

Fluxo e descarga de massa de contaminantes em meio saturado através de seções transversais de monitoramento: teoria e aplicações

MASS DISCHARGE AND FLUX OF CONTAMINANTS IN A SATURATED ZONE ACROSS TRANSVERSE MONITORING SECTIONS: THEORY AND APPLICATIONS

PAULO CÉSAR NEGRÃO¹; FELIPE BALIEIRO GASPARINI²; SUELI YOSHINAGA PEREIRA³

1 – Dr. Clean Environment do Brasil, Campinas SP. E-mail: p.negrao@clean.com.br

2 – Msc, SGW Services Consultoria Ambiental. E-mail: felipe_gasparini@hotmail.com

3 – Prof Assoc, Depto. Geologia e Recursos Naturais, Inst. Geociências, Unicamp, Campinas SP. E-mail: sueliyos@ige.unicamp.br

ABSTRACT: This article presents a bibliographic review of the theory and applications of Mass Flux (J) and Mass Discharge (Md) methods, through the use of monitoring transects crossing a contamination plume. The methods described for determining J and Md are through Transverse Sections (TS) and Passive Flux Meters (PFM). Results of the application in several case studies indicated that the TS method exhibited better results in relation to ease of implementation, availability and quality, but with higher costs. The PFM method exhibited lower performance regarding know-how required, ease of application and cost/benefit, but better quality of results.

Manuscrito:

Recebido: 30/08/2015

Corrigido: 30/09/2015

Aceito: 26/10/2015

Citation: Negrão P.C., Gasparini F.B., Pereira S.Y. 2015. Fluxo e descarga de massa de contaminantes em meio saturado através de seções transversais de monitoramento: teoria e aplicações. *Terraë*, 11(1-2):39-46. <<http://www.ige.unicamp.br/terrae/>>.

Keywords: Mass flux and mass discharge, transversal sections, passive flux meters, groundwater contamination

Introdução

As decisões tomadas ao longo da vida de um projeto de gerenciamento e remediação de uma área contaminada são baseadas nas séries históricas das concentrações pontuais dos compostos de interesse em determinado tempo e espaço. A interpretação das concentrações pontuais não é eficiente para o entendimento e gerenciamento de plumas de contaminação em meio saturado (ITRC 2010), nas seguintes questões: (a) distribuição, transporte e comportamento dos contaminantes sem/ com intervenção de remediação; (b) determinação da massa de contaminante a ser removida pela remediação, e (c) priorização de zonas hidrogeológicas para maximização dos resultados da remediação. Isso implica na busca de entendimento mais aprofundado da dinâmica de uma pluma de contaminação em zona saturada. A análise das concentrações dos compostos de interesse em poços de monitoramento distribuídos randomicamente ao longo de uma pluma permite um entendimento bastante limitado em relação às complexas dinâmicas de comportamento de uma pluma. Neste sentido, o estudo e a determinação do fluxo (J) e

descarga (Md) de massa de contaminantes numa pluma podem fornecer informações importantes quanto às zonas mais impactadas do aquífero, taxas de atenuação natural, e a identificação das porções do aquífero nas quais a maior parte dos contaminantes está migrando. As regulamentações ambientais atuais e os valores de referência para contaminantes encontrados em águas subterrâneas não levam em consideração o fluxo de massa. A abordagem atual considera as concentrações dos contaminantes dissolvidos na água subterrânea em unidade de massa por volume, amostrados em poços de monitoramento, bem como a avaliação das alterações das concentrações dos compostos de interesse ao longo do tempo e do espaço.

A determinação do fluxo de massa não é prática usual no monitoramento de plumas de contaminação, pois não é exigida pelos órgãos ambientais. Todavia, pesquisas reconheceram os benefícios do cálculo do fluxo de massa de contaminantes. Segundo Pankow & Cherry (1996), o impacto real de uma pluma de solventes em um poço de abastecimento ou em um corpo d'água superficial, pode ser avaliada, mesmo que num pequeno fluxo de massa anual. Em alguns casos, esses fluxos de massa

podem representar riscos à saúde humana e/ou ao meio ambiente, justificando ações contundentes de remediação. Em outros casos, demonstrou-se que os fluxos de massa eram tão insignificantes que ações de remediação resultariam em ínfima, ou nenhuma redução nos riscos. Nos últimos anos, há um crescente reconhecimento de que a determinação do fluxo de massa de contaminantes em meio saturado pode fornecer uma medida mais precisa dos riscos reais aos receptores proporcionados pelos contaminantes em comparação à avaliação somente das concentrações obtidas em pontos estáticos (Einarson & Mackay 2001, Buscheck et al. 2003). Ainda, segundo Feenstra et al. (1996), a determinação do fluxo de massa permite melhor caracterização de uma área contaminada do que as redes típicas de monitoramento. As redes buscam, definir os limites da pluma de contaminação e as séries históricas de concentração. No entanto, as concentrações dos compostos de interesse e as velocidades do aquífero variam de maneira significativa ao longo de uma pluma, fazendo com que zonas de fluxo mais pronunciado do aquífero não sejam percebidas durante a delimitação da pluma e da área fonte da contaminação.

O entendimento do comportamento dinâmico de uma pluma de contaminação, fornecido pela determinação do fluxo de massa, possibilita o refinamento do modelo conceitual e consequentemente o planejamento de ações de intervenção. (Nichols & Roth 2004, Basu et al. 2006). A determinação do fluxo de massa em plumas de contaminação pode aprimorar o entendimento e o gerenciamento de áreas contaminadas (ITRC 2010), como: (a) em sessões transversais próximas a áreas fonte de contaminação, fornecendo informações com relacionadas à carga de contaminantes em zonas do aquífero, distribuição dos contaminantes e grau de heterogeneidade do aquífero; (b) auxilia a avaliação da exposição potencial de um receptor, tal como um poço de produção de água ou um corpo de água superficial; (c) afere a capacidade de atenuação natural de um aquífero por comparação das séries históricas dos cálculos do fluxo de massa no espaço, delimitando as zonas de maior fluxo e massa e identificando as zonas ótimas de remediação; (d) auxilia no estabelecimento de metas de remediação e métricas de performance, como a escolha de técnicas de remediação, o monitoramento, os projetos de remediação e definição de pontos de transição (em tempo e espaço), entre uma técnica de remediação e outra; e, (e) auxilia

as agências reguladoras e os gerentes de projeto na priorização de investigação e remediação das áreas contaminadas em função da real carga de contaminantes existente e consequente risco aos receptores.

O presente artigo apresenta o estado da arte do método, apresentando uma análise sobre a utilização dos conceitos e dos métodos de campo, com base em revisão bibliográfica sobre bases conceituais e aplicações dos métodos; é realizada uma comparação entre os métodos e as respectivas incertezas.

Teoria de Fluxo de Massa (J) e Descarga de Massa de Contaminantes (M_d)

O Fluxo de Massa (J) é a massa de um composto químico (ex.: contaminantes, traçadores, compostos remediadores, etc.) que passam por um plano transversal ao sentido de fluxo do aquífero num certo espaço de tempo. O fluxo de massa (J) é uma grandeza vetorial expressa em unidades de massa/tempo/área [$M/T/L^2$].

De maneira simplista, J combina duas características importantes de uma pluma de contaminação: o quanto de contaminante há numa pluma e quão rápido este contaminante ou a água se move através de um plano transversal ao sentido de fluxo do aquífero.

A Descarga de Massa (M_d) é função do fluxo de massa, no entanto, sem se limitar a uma área definida. Por sua vez, M_d representa a massa total do contaminante de interesse que se move através do plano transversal ao sentido de fluxo do aquífero e tem grandeza escalar, expressa em unidade de massa/tempo [M/T]. A descarga de massa de contaminantes é estimada determinando-se as concentrações dos compostos químicos que compõem a pluma e os fluxos do aquífero na sessão transversal perpendicular ao fluxo da água subterrânea. A Figura 1(a) ilustra a descarga total do aquífero (Q) e a massa total descarregada (M_d) em três seções transversais ao longo de uma pluma.

Conceitualmente, a Descarga de Massa (M_d) através de uma sessão transversal é semelhante à Descarga da Água Subterrânea (Q). A Descarga de Massa (M_d) é determinada pela multiplicação da Descarga da Água Subterrânea (Q) pela concentração média dos contaminantes. É relevante frisar que o fluxo é um vetor com velocidade e concentrações que variam em todas as dimensões. Por sua vez, a descarga é uma integral de grandeza escalar, sempre que seus limites sejam definidos.

A Figura 1(b) apresenta o conceito do Fluxo de Massa (J) e Descarga de Massa (M_d). Cada quadrante da seção transversal representa o fluxo de massa daquela unidade (célula i, j). A descarga de massa é dada pela soma do fluxo de massa ao longo de toda a seção transversal, ou seja, a soma de todas as células que compõem a seção (ITRC 2010). No exemplo desta figura há duas sessões transversais com dois valores da descarga de massa: uma na seção A (M_{dA}) e a outra para a seção B (M_{dB}) a jusante. A comparação dos valores permite avaliar as condições e características da pluma como, por exemplo, quanto a taxa de atenuação natural entre as duas seções.

A Equação 1 define o Fluxo de Massa, J (M/T/L²) de contaminantes que passa por unidade de tempo por unidade de área do plano que contém a pluma e é perpendicular à direção de fluxo média da água subterrânea (Basu et al. 2006).

$$J = q.C = -K.i.C \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

q = fluxo da água subterrânea [L³/L²/T]

K = condutividade hidráulica da zona saturada [L/T]

i = gradiente hidráulico

C = concentração do contaminante de interesse [M/L³]

Concomitantemente, segundo Basu et al. (2006), a Equação 2 define a Descarga de Massa, M_d (M/T) como a integral de todos os fluxos de massa ao longo do plano de uma sessão transversal.

$$M_d = \int_A J.dA \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

A = área da seção transversal (L²)

J = variação espacial do fluxo do contaminante conforme Equação 1

O cálculo do Fluxo de Massa pode ser aplicado para quaisquer compostos em fase dissolvida, tais como metais, compostos clorados, hidrocarbonetos de petróleo, íons inorgânicos. Impera ressaltar que o método se aplica única e exclusivamente para compostos em fase dissolvida e não para compostos em fase livre mais leve ou mais densa que a água (ITRC 2010).

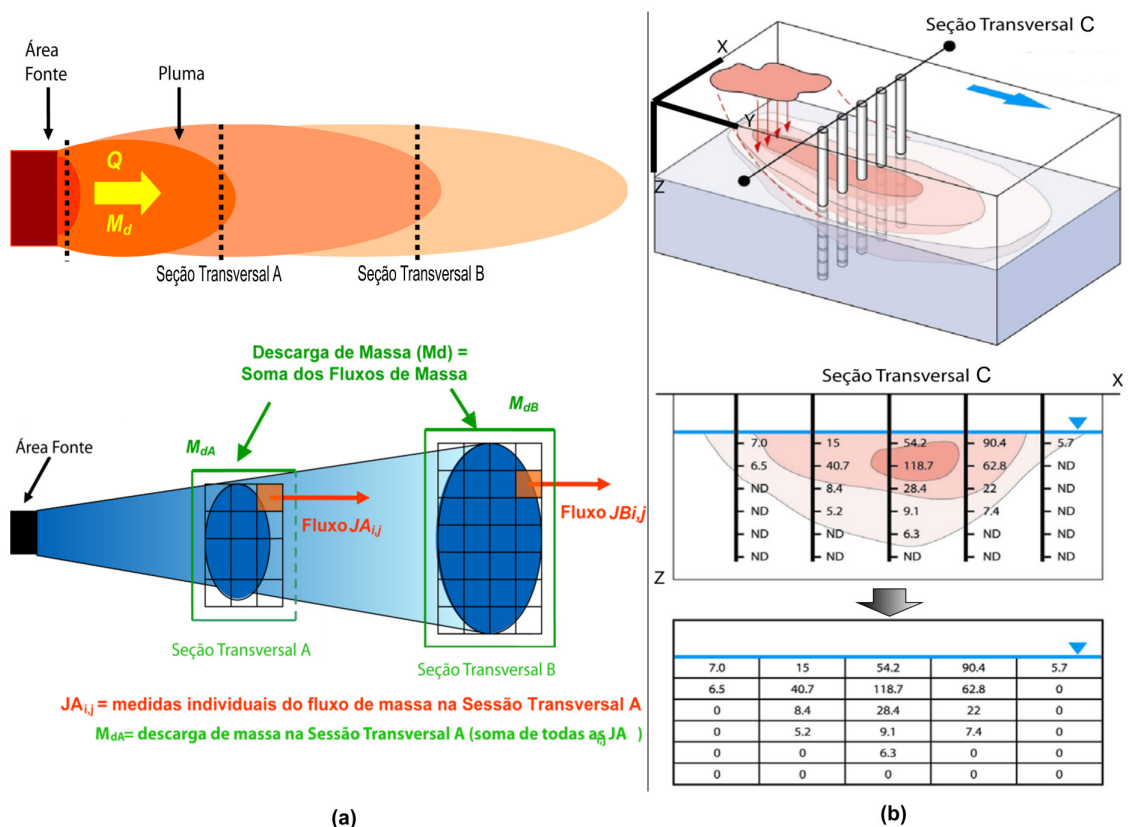


Figura 1. (a) Pluma de contaminação vista em planta com as Seções Transversais (A e B), e o uso do método dos Fluxo de Massa (J) e Descarga de Massa (M_d). (b) Seção Transversal com poços multiníveis, com a delimitação da distribuição dos valores de Fluxo de Massa no Transecta C (modificado de ITRC 2010)

Métodos para determinação do fluxo e descarga de massa

Existem três métodos para se determinar diretamente o fluxo e a descarga de massa: (a) Método das Seções ou Planos Transversais (ST), segundo Einarson & MacKay (2001), recorre ao monitoramento das concentrações e fluxos em vários pontos ao longo do eixo z da seção transversal; (b) Método dos Medidores Passivos de Fluxo (MPF), cilindros de material poroso embebidos em concentrações conhecidas de traçadores são instalados na seção filtrante de poços de monitoramento (Hatfield et al. 2004), e (c) Método da Zona de Captura/ Teste de Bombeamento de um Poço (ZC/ TB), proposto por Bockelman et al. (2001), a água subterrânea é bombeada de um poço e a vazão total e a descarga de massa são medidos.

Nesse artigo são apresentados com maior detalhe os dois primeiros métodos (a e b), em que são utilizadas seções transversais.

Método das Seções Transversais, Cálculo de Fluxo e Descarga de Massa Total

As seções ou planos transversais de monitoramento são compostos por uma sequência de poços de monitoramento, posicionados próximos um aos outros, com seção filtrante única ou seções multiníveis, alinhados no eixo perpendicular ao sentido de fluxo médio da água subterrânea, de maneira a conter uma pluma de contaminação (Einarson & Mackay 2001, Nichols & Roth 2004). Segundo Nichols & Roth (2004), o plano transversal é dividido em subáreas, sendo que cada uma representa uma área discreta de concentrações uniformes e com fluxo de água subterrânea distinto. Einarson & Mackay (2001) alertam que o uso de planos transversais com poços de seção filtrante única é aplicável somente em condições de fluxo bastante homogêneo e plumas ou aquíferos pouco espessos. Os autores recomendam que as seções transversais sejam construídas com poços de monitoramento multiníveis, a fim de se coletar e identificar detalhes importantes da distribuição dos contaminantes. Para se utilizar o método das seções ou planos transversais, algumas etapas devem ser avaliadas, em consonância com Farhat et al. (2006) e Einarson & Mackay (2001). A primeira etapa visa a caracterização das concentrações dos compostos contaminantes da pluma, em toda a sua largura e espessura (a menos que o objetivo

seja avaliar somente uma parte da mesma) e caracterizar a distribuição dos contaminantes na pluma através de poços com seção filtrante única ou poços multiníveis. A segunda etapa objetiva a caracterização do fluxo da água subterrânea. É necessária a obtenção de dados representativos da condutividade hidráulica do meio saturado (K) e o gradiente hidráulico (i) a fim de se calcular a velocidade de Darcy ($q = K.i$) ao longo de cada seção transversal. Para determinação do gradiente hidráulico (i) deve-se recorrer aos mapas potenciométricos que reflitam as medidas dos níveis estáticos próximas da seção. A condutividade hidráulica (K) deve ser determinada, no mínimo, em um ponto da seção utilizando-se a técnica mais adequada para o meio, tal como teste de bombeamento, *slug test*, medidores de fluxo passivo, testes de diluição, traçadores, etc. A terceira etapa visa o posicionamento das seções (ou planos) transversais, onde as seções (ou planos) transversais devem estar posicionadas nos alinhamentos nos quais se pretendem definir a distribuição e concentração dos contaminantes a fim de se determinar a descarga de massa (M_d), conforme ilustrado na Figura 1(c), quando a seção é posicionada imediatamente a jusante da área fonte, a descarga de massa é denominada “potência da fonte” enquanto as seções posicionadas em pontos de tomada de decisão fornecem a melhor estimativa da carga de contaminantes recebidas por um receptor (Basu et al. 2006).

A quarta etapa consiste do Método de Interpolação. Em alguns casos a densidade de dados obtidos nas seções transversais, em função do espaçamento entre os poços e a quantidades de pontos multiníveis, pode ser bastante alta permitindo o cálculo direto do fluxo de massa (J). Em outros casos, a densidade de dados pode não ser tão alta e métodos de interpolação podem ser empregados, tais como Krigagem, Vizinho Mais Próximo ou Polígonos Thiessen. Conforme indicado pelo ITRC (2010), o método de Thiessen de interpolação é a técnica mais utilizada, de acordo com a Figura 1(c). Os valores das concentrações dos contaminantes em cada ponto de monitoramento são então lançados em cada polígono a fim de indicar a distribuição dos contaminantes ao longo da seção.

Os cálculos da Descarga de Massa total que passa através da seção transversal são determinados pela soma das massas que passam por cada um dos n polígonos que formam o plano (Farhat et al. 2006), conforme termos da Equação 3.

$$M_d = \sum_{j=1}^n M_{d_j} = \sum_{j=1}^n C_j \cdot q_j \cdot A_j$$

(Equação 3)

Onde:

M_d = descarga de massa [M/T]

M_{d_j} = descarrega de massa parcial através do polígono j [M/T]

C_j = concentração do composto no polígono j [M/L³]

q_j = velocidade de Darcy através do polígono j [L/T]

A_j = Área de escoamento através do polígono j [L²]

A Velocidade de Darcy (q_j) pode ser derivada pela equação (Equação 4):

$$q_j = -K_j \cdot i_j \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

K_j = condutividade hidráulica no polígono j [L/T]

i_j = gradiente hidráulico no polígono j [L/L]

A porosidade não é utilizada nos cálculos de Fluxo de Massa quando se utiliza Seções Transversais (ST). O Fluxo de Massa (J) é determinado diretamente pela multiplicação da descarga específica de um polígono (Velocidade de Darcy [L/T]) pela área do polígono e pela concentração dos contaminantes de interesse no polígono. A porosidade, por sua vez, é um parâmetro utilizado para a determinação da velocidade real de fluxo da água subterrânea entre dois pontos e não é um parâmetro utilizado na determinação da Descarga de Massa Fluxo de Massa quando se utiliza o ST.

STs são utilizadas para cálculo da descarga de massa e podem ser formadas por uma série de poços de monitoramento ou poços temporários instalados por técnicas de cravação a percussão. Recomenda-se o uso de uma alta densidade vertical de pontos de amostragem quando o objetivo do projeto for a localização de zonas de alta concentração de massa (Guilbeault et al. 2005), ou quando se buscar definir a distribuição detalhada dos contaminantes no plano vertical, a fim de se otimizar o projeto de remediação para que o mesmo foque nas zonas de maior fluxo de massa. Ressalta ITRC (2010) que, na maioria dos projetos existentes, a rede de poços de monitoramento não é projetada de maneira a permitir a captura do fluxo de massa por uma seção específica, pois as redes de monitoramento

tradicionais são projetadas para delinear os limites das plumas, definir as concentrações e auxiliar na estimativa das zonas fonte de contaminação. A resolução dos parâmetros hidráulicos da seção transversal também deve ser avaliada em função do grau de heterogeneidade da área. As seções transversais normalmente são dotadas de uma série de pontos de amostragem. Contudo, a quantidade de pontos onde são determinados os parâmetros hidráulicos do aquífero (gradientes e condutividades hidráulicas) pode ser diferente do número de pontos de amostragem para concentração dos compostos de interesse. Para Guilbeault et al. (2005), Nichols & Roth (2004) e Einarson & McKay (2001), os valores de concentração dos compostos de interesse devem ser obtidos em cada um dos polígonos que formam a seção transversal. A condutividade hidráulica (K) e o gradiente hidráulico (i) devem ser determinados, respectivamente, com um único valor para todo o plano transversal. Contrapondo os autores supracitados, Basu et al. (2006) abordou o Fluxo de Massa uma seção transversal de duas maneiras: com a utilização de apenas um mesmo valor de condutividade hidráulica para toda a seção transversal, e com valores de condutividade hidráulica distintos para cada um dos polígonos da seção. A diferença entre as duas abordagens foi de 13% a mais quando o cálculo foi feito com uma mesma condutividade hidráulica para toda a seção. Kübert & Finkel (2005) também realizaram estudos similares aos de Basu et al. (2006), mas neste caso em modelos hipotéticos e aplicando análise de Monte Carlo para quantificar o erro. O estudo demonstrou que há pouca diferença entre a utilização de apenas um valor de condutividade hidráulica para toda a seção transversal e o uso de valores distintos para cada um dos polígonos da seção, quando esses valores variam de baixo a moderado ao longo da seção transversal. Quando as variações na condutividade hidráulica são mais acentuadas da pluma hipotética, o resultado da comparação depende da resolução da quantidade de pontos verticais de amostragem. O uso de condutividades hidráulicas específicas para cada polígono da seção mostrou-se mais preciso quando o espaçamento entre os poços de monitoramento e os pontos de amostragem na vertical é pequeno. A opção de se utilizar o mesmo valor de condutividade hidráulica para todos os polígonos da seção foi considerada melhor alternativa para casos nos quais o espaçamento entre os pontos de amostragem (horizontal e verticalmente) é maior. Os autores concluíram, ainda, que o uso de valores

de gradiente hidráulico (i) específicos para cada poço não resultaram em reduções significativas na quantificação do erro.

Método dos Medidores Passivos de Fluxo (MPF), Cálculo do Fluxo de Massa médio e Descarga de Massa total

Desenvolvido e apresentado por Hatfield et al. (2002), baseia-se na utilização de um amostrador cinético passivo permeável instalado no interior de um poço de monitoramento. Os amostradores MPF são construídos em matriz permeável com propriedades hidrofóbicas e hidrofílicas que sorvem os solutos orgânicos e inorgânicos presentes na água subterrânea. Ao mesmo tempo, a matriz sorvente é também pré-condicionada com concentrações conhecidas de traçadores (Verreydt et al. 2010). Tais dispositivos são instalados temporariamente no interior de poços de monitoramento para interceptar o fluxo do aquífero. O fluxo da água subterrânea ao passar pelo sistema faz com que os contaminantes dissolvidos sejam adsorvidos pelo material permeável do dispositivo e os traçadores em concentração inicial conhecida sejam lixiviados. Os MPF devem permanecer no interior do poço de monitoramento por um tempo pré-determinado, a fim de que não ocorra a saturação dos contaminantes adsorvidos no material adsorvente. A concentração final dos contaminantes sorvidos e do traçador lixiviado do material permeável são então utilizados para a determinação do fluxo de água subterrânea e dos contaminantes (Hatfield et al. 2002).

A utilização de vários MPF ao longo de uma seção transversal permite a determinação do Fluxo de Massa médio e da Descarga de Massa total através da seção. Hatfield et al. (2002) apresentou a Equação 5 para a determinação do Fluxo de Massa (J_c) com base nos dados obtidos através do uso dos Medidores Passivos de Fluxo:

$$J_c = q.C_F \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

J_c = Fluxo de massa advectivo médio do contaminante no período de residência dos Medidores Passivos de Fluxo [$M/L^2/T$]

C_F = Concentração média do contaminante com base no fluxo [M/L^3]

q = descarga específica do aquífero [L/T]

Discussão

Em relação às incertezas em STs, o cálculo da Descarga de Massa (M_d) é baseado nos valores de fluxo do aquífero (q) e nos valores das concentrações (C) dos compostos de interesse na pluma de contaminação interceptada pela seção transversal de monitoramento. A mensuração de ambos os parâmetros, q e C , por si só introduzem incertezas em sua quantificação. Consequentemente, o valor da M_d também carrega certo grau de incerteza (ITRC 2010). Nichols & Roth (2004) reconheceram que uma das alternativas para reduzir esta incerteza seria a coleta de mais dados, o que pode, potencialmente, aumentar os custos analíticos do projeto. Para Einarsen & Mackay (2001), as incertezas estão associadas com a densidade da matriz de amostragem, métodos de interpolação e determinação dos fluxos do aquífero em cada camada estratigráfica interceptada pela ST. Os autores ressaltam que a precisão da estimativa de M_d é proporcional a quantidade de pontos amostragem na seção. Farhat, Newell & Nichols (2006) identificaram as três mais relevantes fontes de incerteza na determinação da M_d no Método das STs: (1) incertezas na quantificação das concentrações dos compostos de interesse, determinação da condutividade hidráulica e gradientes; (2) incertezas introduzidas pelo método de interpolação (ex: krigagem, polígonos de Thiessen), e (3) incertezas associadas a valores não mensurados, tais como áreas de altas concentrações que eventualmente não foram identificadas pela matriz de monitoramento. Os autores recomendam o uso do modelo de Monte Carlo para avaliar as incertezas carregadas pelos valores da condutividade hidráulica, concentrações e gradientes. Li et al. (2007) propuseram o uso de ferramentas geoestatísticas para avaliar as incertezas causadas pelos parâmetros (2) e (3) supracitados.

Os MPFs são uma tecnologia recente para a determinação da M_d . Brooks et al. (2008) comparou os valores de M_d obtidos por MPF e uso de ST em duas áreas militares nos Estados Unidos. Os resultados apresentaram diferenças que variaram de -17% a -8%, baseado na subtração das medidas obtidas pelos MPF dos valores obtidos pela ST, divididos pelos valores obtidos pela ST. Estas diferenças, segundo o autor, são relativamente pequenas quando comparadas com o grau de variabilidade do fluxo de um aquífero, com faixa de variação nas estimativas de descarga de massa de contaminantes, da ordem de 200 vezes

ou mais. Hatfield et al. (2004) relataram que o uso dos MPF é bastante desafiador, uma vez que vários MPF e vários poços devem ser instalados para a determinação da descarga de massa através de uma seção de controle. O autor reconhece que o valor calculado contém incertezas em função das interpolações dos dados obtidos no espaço, e de possíveis sorções entre os contaminantes e os materiais da formação. Ainda, o emprego dos medidores passivos por longos períodos de tempo pode ser comprometido por alterações sazonais no sentido de fluxo do aquífero. Os MPF não devem ser instalados em poços de monitoramento onde se verifica a presença de fase livre sobrenadante ou precipitada de contaminantes.

Considerações Finais

Goltz et al. (2007) compararam os métodos de determinação do fluxo e descarga de massa de contaminantes em água subterrânea, nos quesitos Facilidade de Implementação, Disponibilidade e Custo para os métodos ST, MPF e Zona de Captura. O quesito Facilidade de Implementação mensurou a facilidade de aplicação de cada método. No item Disponibilidade, o autor elencou o quanto a abordagem é conhecida e já foi citada na literatura científica, assumindo que a técnica já é dominada pelos profissionais de água subterrânea, e no quesito Custo, o autor enfatiza a dificuldade de se documentar os custos dos projetos e a relação custo/benefício que o conhecimento da descarga de massa trouxe para o projeto. ST obteve uma pontuação de 6, MPF, nota 9 e Zona de Captura, nota 7, de uma variação entre 3 (melhor método) e 12 (pior método). ST foi avaliado como melhor método nesses quesitos, em relação facilidade de implementação e disponibilidade, porém com altos custos. A Zona de Captura apresenta domínio maior da técnica pelos profissionais atuantes e custo menor dos demais métodos, porém não possui facilidade de implementação. O mais custoso, menor disponibilidade e facilidade de implementação é o MPF. Apesar de o conceito do Fluxo e Descarga de Massa estar bastante consolidado na comunidade científica e profissional internacional, há um aumento crescente no interesse da determinação desses parâmetros em função das reduções de custo de implementação destes sistemas de monitoramento nos últimos anos (Ptak et al. 1998, Hatfield et al. 2002).

No Brasil, o método de determinação do fluxo e descarga de massa é pouco utilizado nas áreas con-

taminadas, seja pelo desconhecimento da técnica de implantação do método, pelo não domínio do método pelos profissionais da área, e da dificuldade de mensuração dos custos/ benefícios do projeto. Há apenas uma área no município de Cubatão onde o sistema de ST foi implementado, ainda em pesquisa e uma segunda área na região sul do município de São Paulo.

O método da determinação do Fluxo e Descarga de Massa, quando utilizado em paralelo com as redes de monitoramento tradicionais, comumente exigidas pelos órgãos ambientais, pode contribuir para: (1) reduzir o volume da zona de tratamento, uma vez que se podem determinar as zonas de fluxo preferencial de contaminantes nos pontos de alto fluxo de massa; (2) melhorar o entendimento sobre quais os valores de concentração dos contaminantes devem ser atingidos, e (3) permitir uma melhor estimativa sobre a duração de uma ação de remediação uma vez que a metodologia permite uma avaliação detalhada do comportamento das concentrações no tempo e no espaço num plano de controle a jusante do sistema de remediação e a montante dos possíveis receptores (ITRC 2010).

Referências

- Basu N.B., Rao P.S.C., Poyer I.C., Annable M.D., Hatfield K. 2006. Flux-Based Assessment at a Manufacturing Site Contaminated with Trichloroethylene, *J. Contaminant Hydrology*, **86**(1-2):105-127.
- Bockelmann A., Ptak T., & Teutsch G. 2001. An Analytical Quantification of Mass Fluxes and Natural Attenuation Rate Constants at a Former Gasworks Site, *J. Contaminant Hydrology*, **53**(3-4):429-453.
- Brooks M.C., Wood A.L., Annable M.D., Hatfield K., Cho J., Holbert C., Rao P.S.C., Enfield C.G., Lynch K., Smith R.E. 2008. Changes in Contaminant Mass Discharge from DNAPL Source Mass Depletion: Evaluation at Two Field Sites, *J. Contaminant Hydrology*, **102**:140-153.
- Buscheck T.E., Nijhawan N., & O'Reilly K.T. 2003. Mass Flux Estimates to Assist Remediation Decision-Making, in *Proceedings, 7th International Symposium on In Situ and On-Site Bioremediation*, Orlando, Fla., June 2-5. Columbus, Ohio: Battelle.
- Einarson M.D., Mackay D.M. 2001. Predicting the Impacts of Groundwater Contamination, *Environmental Science and Technology* **35**(3): 66A-73A.
- Farhat S.K., Newell C.J., Nichols E. 2006. *Mass Flux Toolkit to Evaluate Groundwater Impacts, Attenuation, and Remediation Alternatives, developed for the Environmental Security Technology Certification*. Program by Groundwater Services, Inc., Houston. www.

- gsi-net.com/software.asp.
- Feenstra S., Cherry J.A., Parker B.L. 1996. Conceptual Models for the Behavior of DNAPLs in the Subsurface. Cap. 2. In: *Dense Chlorinated Solvents and Other DNAPLs in Groundwater*, J. F. Pankow & J. A. Cherry, eds. Portland, Ore.: Waterloo Press.
- Goltz M.N., Kim S., Yoon H., Park J.. 2007. Review of Groundwater Contaminant Mass Flux Measurement, *Environmental Engineering Research* **12**:176-193.
- Guilbeault M.A., Parker B.L., Cherry J.A.. 2005. Mass and Flux Distributions from DNAPL Zones in Sandy Aquifers, *Ground Water*, **43**(1): 70-86.
- Hatfield, K., M. D. Annable, J. Cho, P. S. C. Rao, H. Klammler. 2004. A Direct Passive Method for Measuring Water and Contaminant Fluxes in Porous Media, *Journal of Contaminant Hydrology* **75**(3-4): 155-81.
- Hatfield K., Annable M.D., Kuhn S., Rao S. & Campbell T. 2002. A New Method for Quantifying Contaminant Flux at Hazardous Waste Sites, pp. 25-32 in *Groundwater Quality: Natural and Enhanced Restoration of Groundwater Pollution*, S.F. Thornton & S.E. Oswald. eds. Intern. Assoc. Hydrol. Sci. Publ. No. 275. Wallingford, Oxfordshire, U.K.
- Interstate Technology & Regulatory Council - ITRC. 2010. *Use and Measurement of Mass Flux and Mass Discharge. MASSFLUX-1*. Washington, DC. Interstate Technology & Regulatory Council, Integrated DNAPL Site Strategy Team. 89p.
- Kubert M., & Finkel M. 2005. Contaminant Mass Discharge Estimation in Groundwater Based on Multi-Level Point Measurements: A Numerical Evaluation of Expected Errors. *J. Contaminant Hydrology*, **84**:55-80.
- Li K.B., Goovaerts P., Abriola L.M. 2007. A Geostatistical Approach for Quantification of Contaminant Mass Discharge Uncertainty Using Multi-Level Sampler Measurements. *Water Resources Research*, **43**:W06436.
- Nichols E. & Roth T. 2004. *Flux Redux: Using Mass Flux to Improve Cleanup Decisions. L.U.S.T. Line 46* (March). Lowell, Mass.: New England Interstate Water Pollution Control Commission. www.neiwpcc.org/lustline/lustline_pdf/LustLine46.pdf.
- Pankow J., Cherry J.A. 1996. *Dense Chlorinated Solvents and Other DNAPLs in Groundwater*. Waterloo, Ontario, Canada: Waterloo Press.
- Ptak T., Schwarz R. & Teutsch G. 1998. Groundwater Risk Assessment at a Contaminated Site Based on Integrating and Spatially Resolving Investigations Groundwater Pollutant Concentrations and Fluxes. London: Thomas Telford. *Contaminated Soil*, **98**:815-16.
- Verreydt G., Bronders J., van Keer I., Diels L., Vanderauwera P. 2010. Passive Samplers for Monitoring VOCs in Groundwater and Prospects Related to Mass Flux Measurements. *Ground Water Monitoring and Remediation* **30**(2):114-126.

RESUMO : O artigo apresenta uma revisão da teoria e aplicações dos métodos para a determinação do Fluxo de Massa Fluxo de Massa (J) e Descarga de Massa (M_d) através de seções de monitoramento transversais a uma pluma de contaminação. Os métodos de determinação de J e M_d descritos no trabalho são: das Seções Transversais (ST) e dos Medidores Passivos de Fluxo (MPF). Os resultados da aplicação dos métodos em estudos de caso indicaram que o método ST apresentou maior facilidade de implementação, disponibilidade e qualidade dos resultados, porém com custos maiores. O método MPF é o que obteve menor desempenho em relação a conhecimento e aplicação, bem como em custo/benefício, apesar da boa qualidade dos resultados.

Palavras-chave: Fluxo e descarga de massa, seções transversais, medidores passivos de fluxo, contaminação de água subterrânea