

TESTES SIMPLES DE TRAÇADORES PARA APLICAÇÃO EM ÁREAS CONTAMINADAS

Murilo Guimarães Balle¹; Otávio Barbosa Ferreira²; Alexandre Muselli Barbosa³, Tatiana Luiz dos Santos Tavares⁴; Camila Camolesi Guimarães⁵; Letícia dos Santos Macedo⁶

Resumo – O presente estudo objetiva analisar o comportamento da interação de traçadores e solos na investigação de áreas contaminadas, para: caracterizar o comportamento do aquífero; determinar as velocidades de fluxo da água subterrânea; e estudar o comportamento dos contaminantes em subsuperfície. Como escolher os traçadores? Como estabelecer o arranjo dos testes de bancada e campo? Atualmente o teste com traçadores é uma técnica bem estabelecida na caracterização do sistema hidrogeológico, necessitando previamente um conhecimento do regime hidráulico para evitar falhas de teste, como a perda do traçador, por exemplo. Percebe-se que este tipo de ferramenta é pouco utilizada na investigação de áreas contaminadas, porém os resultados podem auxiliar no estabelecimento de um modelo conceitual mais confiável, assim como na calibração dos modelos computacionais de transporte e particionamento dos contaminantes.

Abstract – The present study aims to analyze the interaction behavior of dyes and soils in the investigation of contaminated sites, to: characterize the behavior of the aquifer; determine the groundwater flow velocities; and to study the behavior of subsurface contaminants. How to choose tracers? How to establish the arrangement of laboratory and field tests? At present, the test is a type of technique with a series of characterization of the hydrogeological system, requiring an alert of the type of error, such as dye loss, for example. It can be observed that this type of tool is less used in the investigation of contaminated areas, however, the results can help in more reliable conceptual model, as well as the calibration of the computational models of transport and fate of contaminants.

Palavras-Chave – Traçadores; caracterização; fluxo de águas subterrâneas; hidrogeologia.

¹ Estudante de Eng. Ambiental, Universidade Federal do ABC, (11) 3767-4251, balle@ipt.br

² Estudante de Geologia, Universidade de São Paulo, otavio.barbosa.ferreira@usp.br

³ Eng. Agrônomo, Me., Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, muselli@ipt.br

⁴ Geóloga, Dra., Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, ttavares@ipt.br

⁵ Gestora Ambiental, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, camilacg@ipt.br

⁶ Tecgº Saneamento Ambiental, Ma., Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, leticiasm@ipt.br

1. INTRODUÇÃO

O estudo da utilização de traçadores para avaliação do comportamento de corpos d'água teve início no final do século XIX, sendo o primeiro guia para utilização de traçadores artificiais em hidrogeologia lançado em 1988 (MEUS, 2015). Historicamente, os traçadores têm sido utilizados principalmente para o estudo do comportamento e dos fluxos em aquíferos e corpos d'água superficiais, facilitando, por exemplo, a definição de zonas de proteção para captação de água para consumo humano.

A utilização de traçadores para a caracterização de áreas contaminadas apresenta uma maior complexidade, pois se tratam de áreas mais restritas, com fluxos d'água de menor velocidade, maiores interações e interferências do meio, influência de componentes verticais e estratificação e necessidade de consideração de um maior número de parâmetros (MEUS, 2015).

A definição de estratégias de remediação de áreas contaminadas, determinada pela Lei nº 13.577/2009, requer uma boa caracterização do meio físico e dos parâmetros de transporte de contaminantes. O estabelecimento de modelos conceituais robustos perpassa o estudo e caracterização da estrutura do aquífero, com a determinação dos fluxos de água subterrânea e massa de contaminantes. Isso permite focar as estratégias de remediação nos fluxos de massa, ou seja, na massa de contaminantes que se move no meio (SUTHERSAN *et al.*, 2014).

A heterogeneidade dos meios de estudo, muitas vezes, torna difícil a caracterização da subsuperfície pelos meios tradicionais de estudo de áreas contaminadas. Nesse contexto, a utilização de traçadores provê informações necessárias para o desenho e otimização dos sistemas de remediação *in situ* (SUTHERSAN *et al.*, 2014).

2. CARACTERÍSTICAS DOS TRAÇADORES

São conhecidos como traçadores quaisquer substâncias ou partículas/entidades (químicas ou biológicas) que podem ser utilizadas para seguir de forma contínua ou pontual um sistema (DA SILVA, 2009). Os traçadores são largamente utilizados em diversos campos, tais como: medicina, biologia, fisiologia, nutrição, toxicologia, biotecnologia, química, agricultura, geociência e engenharia (MCCURLEY, 1995), hidrogeologia, análise ambiental e caracterização de reservatórios de petróleo.

Para a hidrogeologia, traçadores são substâncias que podem ser detectadas na água em concentrações muito baixas, permitindo o acompanhamento (ou traçado) do fluxo d'água subterrâneo. Compreender o fluxo d'água é fundamental para caracterizar os diferentes mecanismos hidráulicos que regem os sistemas hidrogeológicos (LEIBUNDGUT, 2011), norteando as técnicas de remediação a serem utilizadas.

Traçadores ambientais são aqueles que estão presentes naturalmente no meio estudado, podendo ser naturais (e.g., água deuterada, ^{14}C) ou antropogênicos (e.g., SF_6 , trítio) (SANDFORD, 2011). A análise da presença desses traçadores passivos tem como finalidade a datação de águas subterrâneas/sedimentos lacustres e conexões entre corpos d'água subterrâneos e sua mistura (EVANS, 1983), assim como indicar as ações antrópicas no meio.

Já os traçadores artificiais (e.g., corantes fluorescentes, sais dissolvidos, isótopos radioativos) são aqueles propositalmente adicionados ao sistema. Através deles, parâmetros como dispersão, direção de fluxo, velocidade linear, dinâmica de poluentes e conexão hidráulica subterrânea podem ser definidos (SEILER *et al.*, 1989; EINSIEDL, 2005; MORALES *et al.*, 2007; BUZÁDY *et al.*, 2006; IMES & FREDRICK, 2002; AMMANN *et al.*, 2003 *apud* JAFARI *et al.*, 2014).

Dentre os traçadores artificiais, os fluorescentes são os mais utilizados na hidrogeologia. Idealmente, os corantes fluorescentes devem apresentar baixo limite de detecção, propriedades não tóxicas, facilidade de manipulação, boa relação custo-benefício (OTZ *et al.*, 2004), resistência à degradação química, física e biológica, alta solubilidade em água e pouca ou nenhuma interação (*i.e.*, adsorção, troca iônica) com o meio onde é inserido (OBA e POULSON, 2012). São

compostos alifáticos de cadeia longa ou aromáticos com 10 a 30 átomos de carbono, o que está intimamente ligado ao fenômeno da fluorescência que é observado nesses compostos, porém também é responsável pela predisposição à adsorção e pelos processos de degradação dos traçadores (GOMBERT, 2017). A análise da fluorescência é realizada através de um espectrofluorímetro, que a quantifica. Essa técnica prevê limites de detecção e custos de análise muito baixos (DA SILVA, 2009).

Na Tabela 1 são apresentados os traçadores mais comumente utilizados em investigações hidrogeológicas, que foram considerados para utilização nesse estudo.

Tabela 1. Principais características dos traçadores (Adaptado de SMART e LAIDLAW, 1997).

Nome	Índice de cor	λ Excitação (nm)	λ Emissão (nm)
FluoresceínaSódica	45 350	492	515
Eosina	45 220	535	552
Piranina	59040	455	515
Rodamina B	45 170	554	578
Rodamina WT	-	558	582
Sulforodamina B	45 100	565	590
Rodamina 6G	45 160	525	555
Ácido Amino-G	-	245	445

Os testes qualitativos apenas se baseiam na presença ou ausência de traçador nos pontos de coleta. Já os testes quantitativos com traçadores fluorescentes são mais complexos e necessitam de maior resolução analítica para se obter valores de concentração. É de suma importância que se conheça a dinâmica da fluorescência (indo do valor de *background* ao pico e do pico de volta ao valor de *background*). Da representação gráfica dos dados (fluorescência / concentração x tempo), tem-se uma curva que é frequentemente chamada de *breakthrough curve* (BTC) (Figura 1).

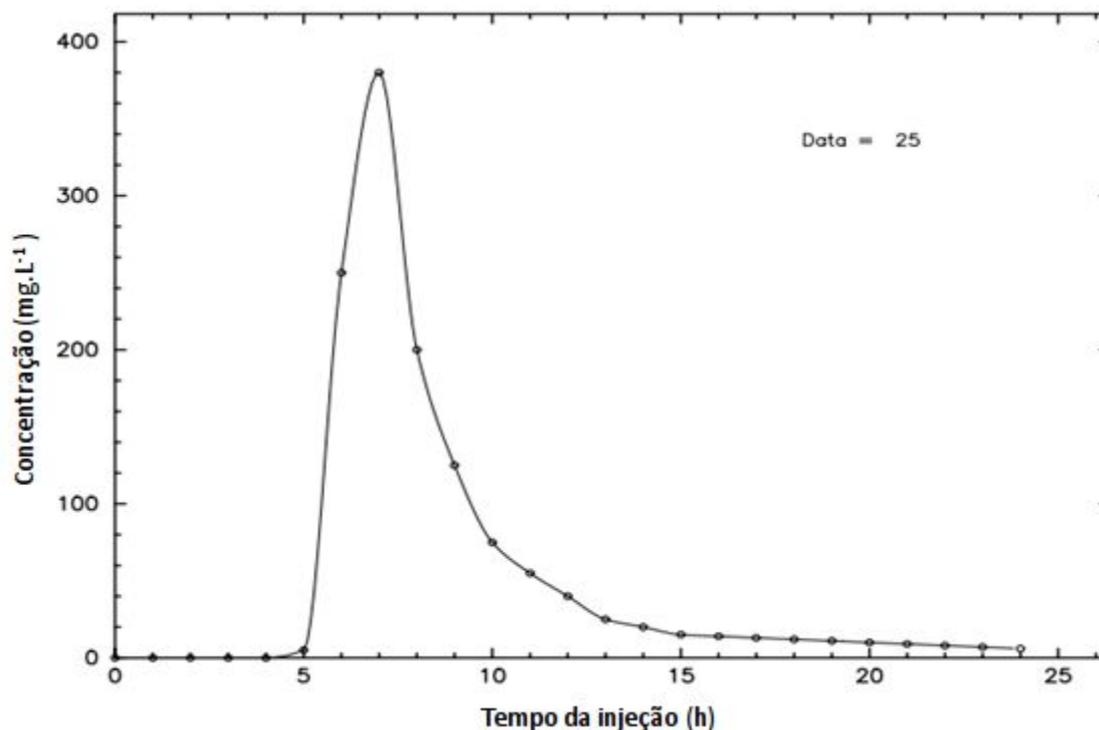


Figura 1. *Breakthrough curve* de recuperação de um traçador (Adaptado de USEPA, 2002).

Os principais benefícios da obtenção da *breakthrough curve* são: (1) a observação do aumento e diminuição da fluorescência no ponto de amostragem aumenta a confiança do teste em relação à

certeza que a fluorescência medida é proveniente do traçador injetado e não de qualquer outra fonte anômala; (2) a velocidade do fluxo da água subterrânea pode ser feita de forma mais precisa utilizando o tempo necessário para o pico da concentração e; (3) a avaliação do formato da curva, bem como a integração da dinâmica da concentração pelo tempo, podem servir de base para o cálculo de parâmetros hidráulicos. Porém, para a obtenção de uma curva confiável, muitas amostras precisam ser coletadas. Dessa forma, torna-se necessário que um bom plano de amostragem seja realizado.

Em relação aos efeitos toxicológicos e ecotoxicológicos desse tipo de traçador, estudos realizados pela USEPA e por CARRÉ *et al.* (2007) mostram que eles são negligíveis em sua maioria para os traçadores como a uranina, sulforodamina B e naftenato, mesmo quando testados a uma concentração cinquenta vezes maior à da água recuperada nos poços de observação (GOMBERT, 2017). No mesmo trabalho de CARRÉ *et al.*, o uso de rodamina B, rodamina WT e rodamina 6G é desaconselhado em estudos em campo devido ao seu moderado risco ecotoxicológico. A toxicidade de outros traçadores fluorescentes (e.g. ácido amino-G, eosina) ainda deve ser avaliada (GOMBERT, 2017).

Atualmente, o teste com traçadores é uma técnica bem estabelecida na caracterização do sistema hidrogeológico, necessitando previamente um conhecimento do regime hidráulico para evitar falhas de teste, como a perda do traçador, por exemplo. Os resultados podem auxiliar no estabelecimento de um modelo conceitual mais confiável assim como a calibração dos modelos computacionais de transporte e particionamento dos contaminantes.

O objetivo deste trabalho é analisar, para uma determinada área contaminada, quais os melhores traçadores a serem utilizados em testes clássicos de traçadores (bancada e campo) para: caracterização do comportamento do aquífero; determinação das velocidades de fluxo da água subterrânea; e estudo do comportamento dos contaminantes em subsuperfície. Para tanto, o comportamento da interação dos traçadores e dos solos serão avaliados inicialmente por meio de ensaios de bancada e, posteriormente, por meio de testes simples de campo, no solo não contaminado e contaminado.

3. CARACTERÍSTICAS DO SOLO QUE INFLUENCIAM NA APLICAÇÃO DOS TRAÇADORES

Diversas características do solo e da água subterrânea podem afetar o coeficiente de retardamento (R) dos traçadores fluorescentes. O coeficiente R é a razão entre a velocidade do fluxo da água e a velocidade do traçador. Um valor de $R = 1$ indica um traçador perfeito, que tem a mesma velocidade que o fluxo da água, enquanto um $R > 1$ indica que o traçador tem uma velocidade menor do que o fluxo (OBA E POULSON, 2012). O valor de R pode ser calculado usando:

$$R = 1 + (K_d \times [\rho_{\text{bulk}}/\Phi]) \quad (1)$$

Onde K_d é o coeficiente de partição, ρ_{bulk} é a densidade aparente e Φ a porosidade. Por sua vez, o coeficiente K_d está relacionado a outras variáveis, como o coeficiente de sorção entre água e octanol (K_{ow}) e o coeficiente de sorção entre água e matéria orgânica (K_{om}). O efeito do pH da água subterrânea sobre os coeficientes K_{ow} e K_{om} foram estudados por OBA E POULSON (2012) para fluoresceína sódica e eosina Y. Os autores concluem que em $\text{pH} \geq 7$, os dois traçadores apresentam um comportamento quase ideal, com $R \leq 1,04$. Entretanto, para os dois traçadores analisados, esse comportamento diminuiu bastante em $\text{pH} < 7$.

Outros fatores físicos e químicos como temperatura, incidência de luz solar, biodegradação, adsorção em diferentes tipos de solo e matéria orgânica e sólidos suspensos têm efeito na fluorescência apresentada pelos traçadores (SMART E LAIDLAW, 1997).

A presença de ácido húmico e fúlvico também pode diminuir a fluorescência de alguns traçadores, como rodamina B e rodamina 6G. Para a caracterização de áreas contaminadas, deve-se ter

atenção com o tipo de contaminante, já que o mesmo também pode interagir com o traçador escolhido. Por exemplo, hidrocarbonetos podem adsorver a maioria dos traçadores fluorescentes, como também aumentar ou diminuir sua fluorescência, já que os mesmos também são fluorescentes quando excitados com uma fonte de certos comprimentos de onda (HAFUKA *et al.*, 2015).

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

A área de estudo foi utilizada como usina de tratamento de madeiras, entre os anos de 1977 a 1997, para produção e tratamento de dormentes. Após esse período, as atividades foram gradativamente encerradas e em 2003, a usina foi totalmente desativada, com o desmonte dos tanques de armazenagem de preservantes. Possui área total de 15.338 m², com 2.532 m² de área construída.

Para o tratamento dos dormentes, arseniato de cobre cromatado (CCA) e creosoto eram os principais preservantes adicionados às madeiras na época. Não havia sistema de tratamento de efluentes, porém as sobras de preservantes eram reutilizadas no processo. Apesar disso, derramamentos acidentais desses produtos no solo eram comuns durante a operação, como, por exemplo, ao retirar os dormentes das autoclaves e secagem das mesmas em áreas sem impermeabilização.

Sabe-se que os contaminantes presentes na área advindos do creosoto podem causar interferência nas análises de fluorescência, desta forma, todos os testes serão executados inicialmente na parte não contaminada do terreno, para estabelecer o *background* da área. E assim, posteriormente, avaliar o solo contaminado.

4.1. Caracterização geológica-geotécnica

A caracterização do perfil geológico-geotécnico da área de interesse foi realizada através de sondagem de 14 poços. A partir desses dados, foram determinadas as camadas de interesse, bem como o arranjo dos poços a serem instalados para a realização dos testes com os traçadores. Nas sondagens realizadas, as seguintes camadas foram identificadas (Figura 2):

- Aterro (Camada A): compostos predominantemente por material argilo-arenoso de coloração vermelha e marrom, grande presença de restos de construção civil superficialmente, com camada argilosa subjacente, plástica e pegajosa;
- Camada argila orgânica (Camada B): compreende uma camada argilosa com grande quantidade de matéria orgânica e restos de vegetais, plástica e com diversos canais decorrentes da degradação dos restos orgânicos;
- Sedimentos arenosos a areno-argilosos (Camada C): consiste em sequência de sedimentos arenosos de granulometria fina a média, podendo ocorrer ou não contribuições argilosas, com limite inferior errático ao longo da área;
- Sedimentos arenosos (Camada D): sequência de materiais de deposição selecionados, com granulometrias distintas, variando de areia média a grossa, com camadas bem definidas;
- Sedimentos arenosos a areno-argilosos (Camada E): consiste em sequência de sedimentos areno-argilosos de granulometria fina a média com granocrescência descendente e redução da presença de argila, indo de areia média a grossa.

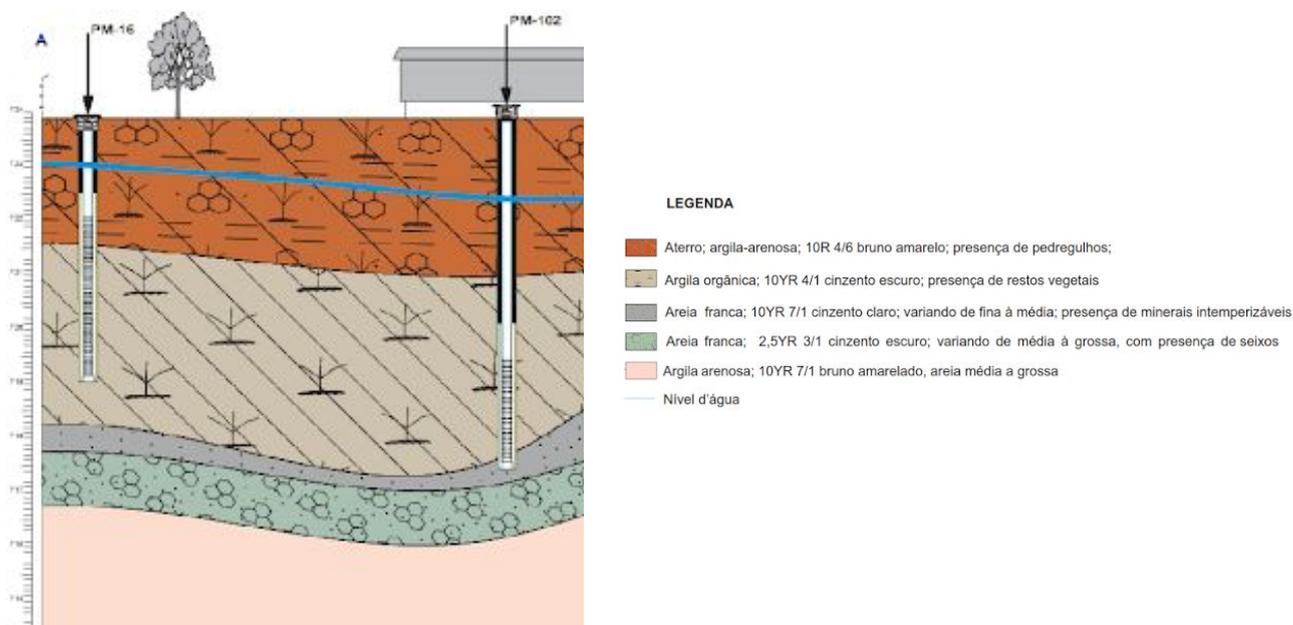


Figura 2. Perfil geológico-geotécnico da área

As camadas avaliadas como de interesse para este trabalho são A, B e C, que compõe as primeiras camadas, e onde serão instalados os pontos de amostragem para o estudo do comportamento dos traçadores. Também foram determinadas algumas características de cada camada de interesse e da água subterrânea, apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Principais características dos traçadores

	Camada A	Camada B	Camada C
pH (solo)	5,17	5,59	3,43
Cond.Hidráulica cm/s	1,6E-06	5,73E-05	3,2E-04
Porosidade total	43,9	55,2	43,7
Porosidade efetiva	7,1	7,5	27,5
Granulometria	69,4/26,4/4,2	14,0/2,0/82,0	2,6/0,0/78,0*
Teor MO g/kg	78,22	11,58	7,3
Fração MO g/kg	45,37	6,72	4,23
Cond. elétrica $\mu\text{S}/\text{cm}$	49,00	25,43	16,44

*19,4 % de frações maiores que 2 mm

5. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA INTERAÇÃO TRAÇADORES E SOLOS

Para avaliar o comportamento da interação dos traçadores e dos solos serão realizados ensaios de bancada e testes simples de injeção em campo. Estes testes são descritos a seguir.

5.1. Batch test

Os *batch tests* permitem estimar a massa de soluto sorvida (Equação 1) em um aquífero através da determinação do seu coeficiente de partição ou adsorção (K_d) entre a água e o sólido (Equação 2), a partir do qual será estimado o coeficiente de retardo (R). O termo sorção refere-se ao processo de transferência de massa entre o soluto dissolvido na água e o soluto presente no meio físico poroso (ZHENG, 1990), no qual se assume que uma concentração de equilíbrio entre as fases é atingida.

Estes ensaios consistem em montar frascos com uma solução do soluto de interesse dissolvido em água destilada ($V_{\text{solução}}$) em contato com uma massa do material do aquífero ($m_{\text{sedimentos}}$) durante certo intervalo de tempo e submetido a etapas de agitação. Após o sistema atingir o equilíbrio, é

medida a concentração final na solução (C) para se estimar a massa de soluto sorvida no meio sólido (S). São realizados experimentos para diversas concentrações iniciais (C_0), a fim de se construir uma curva que relacione fase adsorvida e fase dissolvida. O coeficiente de partição corresponderá ao coeficiente angular do ajuste entre C e S , considerando a isoterma linear (Equação 3).

$$S = \frac{(C_0 - C) \times V_{\text{solução}}}{m_{\text{sedimentos}}} \quad (2)$$

$$K_d = \frac{S}{C} \quad (3)$$

$$R = 1 + \left(\frac{\rho_b}{n} \right) \times K_d \quad (4)$$

Onde:

S : Concentração adsorvida [M/M]

C_0 : Concentração inicial da solução [M/L³]

C : Concentração final da solução [M/L³]

$V_{\text{solução}}$: Volume da solução [L³]

$M_{\text{sedimentos}}$: massa de sedimentos [M]

K_d : Coeficiente de partição ou adsorção [L³/M]

R : Coeficiente de retardação

ρ_b : densidade do solo ou sedimentos [M/L³]

n : porosidade

5.2. Ensaio em coluna

O ensaio de coluna consiste na percolação da solução do traçador através do perfil do solo de diâmetro e altura conhecidos. O resultado é a *breakthrough curve* ou curva de concentração relativa (C/C_0).

Os ensaios em coluna serão realizados pelo Método do Permeâmetro de Carga Constante, que serão utilizados de acordo com o tipo de solo a ser analisado, para cada camada de interesse. Com esses ensaios, pretende-se determinar elaborar a *breakthrough curve*, e determinar indiretamente características das camadas do solo analisadas.

5.3. Testes simples de traçadores em campo

As análises em campo serão realizadas por fluorímetros de forma contínua em campo, de modo a se obter uma curva de ruptura consistente. Além disso, serão coletadas amostras para serem analisadas por espectrofluorimetria, de forma que se obtenha uma varredura completa de emissão/excitação em diferentes comprimentos de onda.

A escolha dos traçadores a serem utilizados foi realizada através da avaliação de características como sua adsorção nos tipos de solo encontrados, toxicidade e facilidade de obtenção.

Descartamos o uso dos traçadores Rodamina WT, Rodamina 6G e Rodamina B por apresentarem moderado risco ecotoxicológico por CARRÉ *et al.* (2007), além de serem de difícil obtenção no Brasil. O traçador Eosina Y foi descartado por ser altamente adsorvido em solos argilosos, como relatado por MAGAL *et al.* (2008). Os traçadores sulforodamina B e piranina não foram escolhidos principalmente pela sua difícil obtenção.

Assim, os traçadores escolhidos para esse estudo foram fluoresceína sódica e ácido amino-G, por serem de fácil obtenção, conservativos e não tóxicos, conforme dados apresentados por Smart e Laidlaw (1977). Suas propriedades estão indicadas na Tabela 3.

Tabela 3. Principais características dos traçadores a serem utilizados

	Fluoresceína sódica	Ácido Amino-G
Número CAS	518-47-8	86-65-7
Índice de Cor (IC)	45350	-
Fórmula	$C_{20}H_{10}O_5Na_2$	$C_{10}H_9NO_6S_2$
Peso Molecular (g/mol)	376.15	303.303
Solubilidade em água (g/l)	25	92
Excitação/Emissão (nm)	490/520	245/445

O arranjo dos poços (Figura 3) foi estabelecido a fim de criar um fluxo estacionário por meio do poço de bombeamento e um poço de injeção em fluxo contínuo, para os testes de diluição. Os 3 poços de captura serão locados nas 3 diferentes camadas a uma curta distância (em torno de 3 metros). Em uma segunda fase o bombeamento é paralisado e avalia-se o fluxo natural dos traçadores nas 3 diferentes camadas.

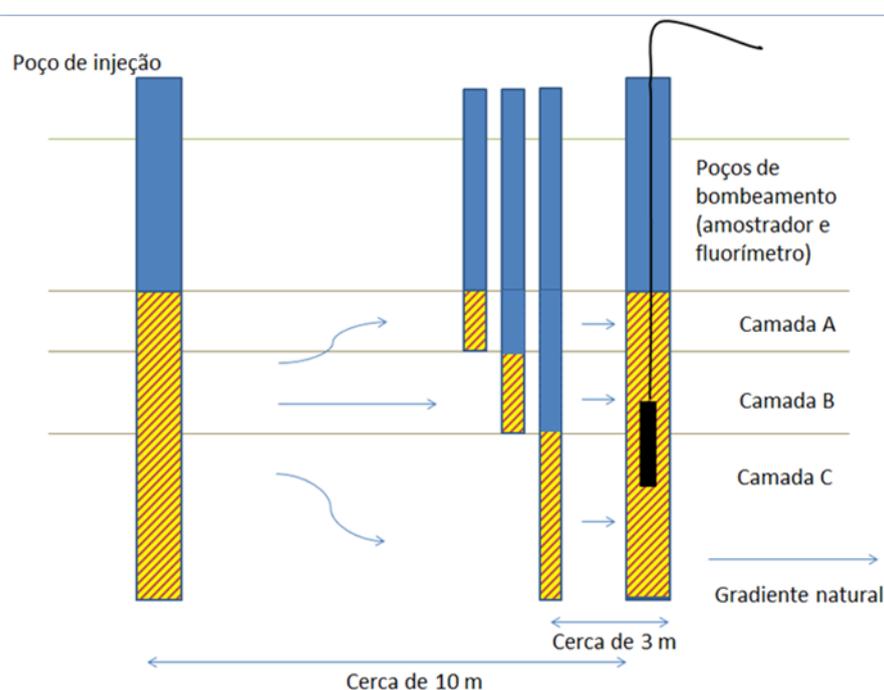


Figura 3. Esquema conceitual do teste em campo

Todos os testes serão realizados com o objetivo de entender o comportamento dos contaminantes e as dificuldades e particularidades operacionais destes testes. Espera-se com este estudo desenvolver um procedimento para execução de testes simples de traçadores em áreas contaminadas, assim como estabelecer critérios para escolha dos traçadores, caracterização hidrogeológica mínima da área, como tratar os dados.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Percebe-se que a utilização de traçadores nos estudos hidrogeológicos exige uma boa caracterização do meio. Os traçadores devem ser escolhidos em função das características do meio, principalmente as que modificam a fluorescência ou ajudam na adsorção e degradação do mesmo. O arranjo dos poços no campo deve levar em consideração, a partir do modelo conceitual prévio, o tipo de teste a ser realizado e as camadas onde ocorrerem fluxo de água/contaminante de diferentes composições. A inserção deste tipo de ferramenta na investigação de áreas contaminadas pode auxiliar no estabelecimento de um modelo conceitual mais confiável assim como na calibração dos modelos computacionais de transporte e particionamento dos contaminantes. Espera-se com este estudo desenvolver um procedimento para execução de testes simples de traçadores em áreas contaminadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IPT e à FIPT pelo apoio financeiro neste projeto de capacitação, e à *European Water Tracing Service* pela parceria para aplicação dos traçadores.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. *Lei nº 13.577, de 08 de julho de 2009*. Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá outras providências correlatas, São Paulo - SP. 2009
- CARRÉ, J., JOYEUX, M., MONTHIEL, A. *Risques sanitaires associés aux traceurs fluorescents utilisés en hydrologie*. Environnement, Risques & Santé – Vol. 6, nº 6, p. 443-452. 2007.
- DA SILVA, L.L., DONICCI, C.L., AYALA, J.D. *Traçadores: O Uso De Agentes Químicos Para Estudos Hidrológicos, Ambientais, Petroquímicos E Biológicos*. Quim. Nova, Vol. 32, No. 6, 1576-1585, 2009.
- GOMBERT, P., BIAUDET, H., DE SEZE, R., PANDARD, P., CARRÉ, J. *Toxicity of fluorescent tracers and their degradation byproducts*. International Journal of Speleology, 46 (1), p. 23-31. 2017.
- JAFARI, F., BALDERER, W.P., JAHANI, H.R., JAVADI, S. *Lab-evaluation of applicability selected hydrogeological tracers in physical/chemical conditions*. Arab J Geosci, Vol. 8, p. 3811–3819. 2015.
- HAFUKA, A., DING, Q., YAMURA, H., YAMADA, K., SATOH, H. *Interactions of dissolved humic substances with oppositely charged fluorescent dyes for tracer techniques*. Water Research, 85, p. 193-198. 2015.
- MAGAL, E., WEINSBROD, N., YAKIREVICH, A., YECHIELI, Y. *The use of fluorescent dyes as tracers in highly saline groundwater*. Journal of Hydrology, 358, p. 124-133. 2008.
- MEUS, P. *Traçages En Milieux Pollués: Mode D 'Emploi Et Applications*. 41 slides. 2015.
- MCCURLEY, J. M. *Radiographics*. , 15, 1243. 1995.
- OBA, Y., POULSON, S. *Octanol-water partition coefficients (K_{ow}) vs. pH for fluorescent dye tracers (fluorescein, eosin Y), and implications for hydrologic tracer tests*. Geochemical Journal, Vol. 46, p. 517-520. 2012.
- SUTHERSAN, S., DIVINE, C., COHEN, E., HEINZE., K. *Tracer Testing: Recommended Best Practice for Design and Optimization of In Situ Remediation Systems*. Groundwater & Remediation 34, no. 3, p 33-40. 2014.
- SMART, P. L., LAIDLAW, I. M. S. *An Evaluation of Some Fluorescent Dyes for Water Tracing*. Water Resources Research, Vol. 13, nº1, p. 15-33. 1977.
- TAZIOLI, A., PALPACELLI, S. *Best tracer selection for hydrogeological investigations: preliminary results from laboratory test*. Italian Journal of Groundwater - AS05021, p. 7–12. 2013.
- ZHENG, C. *MT3D. A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems*. The United States Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma, 163p. 1990.