

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ALGUNS ASPECTOS SOBRE O USO DE TRAÇADORES ARTIFICIAIS EM HIDROLOGIA PARA DETERMINAR PARÂMETROS DE TRANSPORTE DE ESCALARES

Luis Carlos Soares da Silva Junior¹ & José Otávio Goulart Pecly²

RESUMO – A determinação de parâmetros de transporte de escalares possui desafios por conta da complexidade da natureza dos corpos d'água. O uso de traçadores em hidrologia se apresentam como uma técnica conveniente para aplicações onde metodologias convencionais não sejam adequadas. O presente trabalho apresenta alguns aspectos sobre o uso de traçadores em hidrologia para obtenção de parâmetros de transporte de escalares em rios. Foram apresentadas as simplificações utilizadas para a obtenção de uma solução analítica unidimensional que represente o comportamento de traçadores em corpos hídricos. Há diversas metodologias existentes para a determinação dos parâmetros de transporte e o trata-se de tema frequentemente estudado.

ABSTRACT– The determination of transport parameters for scalars are challenging due the complexity of water bodies nature. The use of tracers in hydrology represent an appropriate technique when conventional methodologies are not suitable. The present paper exposes some aspects about the use of tracers in hydrology to obtain transport parameters of scalars in rivers. In the text are described simplifications utilized to achieve a one-dimensional analytic solution that better represents the behavior of tracers. In conclusion, several methodologies have been found to determine the transport parameters and it seems that the topic is in regular discussion.

Palavras-Chave – Traçadores em hidrologia, medição de vazão, transporte advectivo-difusivo

1) Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ. Avenida Athos da Silveira Ramos, 149, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, CEP: 21941-909; email: luis.junior@coc.ufrj.br

2) Programa de Engenharia Oceânica – COPPE/UFRJ, Avenida Athos da Silveira Ramos, 149, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, CEP: 21941-909 email: otavio@acd.ufrj.br

INTRODUÇÃO

Define-se como traçador qualquer substância ou produto que incorporado à massa de outra substância permite estudar seu comportamento em relação a um determinado processo físico ou químico (Bedmar, 1972).

O uso de traçadores em hidrologia se dá, por exemplo, quando, o fluxo em um rio é muito rápido, com pouca profundidade, onde a seção é de difícil determinação ou se a água está transportando materiais que podem danificar o medidor (International Atomic Energy Agency, 1983). De acordo com Leibundgut *et al.* (2009), traçadores em hidrologia são aplicados principalmente para:

- determinação quantitativa de propriedades de escoamento como velocidade da água, condutividade hidráulica, dispersão, porosidade, tempo de trânsito, volume de água e vazão líquida;
- calibração ou validação de modelos numéricos de vazão e transporte de escalares.

A estimativa de valores dos parâmetros de experimentos com traçadores só é possível com o uso de um modelo matemático adequado: o modelo selecionado deve refletir o transporte e o comportamento do traçador em um sistema estudado.

Para selecionar o tipo de traçador a utilizar para realizar um dado experimento deve-se, primeiramente, conhecer os traçadores disponíveis para aplicação em hidrologia. A Tabela 1 apresenta uma classificação dos principais tipos de traçadores de acordo com suas características.

Tabela 1 - Classificação de traçadores ambientais e artificiais

Traçadores disponíveis				
Traçadores naturais		Traçadores artificiais		
Isótopos ambientais		Radioativos	Inativos	
Estáveis		Trítio ^3H	Substância solúveis	Substâncias flutuantes
Deutério ^2H		Sódio-24 ^{24}Na	Sais	Licopodiosporos
Oxigênio-18 ^{18}O		Crômio-51 ^{51}Cr	$\text{Na}^+ \text{Cl}^-$	Fluorescentes
Carbono-13 ^{13}C		Colbato-58 ^{58}Co	$\text{K}^+ \text{Cl}^-$	Bactérias
Hélio-3 ^3H		Bromo-82 ^{82}Br	$\text{Li}^+ \text{Cl}^-$	Vírus
Enxofre-34 ^{34}S		Iodo-131 ^{131}I	HBO	Fungos
		Ouro-198 ^{198}Au		
Radioativos		Ativáveis	Traçadores fluorescentes	
Trítio ^3H		Bromo	Uranina	Especial
Carbono-14 ^{14}C		Índio	Eosina	Magnéticos
Silício-32 ^{32}Si		Manganês	Amidorodamina	
Cloro ^{36}Cl		Lantânio	Rodamina	
Argônio-37 ^{37}Ar		Disprósio	Naftionato	
Crípton-81 ^{81}Kr			Piranina	
Crípton-85 ^{85}Kr			Tinopalo	
Freon			Flavina	
Componentes químicos				
Condutividade $\mu\text{S/cm}$				
Sódio Na				
Outros Si, etc				
Traçadores de poluição	Exemplos: Cloretos, metais pesados, detergentes, substâncias radioativas, FCKW, ^{222}Rn , etc.			

Fonte: Adaptado de Külls, 2015.

Os traçadores artificiais mostram-se vantajosos por serem mais baratos e de utilização mais simples. Külls (2015) afirma que traçadores artificiais ideais são eficientes, conservativos, estáveis, ambientalmente amigáveis e baratos. É importante realçar que traçadores artificiais devem possuir as seguintes propriedades:

- boa solubilidade em água;
- baixa adsorção;
- apresentar característica conservativa
- baixa sensibilidade à luz;
- pequena dependência do pH;
- intensidade de fluorescência com baixa dependência da temperatura;
- baixa ecotoxicidade;
- baixo custo.

Após escolhido o traçador para realização do ensaio de campo, deve-se introduzir o traçador no corpo hídrico para avaliar a sua diluição no tempo e no espaço. Existem dois métodos para introduzir os traçadores no meio estudado: injeção instantânea e injeção contínua. Tais métodos diferem no modo de aplicação, porém ambos são baseados na medida de concentração de traçadores numa seção a jusante do ponto de injeção (International Atomic Energy Agency, 1983).

O presente trabalho apresenta alguns aspectos sobre modelagem utilização de traçadores em hidrologia para obtenção de parâmetros de transporte de escalares em rios, tais como velocidade, vazão, coeficiente de dispersão e tempo de trânsito característico.

METODOLOGIA

Para iniciar a conceituação discute-se o uso de traçadores em aplicações hidrológicas através de suas funções estímulo e resposta (relações de *input* e *output*), além das diferentes respostas do corpo receptor em função do tipo de traçador utilizado.

Após consolidados os princípios da aplicação, são apresentadas algumas equações governantes que são a base do processo de quantificação de parâmetros de transporte. As aplicações, e suas respectivas simplificações, são divididas de acordo com as suas dimensões: tridimensional, bidimensional e unidimensional.

Por fim, são apresentadas as soluções básicas da equação unidimensional (Taylor, 1953) já conhecidas para estimar os parâmetros de transporte em rios.

ASPECTOS SOBRE A MODELAGEM DO TRANSPORTE DE ESCALARES

O aspecto conceitual que norteia a medição com traçadores é criar um estímulo no corpo d'água a ser estudado (injeção do traçador) e analisar como esse estímulo se comporta após uma série de processos que ocorreram ao longo do trajeto percorrido, assim como esquematizado na Figura 1.



Figura 1 - Esquema estímulo-resposta do uso de traçadores em hidrologia

O uso de traçadores em hidrologia pode considerar três tipos de função de estímulo, são essas as injeções instantânea, contínua e a não-uniforme. As primeiras são utilizadas quando há uma aplicação de forma intencional, como injeção de traçadores artificiais, como por exemplo os fluorescentes. O tipo não uniforme, se dá nos casos de traçadores ambientais onde não há controle da injeção, portanto as concentrações variam no tempo e espaço sem uma função definida. A Figura 2 apresenta o diagrama que correlaciona como se comportam as funções de estímulo através da função resposta.

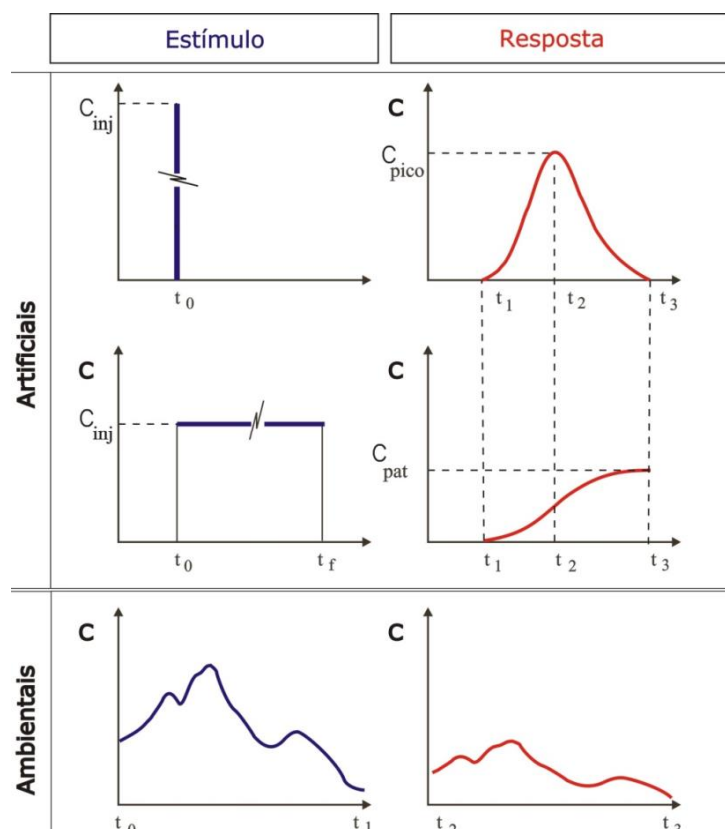


Figura 2 - Diagrama de funções de estímulo e respectiva resposta de traçadores em recursos hídricos (acima, injeção instantânea, ao centro, injeção contínua e abaixo, injeção não uniforme) (Fonte: Roldão, 2016).

Abordagem tridimensional

A relação entre as funções de estímulo e resposta podem ser expressas segundo equações matemáticas que descrevem o comportamento das partículas de traçador se movendo e se dispersando ao longo do curso do corpo d'água (Bear, 1961; Scheidegger, 1961). Essa modelagem matemática é expressa pela equação (1) e transporte advectivo-difusivo tridimensional para escoamento permanente e esquematizado na Figura 3.

$$D_{xx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_{yy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_{zz} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

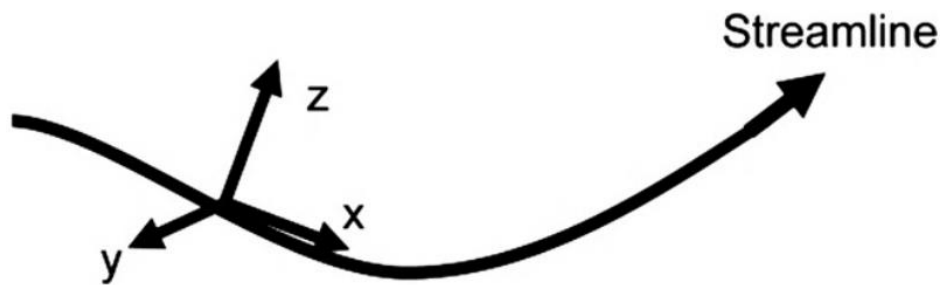


Figura 3 - Representação do sistemas de coordenadas com X tangente ao sentido do escoamento (Fonte: Leibundgut et al., 2009).

Para o caso de ensaio em águas subterrâneas, em um aquífero homogêneo, o traçador é verticalmente bem misturado no poço de injeção e o gradiente de concentração vertical é zero (2).

$$\frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Abordagem bidimensional

Assumindo que o eixo X é paralelo a direção do escoamento, a difusão molecular é desprezível, e a aplicação se dá em corpos d'água de pouca profundidade, a equação de transporte pode ser reduzida a forma bidimensional, como na equação (3) de transporte advectivo-difusivo bidimensional e esquematizado na.

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + -v \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3)$$

Onde: D_L representa a dispersão longitudinal e D_T a dispersão transversal e v a velocidade

Abordagem unidimensional

Em alguns casos, a dispersão transversal pode ser desconsiderada. Em um rio, por exemplo, o traçador se comporta unidimensionalmente após a distância de boa mistura. A distância de boa mistura é aquela na qual a concentração de um constituinte é uniforme ao longo da largura de um canal, ou seja, o gradiente de concentração do traçador no eixo Y é zero (4).

$$\frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

Para tal, a equação de transporte advectivo-difusivo pode ser reduzida a forma unidimensional, considerando o eixo X paralelo a direção do escoamento, como na equação (5) de transporte advectivo-difusivo unidimensional.

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (5)$$

A modelagem da solução das equações se dá assumindo a hipótese de que a injeção da massa M do traçador no corpo d'água se dá de maneira instantânea como um pulso, dado o tempo do ensaio, portanto, $T_{inj} \approx 0$, o que é, matematicamente descrito pela função Delta de Dirac $\delta(t)$.

Para a equação de transporte unidimensional aplicam-se as seguintes condições iniciais (6) e (7) e de contorno (8):

$$C(x = 0, t) = \frac{M}{Q} \delta(t) \quad (6)$$

$$C(x, t = 0) = 0 \quad (7)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} C(x, t) = 0 \quad (8)$$

Onde M é a massa de traçador injetado e Q é a vazão que passa através da coluna d'água. Essas condições assumem que o traçador é injetado no curso d'água no ponto $x=0$ e que o traçador está homogeneamente misturado na seção analisada. Similarmente ao que foi proposto por Taylor (1953) e, posteriormente adaptado por Kreft e Zuber (1978) a solução analítica (9) para a equação de transporte advectivo-difusivo unidimensional (5).

$$C(x, t) = \frac{M}{Q} \frac{x}{\sqrt{4\pi D_L t^3}} e^{-\frac{(x-vt)^2}{4D_L t}} \quad (9)$$

A partir de um ensaio de campo, o ajuste dessa solução analítica aos dados da curva de passagem permite obter o coeficiente de dispersão no trecho estudado. A partir da curva de passagem medida, também podem ser estimados os valores de tempo médio de trânsito, velocidade média no trecho e vazão líquida (Silva et al., 2017).

De acordo com Rigo (1992), há diversas maneiras de quantificar o coeficiente de dispersão longitudinal de um canal. Dentre as diferentes maneiras, há (i) as fórmulas empíricas, como as de:

Mcquivey e Keefer (1974), Fischer (1975), Liu (1977) e Petersen (1977); (ii) os métodos analíticos, entre os quais, pode-se citar os métodos de: Fischer (1967) e Jain (1976); e (iii) os métodos com uso de traçador, como por exemplo: o método de variação dos momentos, ajuste com uma solução da equação de dispersão unidimensional e métodos de convolução.

Leibundgut *et al.* (2009) indicam três metodologias para estimar os parâmetros de transporte: o método dos mínimos quadrados combinados, método dos momentos e o método da curva cumulativa. Barbosa Júnior *et al* (2005) analisaram cinco diferentes métodos: método dos momentos, método da propagação, método de Chatwin, método do pico de concentração (MPC) e método da coroa de concentração (MCC). Devens *et al* (2006) aplicou a técnica de regressão linear múltipla na qual uma equação simples que relaciona o coeficiente com as características geométricas e hidrodinâmicas do escoamento.

A partir dos modelos apresentados, é possível estudar resultados obtidos com a aplicação de traçadores nos mais diversos corpos d'água de forma a determinar parâmetros hidráulicos importantes para gestão de recursos hídricos, tais como velocidade, vazão, tempo de trânsito e coeficiente de dispersão. Em adição, modelos analíticos permitem obter parâmetros que servem de subsídio para a modelagem numérica de contaminantes miscíveis em água, tais como esgotos, despejos industriais, líquidos vazados em acidentes rodoviários, entre outros.

Alguns exemplos práticos de aplicação da técnica de traçadores evidenciam sua relevância para o estudo e gestão de recursos hídricos: simulação de despejos acidentais na bacia do rio Guandu/RJ (Giori, 2011), estudo de impacto de um emissário submarino industrial no ES (Barbosa, 2012), determinação de características de transporte e dispersão no rio Piabanha/RJ (Silva, 2013), entre outros diversos estudos realizados pelo Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ.

CONCLUSÃO

Foram apresentados alguns aspectos sobre o uso de traçadores em hidrologia e alguns aspectos relativos à modelagem e determinação dos parâmetros de transporte em rios. O uso de traçadores em hidrologia requer, entretanto, equipamentos e pessoal especializado.

A técnica de traçadores se mostra adequada ao disponibilizar diversas ferramentas para obtenção de parâmetros hidráulicos úteis aos comitês de bacia hidrográfica, órgãos ambientais e tomadores de decisão visando a gestão dos recursos hídricos.

Os parâmetros hidráulicos obtidos a partir de campanhas *in situ* representam uma garantia prática para validar diagnósticos e assim habilitando modelos a criarem prognósticos mais realistas. Podem ainda apresentar elementos que facilitem o entendimento científico sobre a hidrodinâmica de bacias e corpos d'água.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor contou com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, F.R. (2012). “*Modelagem computacional do campo de diluição de emissários submarinos com suporte de técnicas de traçadores e sensoriamento remoto*”. 236 p. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BARBOSA JUNIOR, A.R.; SILVA, G.Q.; NEVES, B.V.B.; DEVENS, J.A. (2005). “*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.

BEAR, J. (1961). “*On the tensor form of dispersion in porous media*”. Journal of Geophysical Research, 66, 1185–1197.

BEDMAR, P.A. (1972). *Isótopos em Hidrologia*, Ed. Allambra, Barcelona.

DEVENS, J.A.; BARBOSA JUNIOR, A.R.; SILVA, G.Q. (2006). “*Modelo de quantificação do coeficiente de dispersão longitudinal de pequenos cursos de água naturais*”. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental. v. 11, n. 3, p. 269-276.

GIORI, J.Z. (2011). “*Análise dos Efeitos de Despejos Acidentais de Poluentes em Corpos Hídricos usando Traçadores Fluorescentes - Estudo do Caso: Bacia do rio Guandu/RJ*”. 118 p. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (1983) *Guidebook on nuclear techniques in hydrology*. Technical reports series No. 91. Viena.

KREFT, A.; ZUBER, A. (1978). “*On the physical meaning of the dispersion equation and its solutions for different initial and boundary conditions*”. Chemical Engineering Science, 33, 1471–1480.

KÜLLS, C. (2015) *Tracers in Hydrology*. Notas de aula da Lübeck University of Applied Sciences.

LEIBUNDGUT, C.; MALOSZEWSKI, P.; KÜLLS, C. (2009) *Tracers in Hydrology*. Ed. John Wiley & Sons. Cingapura.

RIGO, D. (1992). “*Dispersão longitudinal em rios: desempenho de métodos de previsão e de traçadores fluorescentes*”. 156 p. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ROLDÃO, J.S.F.; PECLY, J.O.G. (2015). *Traçadores em Hidrologia*, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil PEC/COPPE/UFRJ, Apostila do curso COC 717 – Laboratório de Traçadores.

SCHEIDEGGER, A.E. (1961). “*General theory of dispersion in porous media*”. Journal of Geophysical Research, 66, 3273–3278.

SILVA, P.V.R.M. (2013). “*Uso de traçadores fluorescentes para determinar características de transporte e dispersão no rio Piabanha/RJ*”. 173 p. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SILVA, P.V.M.; PECLY, J.O.G.; AZEVEDO, J.P.S. (2017). “*Use of dye tracers to determine transport and dispersion parameters in Piabanha River (RJ) for its quali-quantitative modeling with HEC-RAS*”. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental. 22(3), pp. 463 – 472. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017150187>.