



XI SILUBESA

Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

28/03 a 02/04/2004 - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil

III-026 – ANÁLISE NUMÉRICA DO TRANSPORTE DE METAIS PESADOS EM UM ATERRO DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Hosmanny Mauro Goulart Coelho⁽¹⁾

Eng. Civil, Mestrando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), pesquisador vinculado ao Depto. de Engenharia Sanitária e Ambiental e ao Depto. de Engenharia de Transportes e Geotecnia da UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Gustavo Ferreira Simões

Eng. Civil, Doutor em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Prof. Adjunto do Depto. de Engenharia de Transportes e Geotecnia da UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Liséte Celina Lange

Química, Doutora em Tecnologia Ambiental pela Universidade de Londres – Inglaterra, Profª. Adjunta do Depto. de Engenharia de Sanitária e Ambiental da UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Cynthia Fantoni Alves Ferreira

Engª. Civil, Especialista em Gestão Ambiental, Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG, pesquisadora vinculada ao Depto. de Engenharia Sanitária e Ambiental e ao Depto. de Engenharia de Transportes e Geotecnia da UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Endereço⁽¹⁾: Av. do Contorno, 842 - 7º andar - Sala 717 - Centro - Belo Horizonte - Minas Gerais - CEP: 30.110-060 - Brasil - Tel: +55 (31) 3238-1039 - Fax: +55 (31) 3238-1879



hosmanny@hotmail.com

RESUMO

O presente trabalho apresenta e discute os resultados da análise numérica da contaminação subterrânea por metais pesados na área do Aterro de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Catas Altas, Estado de Minas Gerais. O estudo se insere em um amplo projeto de pesquisa que vem sendo desenvolvido no referido município, envolvendo, dentre outros aspectos, a caracterização do meio físico local, a partir de levantamentos topográficos e execução de sondagens, instalação de poços de monitoramento, realização de ensaios de campo e laboratório e monitoramento ambiental. O programa experimental envolveu a caracterização geotécnica, determinação de parâmetros de permeabilidade, retenção e transporte de metais pesados. Posteriormente, foram realizadas as simulações numéricas do transporte dos metais pesados Cd, Cr, Cu, Pb e Zn, utilizando o programa computacional HYDRUS 2D, que avalia o fluxo e o transporte de contaminantes em meios porosos saturados e não saturados. Os resultados das simulações computacionais associados aos dados do monitoramento de campo sugerem que dificilmente as águas subterrâneas serão contaminadas pelos metais analisados.

PALAVRAS-CHAVE: Transporte de Contaminantes, Metais Pesados, Análise Numérica, Aterros de Resíduos Sólidos, Contaminação dos Solos.

INTRODUÇÃO

Os aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos (ADRSU) podem ser considerados grandes fontes potenciais de contaminação do ar, dos solos e das águas subterrâneas, caso não sejam criteriosamente projetados e operados.

Diversas são as formas de contaminação dos solos e das águas subterrâneas, dentre as quais destaca-se a causada pela infiltração de espécies de metais em solução. Esses contaminantes, no caso de ADRSU, têm origem nos líquidos lixiviados.

São inúmeros os fenômenos que controlam o transporte de contaminantes em meios porosos, onde o contaminante considerado é a massa de alguma substância tóxica dissolvida (poluente), movendo-se com algum fluido (água) nos vazios do meio poroso (solo) seja ele saturado ou não (Nobre, 1987).

O movimento dos contaminantes depende do fluxo do fluido no qual tais substâncias estão dissolvidas e também de mecanismos que por sua vez dependem de processos físicos, químicos e biológicos aos quais estas substâncias são submetidas.

Visando identificar essa possibilidade de contaminação, utiliza-se a modelagem computacional, uma vez que, a maioria dos modelos de transporte de contaminantes em solos é fundamentada nos princípios da conservação de massa, energia e momento, e, dependendo da complexidade da geometria, as equações dos modelos de transporte exigem a utilização de métodos numéricos para sua resolução, tais como o método de diferenças finitas e o método de elementos finitos.

A avaliação numérica da contaminação da área do ADRSU de Catas Altas vem sendo realizada com o programa computacional HYDRUS 2D, desenvolvido pelo INTERNATIONAL GROUND WATER MODELING CENTER (IGWMC, 1999).

Especificamente neste trabalho, busca-se conhecer os níveis de contaminação por metais pesados (Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo e Zinco), ou seja, estimar quais as concentrações desses metais para várias profundidades do subsolo do aterro ao longo do tempo. A partir da análise conjunta dos resultados dessas simulações numéricas com os dados dos ensaios de laboratório e de monitoramento de campo, pode-se aferir os modelos utilizados e obter a avaliação dos reais níveis de contaminação dos solos e das águas subterrâneas da área do ADRSU de Catas Altas-MG.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização da modelagem numérica se fez necessária a obtenção dos parâmetros intervenientes no processo de avanço da pluma de contaminação no subsolo. Tais parâmetros foram obtidos por meio de ensaios de equilíbrio em lote (Batch Test) e ensaios de coluna realizados em laboratório utilizando amostras deformadas e indeformadas de solo da área do ADRSU de Catas Altas – MG, ensaios de caracterização do solo, ensaios de permeabilidade, execução de sondagens de simples reconhecimento e levantamento topográfico.

A seguir faz-se uma breve apresentação sobre os ensaios de equilíbrio em lote e ensaios de coluna.

ENSAIO DE EQUILÍBRIO EM LOTE (BATCH TEST)

Os ensaios de equilíbrio em lote utilizam uma suspensão de solo (amostra deformada) na qual, variando a concentração inicial da substância na solução, mede-se a quantidade desta que é sorvida pelas partículas do solo em suspensão. A relação entre a massa sorvida por unidade de massa de sólidos secos (S_c) e a concentração da substância que permanece em solução (C), depois de atingido o equilíbrio, é representada por meio de curvas de ajustes. Como a sorção normalmente se processa a temperatura constante, as curvas obtidas e suas expressões matemáticas equivalentes são denominadas isotermas de sorção.

É importante salientar que, nos ensaios de equilíbrio em lote não se consegue distinguir os mecanismos responsáveis pela retenção do metal, como adsorção, precipitação ou complexação. Em geral, a adsorção é um fenômeno rápido, enquanto as reações de complexação envolvendo a matéria orgânica do solo ocorrem mais lentamente. Logo, a variação do tempo de agitação é de fundamental importância para compreensão dos fenômenos que se processam a cada um dos metais pesados ensaiados.

Deve-se observar também que o fator de retardamento depende da velocidade de percolação. Logo, os valores obtidos a partir das isotermas são limites máximos, correspondentes à velocidade nula, já que no ensaio de equilíbrio em lote não

ocorre fluxo através do solo. Além disso, como o solo está em suspensão no ensaio, a superfície exposta, onde ocorrem as reações de sorção, é a maior possível, sendo máximas as oportunidades de interação. Em uma amostra de solo natural, parte da superfície das partículas está em contato com outras partículas, diminuindo a superfície disponível para a sorção (Fetter, 1993).

ENSAIO DE COLUNA

Os ensaios de coluna são os ensaios mais comumente utilizados para determinar os parâmetros de transporte de contaminantes em solo. Para a realização dos mesmos, coloca-se a amostra de solo no interior de um cilindro (coluna) e inicia-se com a percolação de água destilada através da amostra com o objetivo de saturar a mesma e determinar a sua condutividade hidráulica nesta condição. Durante o ensaio de permeabilidade com água, medem-se os volumes de entrada e de saída ao longo do tempo. Quando é atingido o regime de fluxo permanente, as vazões de entrada e de saída se igualam, e admite-se que a amostra está saturada.

Após as amostras terem atingido a saturação, o fluxo é interrompido para que a água seja substituída pela solução de contaminantes. Depois de se retirar toda a água do sistema, procede-se à saturação do mesmo com a solução de concentração conhecida. Em seguida, inicia-se a percolação desta solução através da amostra, com o mesmo gradiente hidráulico estipulado anteriormente para a percolação com água. Durante o ensaio, medem-se os volumes de entrada e saída ao longo do tempo. Os volumes coletados são armazenados em recipientes próprios de vidro, previamente esterilizados, para serem posteriormente submetidos às análises químicas para determinação das concentrações dos contaminantes em estudo, em um Espectrofotômetro de Absorção Atômica.

Com isto, traça-se a curva característica do transporte, ou seja, a curva da concentração relativa (relação entre a concentração do percolado e a concentração inicial) em função da razão entre o volume percolado (volume coletado acumulado) e o volume de vazios da amostra, que possibilita a obtenção da variação da concentração do efluente ao longo do ensaio.

A percolação com a solução prossegue até que a concentração do efluente atinja, no mínimo, metade da concentração inicial da solução, para que possa ser calculado o fator de retardamento. Para favorecer a análise dos resultados dos ensaios é interessante que a curva característica do transporte seja traçada por completo, ou seja, recomenda-se prosseguir com o ensaio até que a concentração do efluente atinja o mesmo valor da concentração inicial (Nobre, 1987).

Um esquema do ensaio e um exemplo de curva característica de transporte são mostrados na Figura 1.

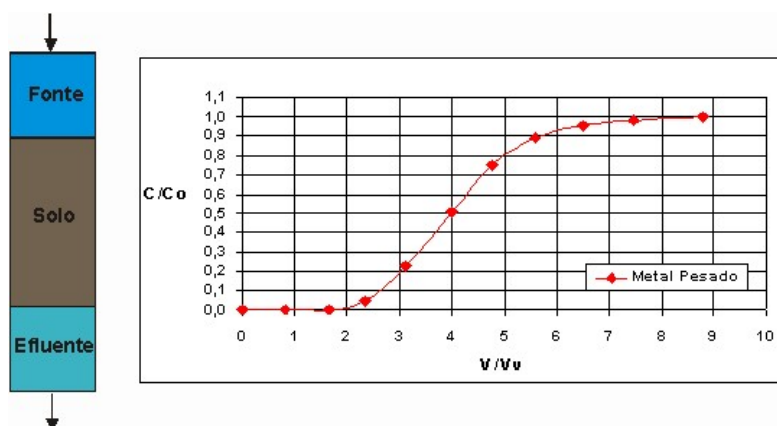


Figura 1 – Esquema do Ensaio de Coluna e Exemplo de Curva Característica do Transporte.

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

De posse de todos os dados dos ensaios de campo e laboratório iniciou-se à realização das simulações numéricas. Neste trabalho foi utilizado o programa computacional HYDRUS 2D que avalia o fluxo e o transporte bidimensional de contaminantes em meios porosos saturados e não saturados. O programa trabalha a partir do modelo da advecção/dispersão hidrodinâmica e inclui o efeito dos processos de retardamento. A partir dessa modelagem numérica buscou-se conhecer os níveis de contaminação por metais pesados (Cd, Pb, Cu, Cr e Zn).

Inicialmente, com o objetivo de comparar e validar os dados obtidos experimentalmente, realizou-se a simulação

numérica dos ensaios de coluna realizados em laboratório. Posteriormente, após a calibração do modelo computacional, passou-se à realização da simulação numérica da situação real.

Para a modelagem da situação real foi considerada como condição inicial o solo não contaminado e como condições de contorno, concentrações constantes ao longo do tempo na base da trincheira, representando o líquido lixiviado formado no interior da massa de resíduos, situação esta que dificilmente é observada na condição real de funcionamento de um ADRSU desse porte.

Os parâmetros de fluxo referentes à camada de solo não saturado foram estimados utilizando um procedimento de redes neurais incorporado ao próprio programa HYDRUS 2D.

Os parâmetros de transporte dos metais pesados: cádmio (Cd^{2+}), cobre (Cu^{2+}), chumbo (Pb^{2+}), cromo (Cr^{3+}) e zinco (Zn^{2+}), obtidos nos ensaios de coluna (com carga hidráulica $h = 102\text{ cm}$) e utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 1. Os valores dos fatores de retardamento obtidos nos ensaios de equilíbrio em lote não foram utilizados nas simulações, pois eram significativamente superiores aos obtidos nos ensaios de coluna, e não retratam a condição de fluxo real.

Tabela 1 – Parâmetros de Transporte.

Metal Pesado				
Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
Fator de Retardamento				
0,90	3,23	1,05	1,49	0,88
Coeficiente de Dispersão Hidrodinâmica – D (cm^2/s) (10^{-3})				
1,35	2,09	1,29	1,18	1,22

MONITORAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Buscando-se validar os resultados da modelagem computacional, foram instalados 4 (quatro) poços de monitoramento, cujas localizações são apresentadas na Figura 2. O objetivo desses poços é possibilitar a coleta de amostras de águas subterrâneas para realização de análises laboratoriais que evidenciarão a existência e a concentração de contaminantes.

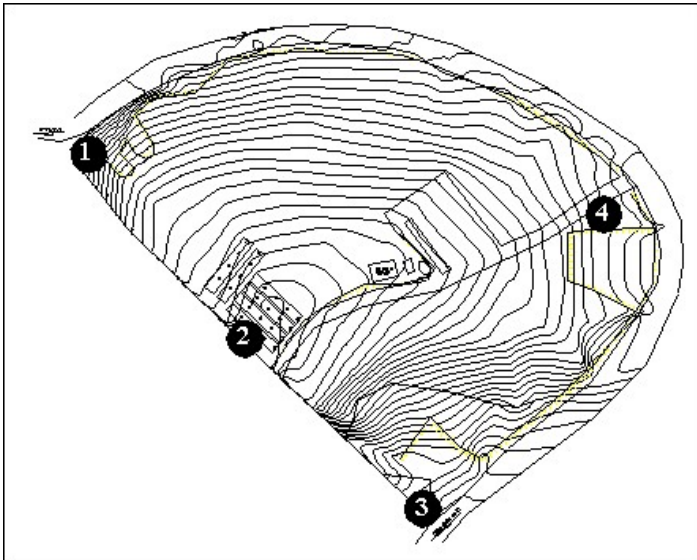


Figura 2 – Topografia da área do ADRSU e indicação da localização dos poços de monitoramento.

A Tabela 2 apresenta as características construtivas dos poços de monitoramento. Nos poços 3 e 4 não foi constatada a presença de nível de água.

Tabela 2 – Características dos Poços de Monitoramento

Poço	Profundidade (m)	Nível de água (m)	Diâmetro (cm)
1	12	8	50
2	30	28,5	60
3	12	–	40
4	12	–	40

RESULTADOS

O solo da área em estudo foi caracterizado utilizando os procedimentos preconizados pela ABNT. Os resultados dos ensaios de caracterização e mineralógicos obtidos, bem como os resultados dos ensaios de equilíbrio em lote e ensaios de coluna são apresentados em Goulart Coelho et al. (2003). A seguir são apresentados os resultados da simulação numérica do ensaio de coluna e da situação real, bem como os resultados preliminares das análises físico-químicas da água subterrânea coletada nos poços de monitoramento.

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO DE COLUNA

A Figura 3 apresenta a comparação das curvas dos metais pesados obtidas no ensaio de coluna e a curva do metal chumbo obtida a partir da calibração do modelo com o programa HYDRUS 2D. Observa-se uma boa concordância entre os resultados do ensaio e da simulação numérica para o chumbo. As calibrações dos outros metais também indicaram bons resultados.

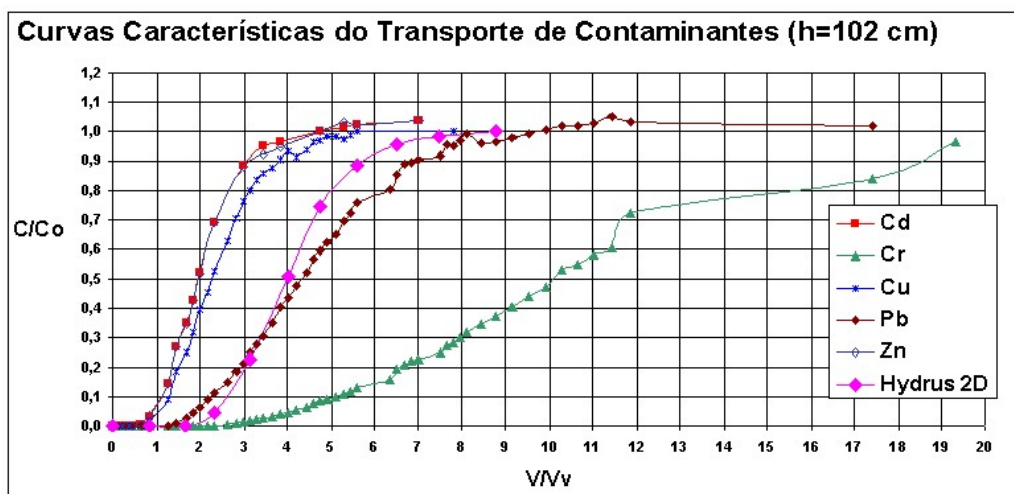


Figura 3 – Comparativo entre o Resultado Obtido pelo HYDRUS 2D e pelos Ensaios de Coluna.

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA SITUAÇÃO REAL

Os resultados aqui apresentados se referem somente à avaliação da contaminação devida a presença de uma única trincheira de resíduos e para a zona não saturada, tendo em vista a grande profundidade em que se encontra o lençol freático (aproximadamente 30 metros da superfície do terreno). A trincheira possui seção trapezoidal de profundidade 3 m.

Para a realização da simulação numérica da situação real foi utilizada a geometria e a malha de elementos finitos foi obtida pelo software HYDRUS 2D durante a etapa de pré-processamento dos dados (Figura 4).

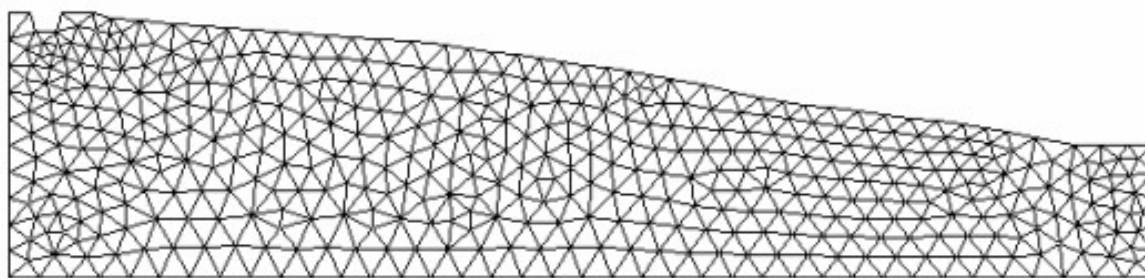


Figura 4 – Malha de Elementos Finitos da Modelagem.

A Figura 5 apresenta um exemplo de simulação da pluma de contaminação para o metal cádmio para o período de 1 ano.



Figura 5 – Exemplo de Pluma de Contaminação por Cádmio (para 1 ano).

As Figuras 6, 7, 8, 9 e 10 apresentam curvas de decaimento de cada um dos metais pesados em estudo em função da profundidade em relação à base da trincheira, para um período de um ano de simulação. No eixo das ordenadas é indicada uma concentração hipotética que corresponde à porcentagem da concentração real observada nos líquidos lixiviados no interior da trincheira. Os valores reais, obtidos no monitoramento de líquidos lixiviados das trincheiras, apresentados em Simões et. al. (2003), indicam níveis muito baixos de concentrações dos metais analisados (inferiores a 1,0 mg/L).

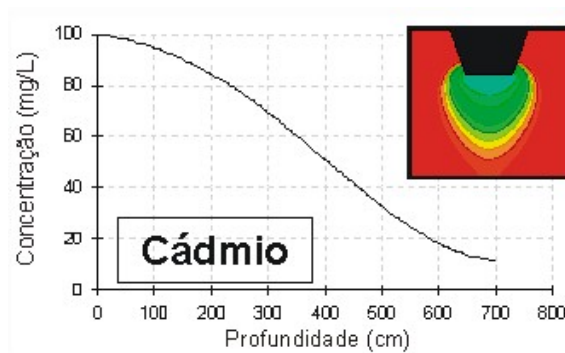


Figura 6 – Curva de Decaimento da Concentração de Cd em Função do Aumento da Profundidade para o Período de 1 Ano.

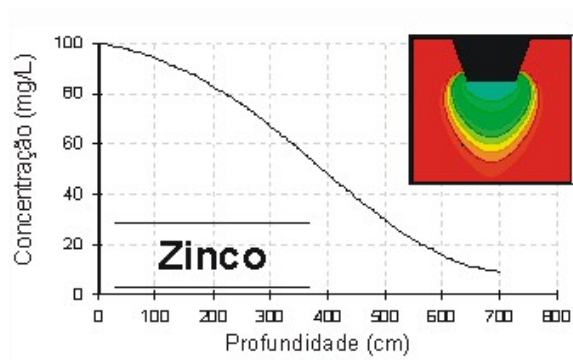


Figura 7 – Curva de Decaimento da Concentração de Zn em Função do Aumento da Profundidade para o Período de 1 Ano.

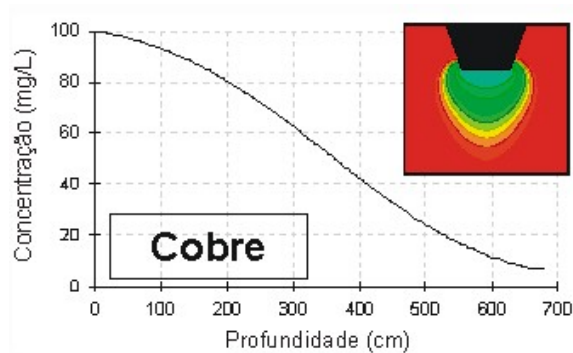


Figura 8 – Curva de Decaimento da Concentração de Cu em Função do Aumento da Profundidade para o Período de 1 Ano.

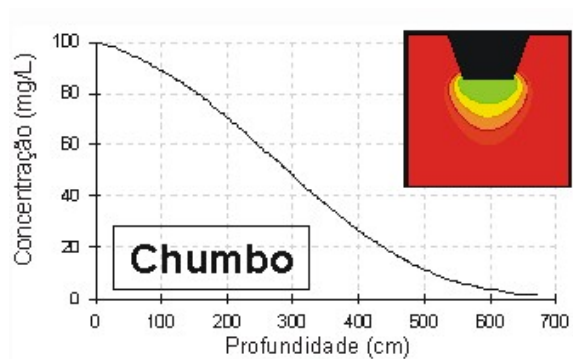


Figura 9 – Curva de Decaimento da Concentração de Pb em Função do Aumento da Profundidade para o Período de 1 Ano.

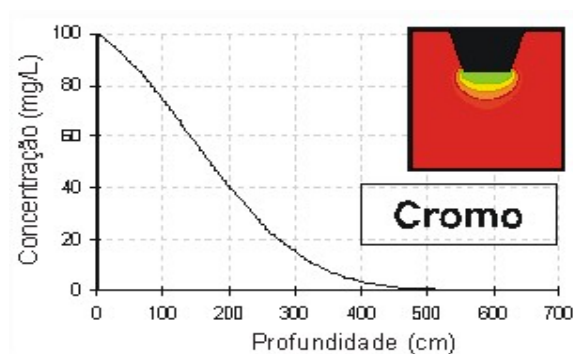


Figura 10 – Curva de Decaimento da Concentração de Cr em Função do Aumento da Profundidade para o Período de 1 Ano.

Observa-se que a medida que o fator de retardamento aumenta ($Cd < Zn < Cu < Pb < Cr$) o valor da concentração torna-se menor para uma mesma profundidade. Lange et. al. (2003) apresentam uma discussão detalhada sobre os fenômenos geoquímicos associados ao processo de retardamento desses metais pesados nos solos da área de ADRSU de Catas Altas, MG.

Com base nos registros obtidos no monitoramento de líquidos lixiviados nas trincheiras do ADRSU de Catas Altas, principalmente as reduzidas concentrações de metais e os baixos volumes de líquidos gerados, que certamente não produzirão cargas hidráulicas da ordem de um metro, como utilizado nas simulações, associado à capacidade de retenção dos metais pelos solos da área, pode-se concluir que, dificilmente, haverá contaminação das águas subterrâneas pelos metais analisados.

MONITORAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Foram coletadas amostras de água subterrânea nos poços de monitoramento para análises laboratoriais. Os resultados preliminares são apresentados no Tabela 3. Deve-se destacar tais resultados se referem apenas aos poços de monitoramento 1 e 2, uma vez que não foi encontrada água nos poços 3 e 4.

Tabela 3 – Resultados Preliminares das Análises Físico-Químicas das Amostras de Água Subterrânea Coletada nos Poços de Monitoramento

Amostragem	Poço	O.D. (mg/L)	D.Q.O. (mg/L)	pH	Al (mg/L)	Fe (mg/L)	Zn (mg/L)
14/06/02	1	5,87	19,0	6,60	$0,37 \pm 0,03$	$0,56 \pm 0,01$	$0,030 \pm 0,004$
14/06/02	2	9,10	19,0	7,81	$0,58 \pm 0,05$	$0,22 \pm 0,04$	$< 0,010$
07/06/03	1	5,45	43,0	6,30	—	—	—
07/06/03	2	6,45	28,6	6,00	—	—	—

Os resultados indicam, como esperado, que não está havendo contaminação do lençol freático e servirão como referência para a contínua avaliação dessa contaminação.

CONCLUSÕES

O trabalho apresenta os resultados numéricos de avaliação da contaminação por metais pesados na área do ADRSU de Catas Altas – MG.

Os resultados dos ensaios de laboratório associados às análises numéricas e aos dados de monitoramento de campo sugerem que dificilmente o lençol freático será contaminado pelos metais analisados.

A continuidade do estudo prevê a realização de ensaios para obtenção da curva característica de sucção dos solos da área para avaliação do fluxo real no solo não saturado, bem como a realização de simulações numéricas com os demais metais pesados e a considerando de um número maior de trincheiras.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao PROSAB (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico) por meio da FINEP, CNPq, CEF, pelo auxílio financeiro, uma vez que este projeto foi executado no âmbito do mesmo. Por fim, os autores agradecem a Prefeitura Municipal de Catas Altas por seu empenho, presteza e desejo de mudança, nas pessoas do Sr. Prefeito José Hosken e o Sr. Geraldo Queiroz, e ao consultor Eng. Eustáquio Luiz Alves Ferreira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FETTER, C. W. Contaminant Hydrogeology, Macmillian Publish Company. New York, U.S., 1993, 458 p.
2. GOULART COELHO, H. M., SIMÕES, G.F., LANGE, L.C. e FERREIRA, C.A.F. Estudo Preliminar da Contaminação por Metais Pesados na Área do Aterro de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Catas Altas – MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 5, 2003, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: [s.n.], 2003.
3. IGWMC – INTERNATIONAL GROUND WATER MODELING CENTER. Hydrus-2D Simulating Water

Flow, Heat, and Solute Transport in Two-Dimensional Variably Saturated Media, GWMC-TPS 53, California, U.S., Apr., 1999, 227 p.

4. LANGE, L.C., SIMÕES, G.F., FERREIRA, C.F.A.; GOULART COELHO, H.M. Estudo da Geoquímica de Metais Pesados em um Aterro de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos. In: 4 CONGRESSO REGIONAL DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL DA 4A REGIÃO DA AIDIS / CONE SUL E ENCONTRO LATINO AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2003, São Paulo. Anais do 4 Congresso Regional de Engenharia Sanitária e Ambiental da 4a Região da AIDIS / Cone Sul. 2003. v. 1, p. 256-264
5. NOBRE, M. M. M. Estudo Experimental do Transporte de Poluentes em Solos Argilosos Compactados. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, PUC-RIO. Rio de Janeiro, Brasil, 1987, 214 p.
6. SIMÕES, G.F., LANGE, L.C., FERREIRA, C.A.F., SILVA, F.V.B., GOULART COELHO, H. M., GARCIA, L.N. e SANTANA, D.W.E.A. Monitoramento Ambiental e Geotécnico de um Aterro de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos de uma Pequena Comunidade. Estudo de Caso do Município de Catas Altas – MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 5, 2003, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: [s.n.], 2003.