Modelo hidrodinâmico

A modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha foi realizada usando o modelo computacional *Hydrologic Engineers Center - River Analysis System versão 4.1* (HEC-RAS 4.1), disponível livremente, cujo objetivo foi reproduzir as condições de escoamento (permanente) unidimensional encontradas durante o trabalho de campo com o uso de traçadores fluorescentes. O procedimento computacional utilizado para o regime permanente é baseado na solução da equação unidimensional de energia, no cálculo das perdas de carga e da capacidade de condução de água, calculada pela equação de Manning (BRUNNER, 2010).

Assim, na modelagem, é necessário fornecer ao HEC-RAS dados de geometria, isto é, seções transversais e suas respectivas elevações, distâncias entre as seções de jusante e montante, os coeficientes de Manning, de contração e expansão, as vazões líquidas e uma condição de contorno, que para o presente estudo, foi a cota do nível d'água da seção mais a jusante.

As seções transversais utilizadas na modelagem foram obtidas por meio de levantamentos topobatimétricos, com o auxílio de uma estação total e prismas.

As vazões foram adicionadas ao longo do rio principal, por meio de junções, fornecendo, assim, para cada trecho do rio principal, os valores das vazões líquidas determinadas na campanha com o uso de traçadores fluorescentes em cada seção do estudo. Isso representou o

acréscimo da vazão do rio principal graças às contribuições laterais de seus afluentes.

Os valores para os coeficientes de Manning foram baseados em Chow (1973), levando em conta observações *in situ* dos diversos trechos do rio.

Uma revisão da literatura indica que modelo HEC-RAS foi usado em um grande número de casos, incluindo problemas relacionados à modelagem de qualidade da água em regiões com influência de marés (CHIHHAO FAN; CHUN-HAN KO; WEI-SHEN WANG, 2009), à modelagem hidrológica e interação entre águas superficiais e subterrneas (RODRIGUEZ *et al.*, 2008) e a estudos sobre o desempenho do modelo quando comparado a dados de inundações reais (PAPPENBERGER *et al.*, 2005).

### Modelo de transporte de massa

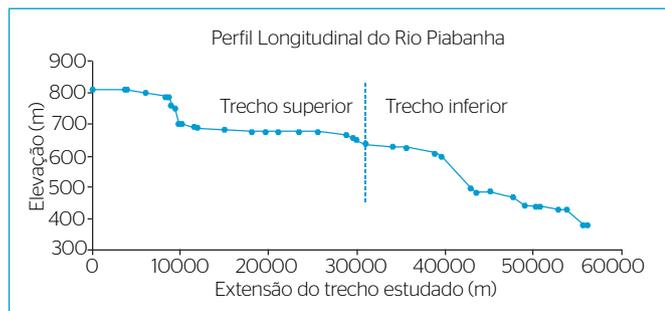
A modelagem do transporte de massa foi pelo modelo analítico de Taylor, que possibilitou determinar o coeficiente de dispersão de cada trecho do escoamento e estimar a concentração de poluente solúvel em seções transversais não coincidentes com aquelas onde foram monitoradas as concentrações por meio do ensaio com traçadores.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Descrição de características morfológicas do Rio Piabanha

A partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE), criou-se um perfil longitudinal (Figura 3) para o trecho estudado, entre a confluência dos rios Avelá-Leman e Piabanha, no município de Petrópolis, e uma seção a cerca de 200 metros a montante do reservatório da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Piabanha, no município de Areal. O perfil longitudinal foi obtido a partir de curvas de nível de 10 em 10 metros e pontos cotados da bacia do rio Piabanha obtidos com o Instituto Estadual do Ambiente (INEA).

Com o auxílio de informações sobre o perfil longitudinal do rio Piabanha, uma visita de campo foi realizada para documentar características morfológicas e a qualidade da água do rio e para compreender



**Figura 3** - Perfil longitudinal do trecho do rio Piabanha estudado com traçadores.

qualitativamente a hidrodinâmica. Foram encontrados sinais de degradação de qualidade de água e mudanças na calha do rio Piabanha desde os primeiros trechos visitados.

Alguns dos pontos visitados foram escolhidos por serem pontos comuns aos pontos de injeção e às seções de monitoramento dos ensaios de campo, realizados entre os dias 20 e 22 de março de 2012. Grande parte dos pontos visitados foram usados na modelagem hidrodinâmica do rio Piabanha pelo modelo HEC-RAS 4.1.

### Traçadores Fluorescentes

Para cada um dos dois trechos (superior e inferior), foi realizado um ensaio de campo com traçadores fluorescentes.

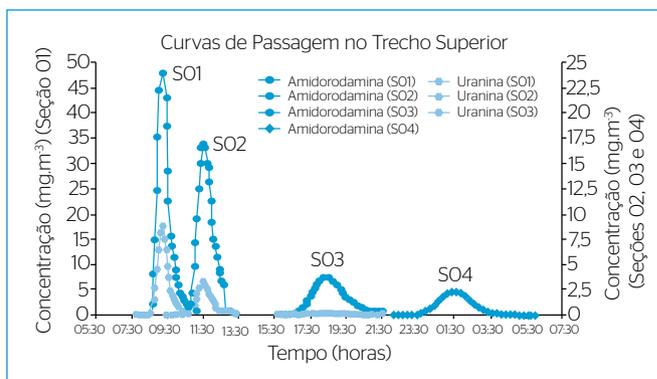
#### Trecho Superior

As curvas de passagem de traçadores fluorescentes pelas seções de monitoramento do trecho superior do rio Piabanha são apresentadas na Figura 4, com identificação das seções próxima a sua respectiva curva.

Na tarde do dia 22 de março de 2012, ocorreu uma forte precipitação que aumentou a vazão e a velocidade do rio Piabanha, invalidando o pré-dimensionamento do ensaio. Adicionalmente, após a análise das amostras coletadas na Seção 05, constatou-se (como esperado) que a onda de cheia no curso do rio Piabanha provocou diluição adicional dos traçadores fluorescentes e inviabilizou a coleta de amostras na Seção 06.

A análise das curvas de passagem na Figura 4 também indica que a massa de Uranina foi subdimensionada e que houve degradação desse traçador no trecho estudado. Na Seção 04, a curva de passagem da Uranina foi totalmente perdida, devido à sua concentração ter alcançado valores próximos ao limite de detecção instrumental.

A relação entre as áreas das curvas de passagem nas duas verticais das Seções 01 e 02, para os 2 traçadores fluorescentes usados, é aproximadamente unitária. Embora a coleta em duas verticais não seja uma condição suficiente para garantir a mistura transversal, as condições de forte turbulência e a distância longitudinal muito maior do que a largura do rio evidenciam a ocorrência de mistura transversal completa.



**Figura 4** - Curvas de passagem dos traçadores fluorescentes para as Seções 01, 02, 03 e 04 durante o dia 22 de março de 2012.

Adicionalmente, a relação entre as concentrações de Uranina e de Amidorodamina G diminui ao longo das seções de monitoramento possivelmente por dois motivos:

1. Nesse trecho, o rio possui uma pequena lamina d'água, acentuando o foto-decaimento da Uranina.
2. Nesse trecho, o rio Piabanha possui muitas contribuições diretas de esgoto, provocando perda de massa da Uranina por ação biológica.

A partir das curvas de passagem observadas, calculou-se a vazão líquida, o tempo de trânsito, a velocidade média do trecho e o coeficiente de dispersão. Os valores  $D_L$  foram determinados pelo ajuste das curvas de passagem definidas pela equação de Taylor aos valores de concentração monitorados. Os resultados obtidos para o trecho superior do rio Piabanha encontram-se na Tabela 2.

Para a Seção 04, a vazão não foi determinada pois, devido à forte precipitação, a hipótese básica de escoamento em regime permanente no decorrer do ensaio não foi satisfeita. Entretanto, foi obtida uma estimativa da velocidade média e do tempo de trânsito embora influenciados pela forte precipitação que se iniciou horas antes da coleta das amostras.

A partir da Tabela 2, pode-se perceber que há divergência nos valores obtidos para a vazão, a partir da Equação 2, quando calculados pela curva de passagem da Uranina e da Amidorodamina G devido à perda de massa da Uranina. Os diferentes valores de vazão não afetam as estimativas de tempo de trânsito, que são dependentes apenas da distribuição temporal da curva de passagem de traçador.

### Trecho Inferior

A injeção instantânea de traçadores fluorescentes foi feita na Seção 06, sob a ponte principal de Pedro do Rio. A Figura 5 apresenta as curvas de passagem de traçadores fluorescentes pelas seções de monitoramento do trecho inferior.

A relação entre as áreas das curvas de passagem nas duas verticais das Seções 07 e 08, para os dois traçadores fluorescentes usados, é

aproximadamente igual a 1. Assim como no trecho superior, a relação entre as concentrações de Uranina e de Amidorodamina G diminui ao longo das seções de monitoramento principalmente devido à perda de massa de Uranina sensível à presença de matéria orgânica.

Os parâmetros calculados a partir das curvas de passagem estão apresentados na Tabela 3.

A partir da Tabela 3, pode-se perceber que há divergência nos valores obtidos para a vazão, a partir da Equação 2, quando calculada pela curva de passagem da Amidorodamina G e pela curva de passagem da Uranina. Assim, tal como para o trecho superior, os diferentes valores de vazão não afetam as estimativas de tempo de trânsito, que são dependentes apenas da distribuição temporal da curva de passagem de traçador.

Os valores de  $D_L$  são típicos de rios de pequeno porte, como o caso do Piabanha. Tanto no trecho superior como no inferior, os valores de  $D_L$  aumentam com a distância e são coerentes com a ideia de espalhamento do traçador ao longo do espaço e do tempo. Valores mais elevados indicam que o traçador mistura-se em um trecho maior do

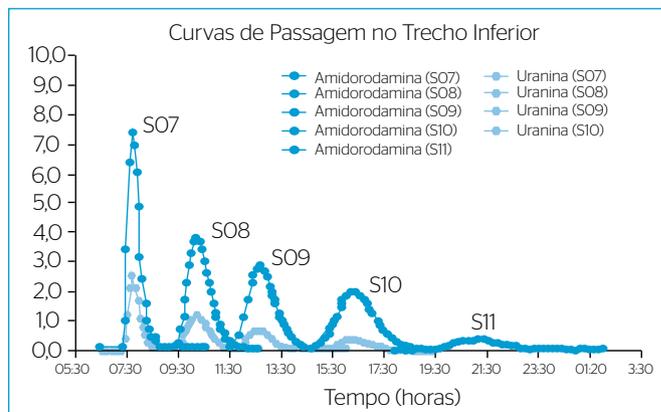


Figura 5 - Curvas de passagem dos traçadores fluorescentes nas Seções 07, 08, 09, 10 e 11 durante o dia 20 de março de 2012.

Tabela 2 - Resultados de vazão, tempo de trânsito, velocidade média e coeficiente de dispersão obtidos para as seções do trecho superior, em 22 de março de 2012.

Parâmetro (unidade)	Campanha no trecho superior				
	Traçador	Seção 01	Seção 02	Seção 03	Seção 04
Vazão (m³.s⁻¹)	Amidorodamina	0,750	1,630	3,440	-
	Uranina	1,520	6,190	36,900	-
Tempo de Trânsito (horas)	Amidorodamina	3,870	6,200	13,100	17,400
	Uranina	3,830	6,130	13,500	-
Velocidade Média (m.s⁻¹)	Amidorodamina	0,280	0,262	0,221	0,412
	Uranina	0,282	0,266	0,208	-
Coeficiente de dispersão (m².s⁻¹)	Amidorodamina	3,950	4,200	6,530	-
	Uranina	3,550	3,230	7,800	-

Tabela 3 - Resultados de vazão, tempo de trânsito, velocidade média e coeficiente de dispersão obtidos para as seções do trecho inferior, em 20 de março de 2012.

Parâmetro (unidade)	Campanha no trecho inferior					
	Traçador	Seção 07	Seção 08	Seção 09	Seção 10	Seção 11
Vazão (m³.s⁻¹)	Amidorodamina	13,100	13,200	14,300	14,800	39,700
	Uranina	22,600	24,400	32,500	43,600	-
Tempo de Trânsito (horas)	Amidorodamina	2,380	4,900	7,330	11,000	15,800
	Uranina	2,400	4,890	7,360	11,000	-
Velocidade Média (m.s⁻¹)	Amidorodamina	0,525	0,363	0,481	0,452	0,375
	Uranina	0,521	0,368	0,473	0,455	-
Coeficiente de dispersão (m².s⁻¹)	Amidorodamina	13,400	14,700	15,700	20,200	26,500
	Uranina	14,000	14,800	15,500	22,000	-

rio com o passar do tempo. Esses resultados representam uma contribuição para outros estudos relacionados ao transporte e dispersão de contaminantes no rio Piabanha.

As vazões médias históricas para a seção em Pedro do Rio nos meses de março e abril são de 15 e 12 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, respectivamente. Esses valores sugerem que a vazão determinada a partir da Amidorodamina G está consistente e, assim como no trecho superior do rio Piabanha, as vazões obtidas pela curva de passagem da Uranina foram superestimadas.

Não foi possível calcular o coeficiente de dispersão para o traçador fluorescente Uranina na Seção 11 porque sua concentração alcançou valores próximos ao limite de detecção do aparelho de leitura. Na Seção 12 não foram coletadas amostras pois, como há um reservatório entre as Seções 11 e 12, haveria uma demora expressiva e diluição adicional do traçador no volume do reservatório antes da chegada do traçador na Seção 12.

## MODELOS COMPUTACIONAIS

### Modelo hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico HEC-RAS 4.1 foi utilizado para modelar um trecho de aproximadamente 56 km do rio Piabanha, compreendido entre os municípios de Petrópolis e Areal, em regime permanente, para simular o cenário do dia em que foi realizado o ensaio de campo com o uso de traçadores fluorescentes.

Para se modelar a hidrodinâmica do rio Piabanha, foi necessário alimentar o modelo com dados de geometria e hidráulicos. Esses dados foram obtidos por meio de levantamentos topobatimétricos de seções transversais e dados obtidos nos ensaios de campo com traçadores fluorescentes, respectivamente.

Considerando a perda de massa do traçador Uranina, os valores de entrada para o modelo hidrodinâmico foram obtidos a partir dos dados de Amidorodamina. Os dados de vazão líquida foram obtidos com a Equação 1.

Após a execução, o modelo gera dados de profundidade e velocidade médias. Os dados de velocidade média gerados pelo modelo e obtidos nos ensaios de campo com traçadores podem, então, ser comparados.

Através de um procedimento iterativo, os valores de declividade da linha d'água e coeficiente de Manning são ajustados de modo a produzir boa concordância entre os valores de velocidade medidos (com uso de traçador) e os calculados (com uso do modelo).

Um resumo mostrando a distância entre seções, os dados hidráulicos obtidos pelo ensaio com traçadores fluorescentes (vazão líquida e velocidade média) e os resultados calculados pelo modelo (profundidade e velocidade média) estão apresentados na Tabela 4.

Como observado na Tabela 4, os valores de velocidade média obtidos pelo modelo hidrodinâmico HEC-RAS se mostraram concordantes

com os determinados pelo método do uso de traçadores. Esses resultados são considerados bons, levando em conta a aplicação da metodologia a um trecho de rio com geometria altamente irregular onde é difícil a aplicação de métodos de medida clássicos.

A profundidade fornecida pelo modelo hidrodinâmico para cada seção foi considerada consistente, levando-se em consideração o que foi observado nas campanhas de levantamento topobatimétrico e em observações feitas durante os trabalhos de campo com traçadores.

### Modelo Analítico de Taylor

O modelo analítico de Taylor, representado pela Equação 3, foi utilizado para determinar  $D_L$  em trechos do rio Piabanha por um processo iterativo: o analista altera o valor de  $D_L$  até que a curva analítica produzida seja considerada bem ajustada à curva de passagem da nuvem de traçador. Contudo, as seções de monitoramento S05 e S06 sofreram com o aumento do volume de água na calha principal do rio Piabanha, impedindo monitorar a evolução na nuvem de traçador fluorescente nas mesmas.

Nas Seções 05 e 06 a equação de Taylor também foi empregada para prever as curvas de concentração *versus* tempo do traçador fluorescentes Amidorodamina G utilizando-se um coeficiente de dispersão determinado para o trecho da Seção 04. De modo similar, as curvas de passagem podem simular a concentração de um poluente solúvel, a partir de um despejo acidental ou intencional, em seções não monitoradas.

**Tabela 4** – Dados de entrada do modelo e velocidades médias obtidas por meio do *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System* e do ensaio com os traçadores fluorescentes.

Seções	Distância ao ponto de injeção (km)*	Vazão (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )*	Profundidade (m)**	Velocidade média (m.s <sup>-1</sup> )	
				HEC-RAS**	Traçadores***
Injeção 02	-	0,75	0,20	-	-
Seção 01	3,90	0,75	0,30	0,28	0,28
Seção 02	6,10	1,65	0,30	0,30	0,26
Seção 03	11,60	3,40	0,70	0,23	0,22
Seção 04	18,00	3,40	0,90	0,42	0,41
Seção 05	23,20	6,90	1,50	0,41	-
Seção 06	31,00	13,50	2,10	0,47	-
Injeção 01	-	13,50	2,10	0,47	-
Seção 07	4,50	13,50	2,60	0,53	0,53
Seção 08	7,80	13,50	2,30	0,37	0,36
Seção 09	12,00	13,50	2,00	0,47	0,48
Seção 10	16,70	13,50	1,50	0,36	0,45
Seção 11	25,00	40,00	4,50	0,48	0,37

\*dados fornecidos ao modelo computacional; \*\*dados gerados pelo modelo computacional; \*\*\*dados obtidos a partir das curvas de passagem do traçador Amidorodamina.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trecho estudado possui geometria irregular apresentando trechos com pequenos e com acentuados declives, calhas com expansão e contração de largura, leito pouco uniforme e alguns trechos com rochas graúdas. A geometria complexa e o aumento de vazão ao longo do trecho estudado foram observados a partir das visitas a campo, do Modelo Digital de Elevação e dos ensaios de campo com o uso de traçadores fluorescentes. A velocidade média da seção transversal estimada a partir de métodos hidrométricos clássicos pode não ser representativa de um trecho, especialmente em escoamentos com geometria muito variada e grandes variações de declividade. A técnica com o uso de traçadores fluorescentes mostrou-se adequada para calibração de modelos hidrodinâmicos no rio Piabanha, pois fornece valores médios de velocidade para os trechos estudados.

As campanhas com o uso de traçadores fluorescentes foram realizadas neste estudo em condições hidrológicas de vazões “altas-médias”, isto é, no final do período caracterizado como de vazões altas. Sendo assim, as condições de transporte e dispersão encontradas, neste trabalho, para situações de despejos acidentais de poluentes solúveis no rio Piabanha representam as condições típicas nesse período.

O traçador Uranina, devido às perdas de massa, foi menos eficiente do que a Amidorodamina G para a determinação experimental dos parâmetros de transporte e dispersão.

Observou-se que, no trecho superior do rio Piabanha, nas seções de monitoramento S01 e S02, a concentração de traçador atingiu valores muito altos, conforme apresentado na Figura 4. Isto ocorreu devido ao baixo volume de água encontrado no rio Piabanha nesse trecho. De modo similar, um despejo acidental de poluentes solúveis no intervalo não seria facilmente diluído, tornando assim esse trecho do rio extremamente poluído.

O uso de traçadores fluorescentes possibilitou quantificar a vazão do rio Piabanha, que na Seção 00 foi de aproximadamente  $0,75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e, por consequência das vazões incrementais dos afluentes, teve sua vazão

aumentada para  $13,50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  na Seção 06, em Pedro do Rio. No trecho inferior do rio Piabanha, as vazões incrementais são insignificantes até a Seção 10. A jusante de S10, o maior afluente do rio Piabanha, o rio Preto, deságua em sua margem direita, elevando assim a vazão líquida do rio Piabanha para o valor de  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Assim como em muitas outras bacias, existem poucas informações geométricas e hidráulicas para o rio Piabanha. No sítio HidroWeb são encontradas apenas cinco estações fluviais com registros de dados de vazão em toda a extensão do rio Piabanha. É necessário contar com um monitoramento da vazão mais intensivo, tendo em vista que o rio Piabanha tem inúmeros afluentes que, por vezes, possuem vazões próximas ou superiores à do próprio rio principal.

Outro problema encontrado foi a falta de dados de geometria de seções transversais no rio Piabanha, tendo em vista sua importância para realização de modelagens hidrodinâmicas. Assim, foram realizados levantamentos de 10 seções topobatimétricas. Apesar dos bons resultados obtidos com a modelagem hidrodinâmica, salienta-se a necessidade de uma maior quantidade de seções com levantamentos topobatimétricos, graças à grande irregularidade da geometria do rio Piabanha.

Os resultados obtidos por meio dos traçadores fluorescentes foram utilizados para calibrar o modelo hidrodinâmico HEC-RAS 4.1 para as condições hidráulicas presentes na data em que foi realizado o ensaio de campo com traçadores fluorescentes.

O uso da técnica de traçadores fluorescentes em rios naturais mostrou-se uma ferramenta muito útil para auxiliar estudos e modelagens hidrodinâmicas em rios com geometria complexa onde as técnicas de medida convencionais são de difícil aplicação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão de bolsa de mestrado utilizada na elaboração deste estudo.

## REFERÊNCIAS

- BROER, G.J.A.A. (1991) Alarm system for accidental pollution on the river Rhine. In: van de Yen, F.H.M.; Gutknecht, D.; Loucks, d.p.; Salewicz, k.a. (Eds.) *Hydrology for the Water Management of Large River Basin*. IAHS Publication nº 201. p. 329-336.
- BRUNNER, G.W. (2010) *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*, Report Number CPD-69. Davis: US Army Corps of Engineers, p. 417.
- BÜGE, TR. (1990) *Modelo matemático para simulação de transporte e dispersão de poluentes em rios: aplicação ao estudo de lançamento acidental no rio Paraíba do Sul (Rio de Janeiro)*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- CHIHHAO, F.A.N.; CHUN-HAN, K.O.; WEI-SHEN, W. (2009) An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation. *Journal of Environmental Management*, v. 90, n. 5, p. 1824-1832. doi:10.1016/j.jenvman.2008.11.011.
- CHOW, V.T. (1973) *Open-Channel Hydraulics*. International Edition. Singapore: McGraw-Hill Book.
- FUNDAÇÃO COORDENAÇÃO DE PROJETOS, PESQUISAS E ESTUDOS TECNOLÓGICOS – COPPETEC (2007) *Plano de recursos hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul - Resumo*. Relatório Contratual R-10. AGEVAP.

- COPPETEC-COPPE-UFRJ. Projeto EIBEIX-I: Estudos Integrados de bacias experimentais - parametrização hidrológica na gestão de recursos hídricos das bacias da região serrana do Rio de Janeiro. In: *Relatório Técnico Parcial 2, Chamada Pública MCT/FINEP/CT-HIDRO - Bacias Representativas 04/2005*. Elaborado conjuntamente pela fundação COPPETEC-COPPE-UFRJ com colaboração do IGEO-UFRJ-UERJ-CPRM-SERLA (INEA), 2010. Disponível em: [http://www.hidro.ufrj.br/images/labh2o/projetos/Relatorio\\_2\\_EIBEX-I\\_FINEP\\_mar\\_2010.pdf](http://www.hidro.ufrj.br/images/labh2o/projetos/Relatorio_2_EIBEX-I_FINEP_mar_2010.pdf). Acesso em: 15 mar. 2015.
- DUARTE, A.A.L.S.; BOAVENTURA, R.A.R. (2008) Dispersion modelling in rivers for water sources protection, based on tracer experiments. Case studies. In: *2nd International Conference on Waste Management, Water Pollution, Air Pollution, Indoor Climate*, Corfu, Greece, October.
- GIORI, J.Z.; PECLY, J.O.G.; AZEVEDO, J.P.S. (2013) Análise dos Efeitos de despejos acidentais de poluentes no rio Guandu usando traçadores fluorescentes. In: *XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Bento Gonçalves, RS, Novembro, 2013.
- HUBBARD, L.A.; KILPATRICK, F.A.; MARTENS, L.A.; WILSON, J. F. (1982) Measurement of time of travel and dispersion in streams by dye tracing. In: *Techniques of Water Resources Investigations of the U. S. Geological Survey*, Book 3: Applications of Hydraulics, Washington, 1982.
- INSTITUTO ECOTEMA. (2004) *Plano de Manejo da APA Petrópolis*. Documento Final Interno Revisado (Atividade 8 do Contrato nº 4530202362, de 22/07/04, entre a CEG RIO e o INSTITUTO ECOTEMA). Petrópolis, Rio de Janeiro, 2004.
- JAMES, A. (1984) *An Introduction to Water Quality Modelling*. Nova York: John Wiley and Sons.
- KILPATRICK, F.A. & COBB, E.D. (1985) Measurement of discharge using tracers. In: *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*, Book 3, Chapter A16.
- KLING, A.S.M. (2005) Aplicação do Método Battelle na avaliação do impacto ambiental na Bacia Hidrográfica do rio Piabanha. Dissertação (Mestrado) - Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca, Rio de Janeiro.
- LIMA, C.A.A.; GIORGETTI, M.F. (1997) Aplicação do modelo Qual2E na simulação de descargas acidentais contaminantes. In: *19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Foz do Iguaçu. *Anais eletrônicos*: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo. ABES, p. 2534-2545.
- MACHADO, B.M.; FURLAN, L.T.; FURLAN, M.L.; TOMAZ, E.; NUNHEZ, J.R. (2008) Software para modelagem de dispersão de efluentes em rios. *Revista Engenharia Sanitária Ambiental*, v. 13, n. 3, p. 291-297.
- MCAVOY, D.C.; MASSCHELEYN, P.; PENG, C.; MORRALL, S.W.; CASILLA, A.B.; LIM, J.M.U.; GREGORIO, E.G. (2003) Risk assessment approach for untreated wastewater using the QUAL2E water quality model. *Chemosphere*, v. 52, n. 1, p. 55-66. [http://dx.doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00270-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00270-4).
- OKUBO, A. (1968) *A new set of oceanic diffusion diagrams*. Technical report 38. Chesapeake Bay Institute, The Johns Hopkins University. 47 p.
- PAPPENBERGER, F.; BEVEN, K.; HORRITT, M.; BLAZKOVA, S. (2005) Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *Journal of Hydrology*, v. 302, n. 1-4, p. 46-69. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.06.036.
- PAULA, T.P. (2011) Diagnóstico e modelagem matemática da qualidade da água em trecho do rio Piabanha/RJ. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- RODRIGUEZ, L.B.; CELLO, P.A.; VIONNET, C.A.; GOODRICH, D. (2008) Fully conservative coupling of HEC-RAS with MODFLOW to simulate stream-aquifer interactions in a drainage basin. *Journal of Hydrology*, v. 353, n. 1-2, p. 129-142. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.02.002.
- ROLDÃO, J.S.F.; PECLY, J.O.G.; TRENTO, A. (1996) Determinação de coeficientes de dispersão mediante traçadores fluorescentes na laguna Setubal (Argentina). In: *Anais do XVII Congresso Latino americano de Hidráulica (IAHR)*, Quayaquil, Equador, v. 1, p. 57-68, Outubro de 1996.
- ROSSO, T.C.A. (1986) Determinação do coeficiente de dispersão em rios, através de traçadores radioativos e fluorescentes. Tese (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SAMUELS, W.; AMSTUTZ, D.; BAHADUR, R.; PICKUS, J. (2006) RiverSpill: A national application for drinking water protection. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 132, n. 4, p. 393-403.
- SCHNOOR, J.L. (1996) *Environmental modelling fate and transport of pollutant in water, air and soil*. John Wiley and Sons.
- SILVA, L.L.; DONNICI, C.L.; AYALA, J.D.; FREITAS, C.H.; MOREIRA, R.M.; PINTO, A.M.F. (2009) Traçadores: o uso de agentes químicos para estudos hidrológicos, ambientais, petroquímicos e biológicos. *Química Nova*, v. 32, n. 6, p. 1576-1585.
- SILVA, P.V.R.M. (2013) Uso de traçadores fluorescentes para determinar características de transporte e dispersão no rio Piabanha/RJ. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- TAYLOR, G. (1954) The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe. *Proceedings of The Royal Society of London*, Series A223, p. 446-468.