

## **Modelagem da dispersão de contaminantes metálicos em um aterro de resíduos sólidos urbanos**

## **Modeling of metallic contaminant dispersion in a municipal solid waste disposal site**

## **Modelado de la dispersión de contaminantes metálicos en un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos**

DOI: 10.54033/cadpedv22n7-021

Originals received: 4/2/2025

Acceptance for publication: 4/25//2025

---

### **Tiago de Moraes Faria Novais**

Doutor em Engenharia Civil

Instituição: Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)

Endereço: Divinópolis, Minas Gerais, Brasil

E-mail: tiago.novais@uemg.br

### **Mauro César Cardoso Cruz**

Mestre em Engenharia Civil

Instituição: Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)

Endereço: Divinópolis, Minas Gerais, Brasil

E-mail: mauro.cruz@uemg.br

### **Gisele Pereira Moraes**

Graduanda em Engenharia Civil

Instituição: Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)

Endereço: Divinópolis, Minas Gerais, Brasil

E-mail: gisele.1695794@discente.uemg.br

### **Samara Lourenço Machado**

Graduanda em Engenharia Civil

Instituição: Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG)

Endereço: Divinópolis, Minas Gerais, Brasil

E-mail: samara.1695894@discente.uemg.br

---

## **RESUMO**

A disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos é uma fonte relevante de contaminação de solos e águas subterrâneas. Este estudo teve como objetivo modelar a dispersão de contaminantes metálicos (zinco, cromo e níquel) em uma área de disposição final de resíduos sólidos no município de Divinópolis, Minas Gerais. Para isso, foram realizadas coletas de amostras de solo e resíduos,

análises laboratoriais e aplicação dos modelos MODFLOW e MT3DMS para simulação da mobilidade dos metais em meio saturado. Os resultados indicaram variações significativas de concentração com a profundidade e evidenciaram a atuação de processos de advecção, dispersão e sorção. A modelagem demonstrou a importância do recobrimento periódico dos resíduos como barreira à mobilidade dos contaminantes. Conclui-se que a modelagem ambiental é ferramenta fundamental para o planejamento e monitoramento de áreas de disposição de resíduos.

**Palavras-chave:** Contaminação Ambiental. Resíduos Sólidos Urbanos. Modelagem Computacional. MODFLOW. MT3DMS.

### ABSTRACT

Improper disposal of municipal solid waste is a significant source of soil and groundwater contamination. This study aimed to model the dispersion of metallic contaminants (zinc, chromium, and nickel) in a municipal solid waste disposal site located in Divinópolis, Minas Gerais, Brazil. Soil and waste samples were collected, laboratory analyses were performed, and the MODFLOW and MT3DMS models were applied to simulate contaminant mobility in saturated media. Results indicated significant variations in metal concentrations with depth and highlighted the influence of advection, dispersion, and sorption processes. Modeling revealed that periodic waste covering acts as a barrier to contaminant migration. Environmental modeling is concluded to be a crucial tool for the planning and monitoring of waste disposal sites.

**Keywords:** Environmental Contamination. Municipal Solid Waste. Computational Modeling. MODFLOW. MT3DMS.

### RESUMEN

La disposición inadecuada de residuos sólidos urbanos constituye una fuente significativa de contaminación de suelos y aguas subterráneas. Este estudio tuvo como objetivo modelar la dispersión de contaminantes metálicos (zinc, cromo y níquel) en un sitio de disposición final de residuos sólidos en el municipio de Divinópolis, Minas Gerais, Brasil. Se realizaron muestreos de suelo y residuos, análisis de laboratorio y la aplicación de los modelos MODFLOW y MT3DMS para simular la movilidad de los contaminantes en medios saturados. Los resultados mostraron variaciones significativas de concentración con la profundidad y evidenciaron la influencia de procesos de advección, dispersión y sorción. La modelación reveló que el recubrimiento periódico de los residuos actúa como barrera para la migración de contaminantes. Se concluye que la modelación ambiental es una herramienta fundamental para el planeamiento y monitoreo de sitios de disposición de residuos.

**Palabras clave:** Contaminación Ambiental. Resíduos Sólidos Urbanos. Modelado Computacional. MODFLOW. MT3DMS.

## 1 INTRODUÇÃO

A contaminação ambiental devido às ações antropogênicas tem sido um problema recorrente no planeta, tendo se agravado após a segunda fase da revolução industrial no século XIX. O comprometimento do meio ambiente por meio de diversas formas de poluição requer medidas de mitigação e remediação equivalentes ao impacto ambiental ocasionado, sendo, portanto, de suma importância a quantificação e a qualificação dos impactos ambientais ocasionados no meio natural, tanto por meio de técnicas consolidadas, quanto em processo de desenvolvimento, decorrentes da constante evolução do conhecimento humano.

Uma área pode ser caracterizada como contaminada por diferentes metodologias, que se baseiam em critérios qualitativos e quantitativos, constantes nos dispositivos legais, específicos de cada país, no qual essa área está inserida. O número de áreas contaminadas é reflexo de investimentos e políticas públicas de cada região política e geográfica, sujeitas às pressões governamentais e mercadológicas, muitas vezes comprometidas prioritariamente com o desenvolvimento econômico e financeiro em detrimento da manutenção e proteção ambiental (Xu & Liu, 2009).

Contudo, para que as técnicas adequadas de remediação sejam implantadas é necessário que seja determinada a natureza da fonte contaminante, uma vez que o conhecimento das propriedades físicas, químicas e biológicas é primordial para a compreensão da dinâmica da evolução espaço-temporal da área contaminada (Sorvari e Seppälä, 2010).

A disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos (RSU) constitui um problema recorrente em diversos países e, no Brasil, tem sido alvo de recentes legislações com o objetivo de reduzir os locais de disposição inadequada de resíduos, devido ao inadequado controle do potencial poluidor, sendo fonte de impactos ambientais diversos. Estima-se que cerca de 50,8% dos 5.564 municípios brasileiros disponham seus resíduos sólidos urbanos em locais inadequados, denominados vazadouros a céu aberto ou lixões (IBGE, 2011).

A compreensão dos mecanismos e processos resultantes da contaminação de águas subterrâneas, em consequência da contaminação dos solos, caracteriza-se como uma necessidade inerente à concepção de aterros sanitários e locais corretos de disposição final de resíduos sólidos. A implantação destes empreendimentos requer que sejam controlados os meios de poluição decorrentes da natureza dos resíduos dispostos, dentre os quais os percolados líquidos, ricos em matéria orgânica e substâncias nocivas à qualidade das águas e dos recursos naturais diversos.

Nesse contexto, analisar qualitativa e quantitativamente esta forma de contaminação constitui-se como um dos principais objetivos de pesquisas acadêmicas e científicas relacionadas à modelagem ambiental, possibilitando a formulação de normas, legislações e técnicas que atentem para a proteção eficiente dos meios de contaminação em áreas de disposição de resíduos sólidos.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é aplicar os modelos MODFLOW e MT3DMS na simulação da dispersão de contaminantes metálicos em uma área de disposição final de resíduos sólidos localizada no município de Divinópolis, Minas Gerais, de modo a contribuir para a compreensão dos mecanismos de transporte de contaminantes em meio saturado.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A fonte de contaminação e as características originais do meio ambiente são apontadas como o limiar de investigação de áreas contaminadas. A legislação, em diversos países, indica como condicionantes para a classificação como área contaminada, as propriedades originais do solo ou da água, utilizando-se de valores de concentração de substâncias químicas ou biológicas como referência para a confirmação de determinado local como contaminado (Zabeo et al., 2011). A avaliação das metodologias de investigação e análise está intrinsecamente correlacionada às condições tecnológicas disponíveis e limites impostos por órgãos ou agências reguladoras (Aller et al., 1987). Assim, o conceito de contaminação difere conforme a localidade e pode se basear em condições que priorizam à proteção do solo, da água e/ou do ar.

Em alguns países, a classificação de uma área como contaminada se dá pela característica da área e do risco associado à mesma. Nos Estados Unidos, a caracterização de uma área contaminada pode ser feita em diferentes categorias, segundo a USEPA (2016):

- **Superfund:** locais sem controle ou abandonados que possuem potencial poluidor;
- **Brownfields:** áreas, normalmente não pertencentes ao poder público, que apresentam risco de contaminação;
- **Resource Conservation and Recovery Act:** regulam áreas que podem apresentar contaminação em andamento, mas que possuem plano de gestão e recuperação;
- **UST's:** Tanques de Armazenamento Subterrâneo, caracterizados por áreas com contaminação de petróleo ou outras substâncias nocivas;
- **Federal Facilities:** áreas contaminadas de propriedade do poder público federal;
- **State Sites:** locais contaminados em poder dos estados da federação.

Na União Europeia, a classificação de áreas contaminadas é realizada pela European Environment Agency (EEA), dividindo-se em áreas potencialmente contaminadas e áreas contaminadas (Brombal et al., 2015). A metodologia envolve pesquisa preliminar, investigação preliminar do local e investigação principal do local (EEA, 2000).

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) define critérios e valores de concentração de contaminantes no solo por meio da Resolução nº 420 de 2009 (CONAMA, 2009), classificando as áreas em: Área Suspeita de Contaminação (AS), Área Contaminada sob Investigação (AI), Área Contaminada sob Intervenção (ACI) e Área em Processo de Monitoramento para Reabilitação (AMR).

A contaminação de águas superficiais e subterrâneas decorrente da disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos é amplamente estudada, com destaque para as pesquisas de Gwenzi et al. (2016), Li et al. (2014), Aydi (2015) e Butt et al. (2014).

A dispersão de contaminantes metálicos em meios saturados e não saturados constitui objeto de vários estudos. O transporte de contaminantes depende dos processos de advecção, dispersão, difusão molecular, sorção, precipitação e complexação (Jesus, 2009), que devem ser devidamente modelados para simular seu comportamento em ambientes porosos.

Os desafios da modelagem envolvem a ponderação de múltiplas variáveis de interação, tendo os modelos matemáticos e computacionais desempenhado um papel crucial (Wang et al., 2015). Entre os modelos mais consolidados, destacam-se o MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988), o MODPATH (Pollock, 1994) e o MT3DMS (Zheng, 2004).

O modelo MODFLOW realiza a simulação de fluxo saturado via elementos finitos; o MODPATH realiza a análise do trajeto das partículas no meio saturado; e o MT3DMS simula a advecção, dispersão e reações químicas de múltiplos constituintes dissolvidos.

Pesquisas como as de Nezhad et al. (2011), Bieda (2013), Zhu et al. (2012), Bakis & Tuncan (2011) e Wu et al. (2015) abordaram a mobilidade de metais pesados em solos contaminados, a heterogeneidade dos meios porosos e os impactos da zona vadosa na mobilidade de contaminantes.

### 3 METODOLOGIA

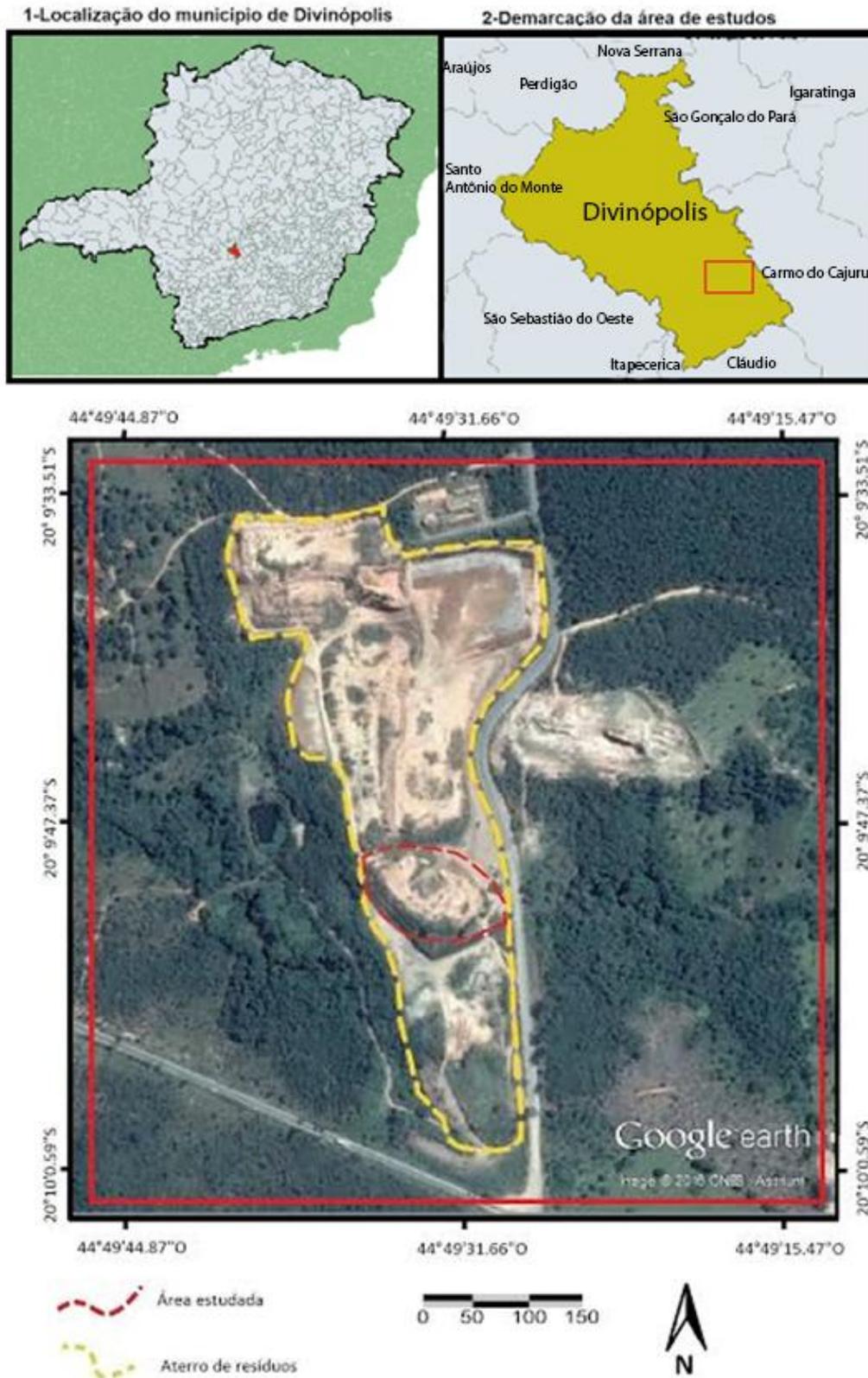
Para a realização desta pesquisa, a metodologia do trabalho foi dividida em quatro etapas sequencialmente interligadas: escolha do local de estudo, instrumentação e coleta de amostras, análises laboratoriais e modelagem. Assim, algumas suposições foram consideradas para a elaboração desta pesquisa:

- O local de estudo é constituído por meios porosos: solo e resíduos sólidos;
- Os resíduos sólidos dispostos no vazadouro são de natureza orgânica e inorgânica, sendo assumidos como a fonte dos elementos metálicos analisados;
- O volume de resíduos foi considerado como um meio poroso saturado.

### 3.1 ESCOLHA DA ÁREA DE ESTUDO

Nesta pesquisa, foi escolhido como área de estudo o local de disposição final de resíduos sólidos urbanos gerados no município de Divinópolis, Minas Gerais. O local recebe, diariamente, cerca de 165 toneladas de resíduos sem qualquer controle tecnológico de proteção ambiental, como impermeabilização de base nas valas de aterramento, drenagem de líquido percolado e gases, limitando-se apenas à quantificação do recebimento (uma vez que a coleta é prestada por empresa privada) e ao controle de acesso às dependências do local. O referido vazadouro possui, ao todo, aproximadamente nove hectares de área e localiza-se a oito quilômetros do centro da zona urbana do município. Sua operação, de acordo com informações da Secretaria de Meio Ambiente do município, data de aproximadamente trinta anos, com a ausência de meios de mitigação de seu potencial poluidor. Por possuir uma extensa área de disposição, optou-se neste estudo por delimitar uma fração do referido vazadouro, tendo sido escolhida uma área de resíduos recentemente aterrados e cuja operação se encerrou em 2013. A área escolhida localiza-se na fração inferior esquerda do local de disposição, totalizando 0,6 hectares. É possível observar o vazadouro, sua localização e a área escolhida para este estudo na Figura 1.

Figura 1: Localização da área de estudo



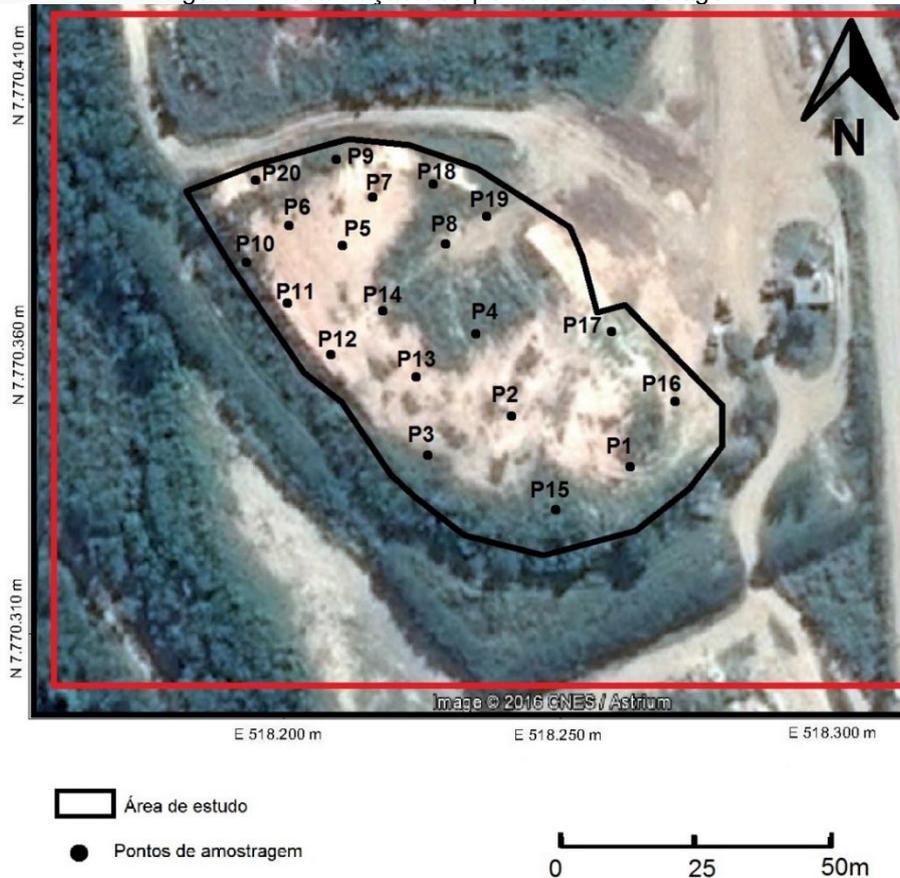
Fonte: Elaboração dos autores/Google Earth/IBGE

### 3.2 INSTRUMENTAÇÃO E COLETA DE AMOSTRAS

Dentro da área escolhida, foram utilizados 20 (vinte) pontos de amostragem, cuja localização buscou a abrangência de todo o espaço delimitado pelo perímetro do local de estudo. Nesses referidos pontos foram realizadas coletas de material (resíduos e solo) com a utilização do ensaio SPT (Standard Penetration Test, ou teste de penetração padrão) seguindo as prescrições normatizadas pela NBR 6484 (ABNT, 2001).

Foram coletadas duzentas e quarenta amostras entre 300 a 400 gramas cada uma, por metro de profundidade, perfazendo um total de 12 metros em cada ponto amostrado. O material coletado foi armazenado em recipientes plásticos lacrados, protegidos da luz solar e mantidos sob refrigeração constante, em temperaturas próximas de 4°C, conforme especificado por Byrnes (2009), seguindo o recomendado para a manutenção das propriedades químicas e biológicas em amostras de material orgânico. A fim de obter parâmetros de comparação, foram utilizados como referência de concentração os valores orientadores especificados no anexo II da Resolução Nº 420 de 2009 do CONAMA. Após cada coleta, as amostras foram imediatamente levadas ao laboratório de matéria orgânica do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa a fim de quantificar as concentrações dos componentes estudados neste trabalho. A Figura 2 ilustra a fração da área estudada com os respectivos pontos de amostragem.

Figura 2: Localização dos pontos de amostragem



Fonte: Elaboração dos autores/Google Earth

### 3.3 ANÁLISES LABORATORIAIS

As análises químicas foram realizadas no laboratório de matéria orgânica e resíduos da Universidade Federal de Viçosa, onde as metodologias de determinação dos elementos seguiram o disposto por Rocha (2008). Para o desenvolvimento do presente estudo, foram escolhidos os elementos Zinco (Zn), Cromo (Cr) e Níquel (Ni), tidos, por Kulikowska et al (2015) e Luo et al (2015), como metais com sistemática presença em solos em meio urbano, em virtude de disposição de resíduos sólidos e outras fontes de origem de atividades antropogênicas. Em conjunto a essas análises, também foram determinadas a densidade seca e o pH de cada amostra, de forma a permitir, posteriormente, a aplicação de modelos pré-estabelecidos.

Para a quantificação dos parâmetros citados, primeiramente foram extraídos os metais  $Zn^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$  e  $Ni^{2+}$  procedendo-se com as seguintes etapas:

digestão com Água Régia concentrada ( $1HNO_3:3HCl$ , v/v), extraíveis por Mehlich-1 e por EDTA (MURAOKA, 1983), e solúvel em água deionizada (relação sólidos: solução 1:2,5, agitação por 1 h). Os valores obtidos pelo extrator Água Régia forneceram estimativas dos teores totais dos elementos. Na determinação dos elementos foi utilizado um espectrômetro de emissão atômica com plasma de argônio acoplado (ICP-AES), Perkin Elmer – Optima 3300 DVTM Spectrometer. Empregaram-se as linhas espectrais: Ni-231,604 nm, Cd-214,440 nm, Zn- 213,857 nm e Cr-267,716 nm.

### 3.4 MODELAGEM

O transporte de contaminantes metálicos foi simulado utilizando-se um software de modelagem tridimensional de águas subterrâneas e transporte de contaminantes em meios variavelmente saturados, heterogêneos e sujeitos a condições de contorno definidas por ferramentas como MODFLOW, MODPATH e MT3DMS (ZHOU *et al.*, 2014). O software Visual Modflow (versão 2015.1, da Waterloo Hydrogeologic, Nova Metrix LLC) foi adotado neste estudo e possui as ferramentas descritas. O modelo MODFLOW de fluxo de líquidos também utilizado neste estudo com o auxílio do software, pode ser resumido pela Equação 1, descrita por Harbaugh (2005):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Em que

$K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$  são os valores de condutividade hidráulica ao longo dos eixos x, y e z respectivamente;

h é a superfície potenciométrica (em  $L \cdot T^{-1}$ );

W é o fluxo volumétrico por unidade de volume que sai ou ingressa no sistema, sendo  $W > 0$  para o fluxo que sai do sistema e  $W < 0$  para o fluxo que adentra o sistema ( $L^{-1}$ );

$S_s$  caracteriza o acúmulo específico do meio poroso ( $L^{-1}$ ) e t denota o tempo (T).

O modelo de dispersão de contaminantes MT3DMS segue o modelo descrito por Zheng & Wang (2000), demonstrado na Equação 4.2:

$$\frac{\partial(\theta)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad (2)$$

Na referida Equação 2,

$C^k$  denota a concentração do contaminante no fluido ( $m. L^{-3}$ );

$\theta$  é a porosidade do meio (adimensional);  $t$  denota o tempo ( $t$ );

$x_i$  é a distância nas referidas coordenadas cartesianas (L);

$D_{ij}$  é o coeficiente de dispersão hidrodinâmica ( $L^2. t^{-1}$ );

$v_i$  é a infiltração ou a velocidade linear no meio poroso ( $L. t^{-1}$ );

$q_s$  representa o fluxo volumétrico por unidade de volume de água subterrânea que adentra ou sai do sistema ( $t^{-1}$ );

$C_s$  é a concentração da fonte de entrada ou saída de fluido ( $m. L^{-3}$ ) e

$\sum R_n$  representa o termo de reação química ( $m. l^{-3}. t^{-1}$ ).

A resolução das equações de fluxo e de dispersão de contaminantes foi realizada utilizando-se do método de elementos finitos, em uma malha tridimensional de células cúbicas com um metro de aresta. Assim, a aplicação das equações supracitadas valeu-se da interação entre as células obtidas na estratificação da área estudada, cujos parâmetros químicos e hidrogeológicos foram considerados como interdependentes para a modelagem.

A adsorção dos elementos metálicos caracteriza-se pelo acúmulo na interface solo-solução, a qual pode ser simulada por diferentes metodologias (LINHARES et al, 2010). Neste trabalho foi utilizado o modelo de Freundlich, amplamente utilizado e caracterizado pela capacidade máxima de retenção de substâncias na superfície da interface solo, conforme descrito na Equação 3.

$$q = k_F. C_{eq}^{1/n} \quad (3)$$

Na Equação acima,

q: é a quantidade de metal adsorvido em  $\mu g. g^{-1}$  de solo;  
 $C_{eq}$  é a concentração do metal na solução de equilíbrio em  $\mu g. ml^{-1}$ ;  
 b é a capacidade máxima de adsorção ( $\mu g. g^{-1}$ );  
 k é a constante relacionada com a energia de ligação ( $\mu g. ml^{-1}$ ) do metal no solo;  
 KF e o coeficiente de adsorção de Freundlich, intercepto que indica a capacidade de um solo em reter um soluto ( $\mu g. g^{-1}$ ), e  
 n é um parâmetro adimensional, que indica a afinidade do solo pelo soluto (CAIRES, 2009).

Por fim, ressalta-se que a espacialização inicial dos dados foi realizada procedendo-se com a krigagem ordinária na área de estudo.

### 3.4 CONCEPÇÃO DO MODELO HIDROGEOLÓGICO

Tendo em vista a modelagem descrita no item anterior, foi necessária a obtenção de parâmetros hidrogeológicos por meio de estudos prévios realizados na área pesquisada ou em locais, cujas características geológicas fossem semelhantes ao estudo de caso. Assim, os parâmetros e variáveis utilizados neste estudo foram obtidos nas referências descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros considerados na modelagem

Parâmetro	Referência
Permeabilidade de argissolos	Fineza (2015)
Permeabilidade e densidade de resíduos sólidos	Rocha (2008)
Coefficientes de acúmulo específico de meios porosos	Fineza (2015), Iritani (1999)
Recarga de fluxo subterrâneo	Fineza (2015), Pizarro (2009)
Parâmetros de adsorção de Freundlich	Linhares <i>et al.</i> (2010), Braz (2011), Jesus (2009)

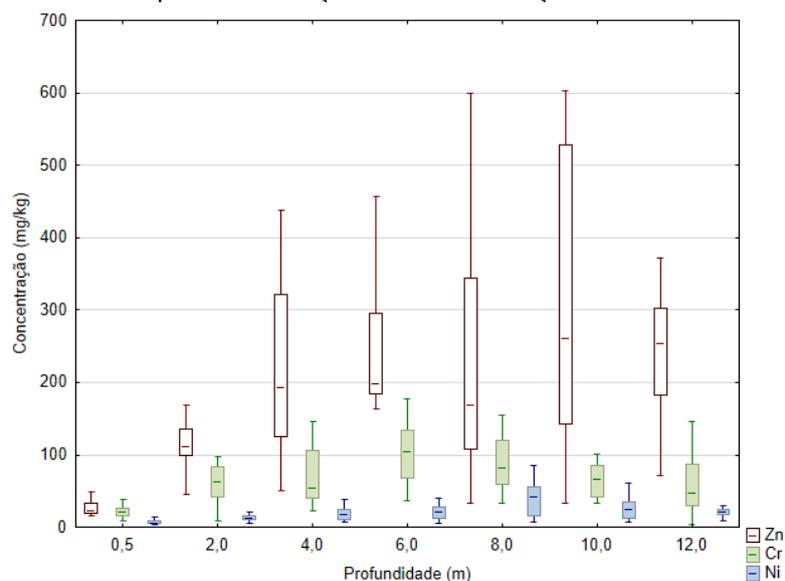
Fonte: Elaboração dos autores

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os elementos zinco, cromo e níquel foram encontrados em concentrações variáveis ao longo das profundidades dos pontos amostrados. O zinco foi encontrado em concentrações que variam entre 20 e 603  $mg. kg^{-1}$ . Conforme a Resolução CONAMA Nº 420 de 2009, o valor de referência para a concentração de prevenção do referido elemento no solo é de 300  $mg. kg^{-1}$ . Esse valor de

referência de concentração do solo conforme a referida resolução para o elemento cromo é de  $75 \text{ mg.kg}^{-1}$ , o qual pôde ser constatado, neste estudo, em concentrações entre  $14$  e  $180 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Por fim, o elemento níquel tem como valor de referência (ainda conforme a resolução do CONAMA), a concentração de  $30 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Assim, as concentrações de níquel encontradas variam entre  $3$  e  $90 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Em todos os pontos de amostragem foram evidenciadas concentrações relativamente menores nas camadas superficiais, em profundidades não superiores a  $2$  metros. A camada superficial, composta de material de recobrimento, naturalmente tende a apresentar valores de concentração menores, uma vez que sua contaminação por fontes dos metais analisados se faz pouco presente. Já nas camadas mais profundas, as concentrações encontradas foram significativamente maiores, possivelmente em função de processos de percolação e transporte de metais ocorridos ao longo da vida útil da referida área. Essa variação das concentrações dos metais analisados caracteriza e indica a hipótese de que os processos de advecção, dispersão e sorção no maciço de resíduos desta pesquisa encontram-se em atividade, cuja dinâmica e intensidade dependem das especificidades do meio contaminado e dos contaminantes. Na Figura 3 é apresentado um gráfico que demonstra a variação dos valores encontrados neste estudo para os metais analisados.

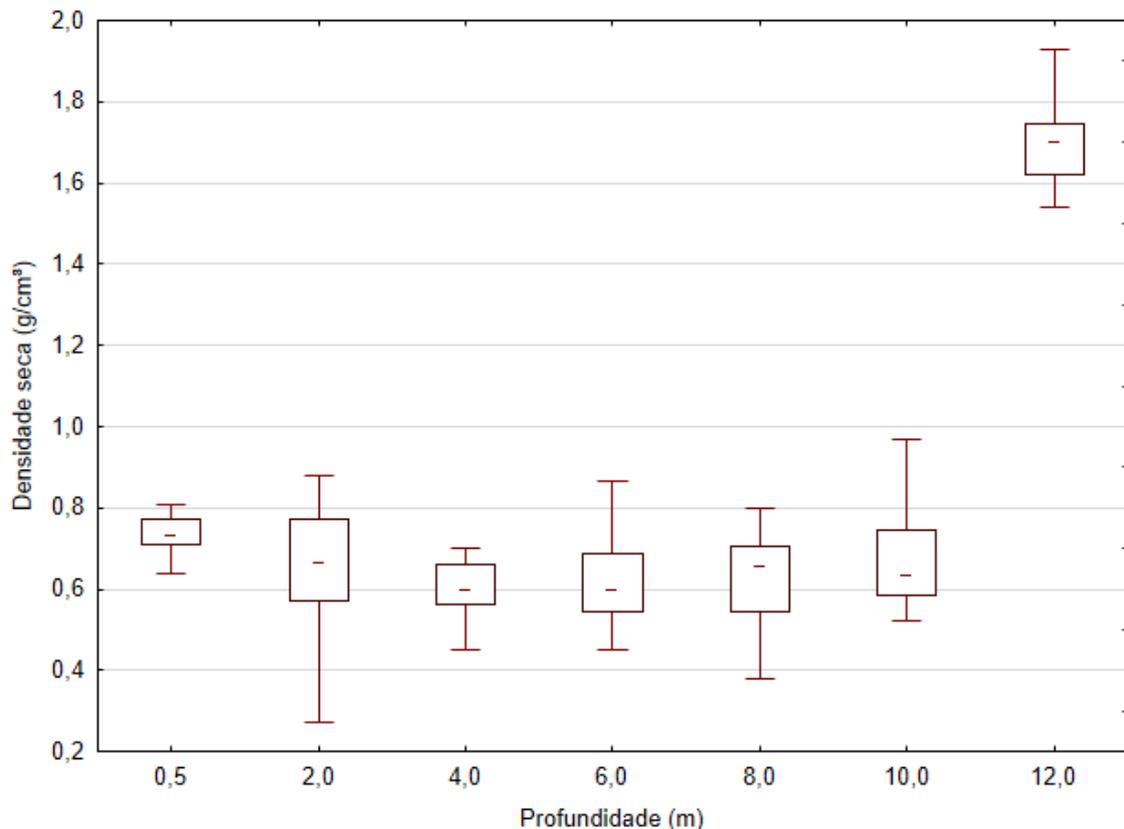
Figura 3: Gráfico box-plot das variações de concentração dos elementos analisados



Fonte: Elaboração dos autores

Ao serem analisadas as densidades secas dos materiais amostrados, pode ser reforçada a hipótese de que as camadas mais profundas (cerca de 12 metros) são compostas de solo natural, uma vez que a diferença entre os valores de densidades em profundidades intermediárias difere de forma significativa, sendo evidenciadas no gráfico da Figura 4.

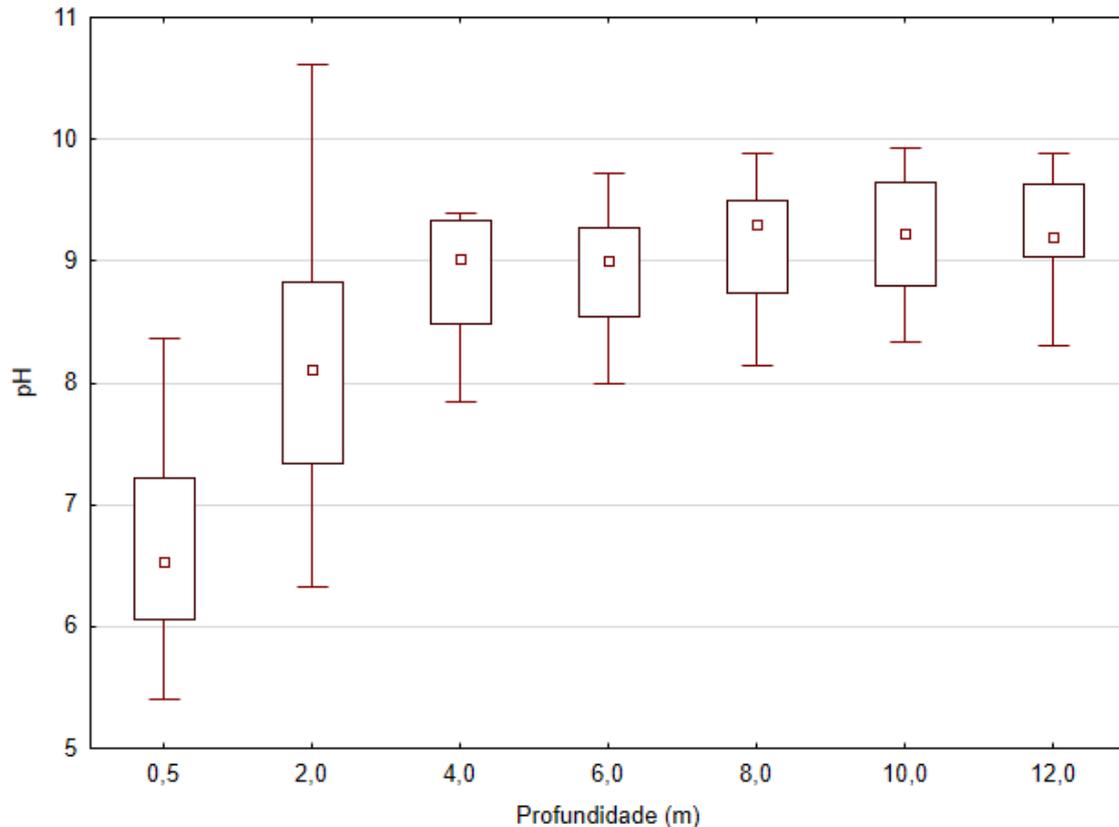
Figura 4: Gráfico box-plot da variação de densidade seca ao longo das profundidades analisadas



Fonte: Elaboração dos autores

Para a aplicação do modelo pretendido neste estudo, o MT3DMS, foi necessária a espacialização das concentrações dos elementos estudados, sendo o princípio da simulação de dispersão de contaminantes. No entanto, a determinação do pH das amostras constitui-se como etapa imprescindível para a aplicação dos parâmetros (como coeficientes de dispersão e adsorção) no referido modelo. Assim, foram obtidos, nos vinte pontos de amostragem em suas respectivas profundidades, os valores de pH especificados no gráfico da Figura 5.

Figura 5: Gráfico box-plot da variação de pH ao longo das profundidades analisadas

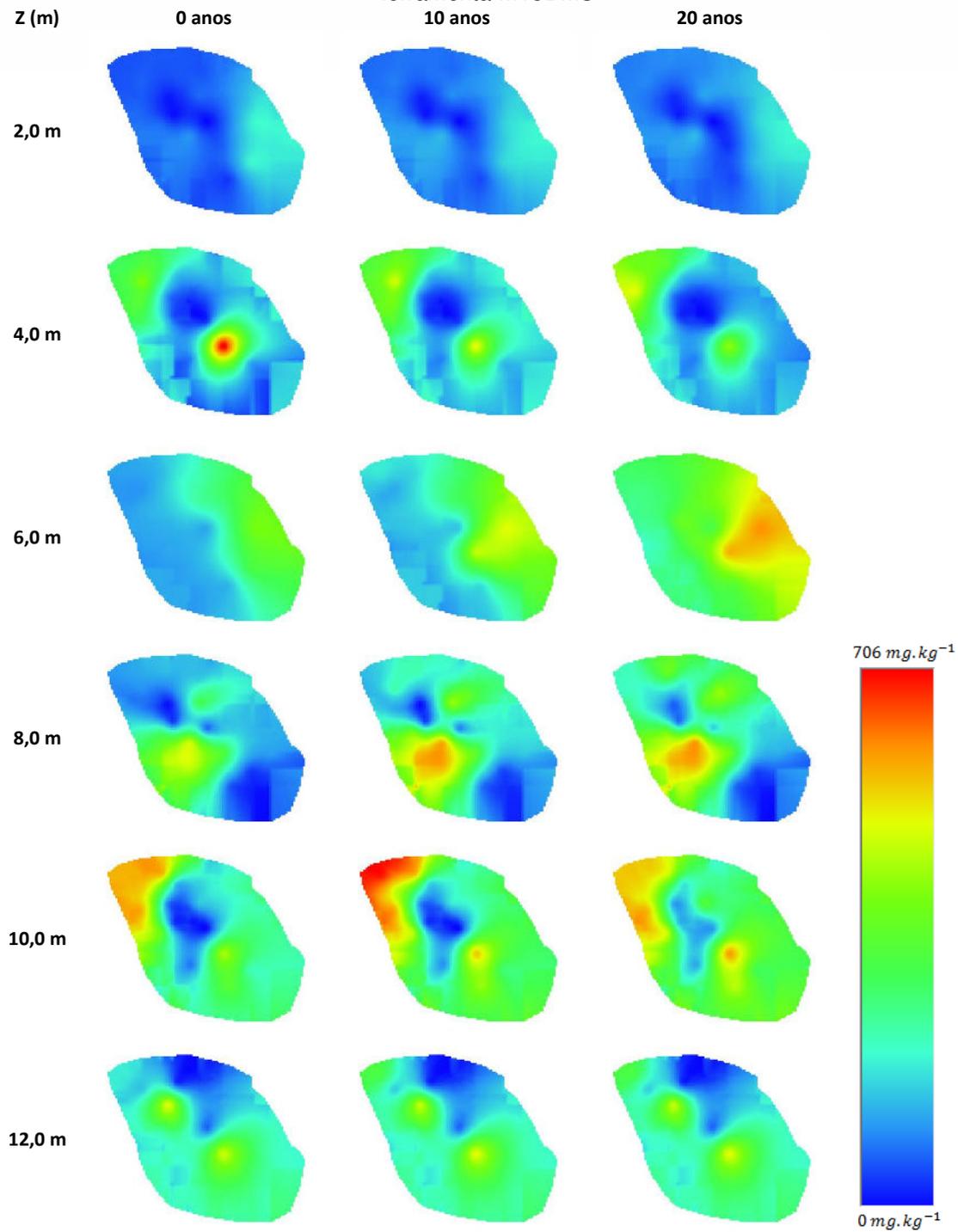


Fonte: Elaboração dos autores

Percebe-se que os valores de pH evidenciam meios básicos em maiores profundidades, provavelmente explicados pela idade dos resíduos dispostos nestas camadas, tendo sido degradados por meios anaeróbios e, possivelmente, estabilizados. Estes valores compreendem ponto vital de caracterização da dispersão dos elementos metálicos, uma vez que denotam propriedades do meio analisado, como os coeficientes de dispersão e de sorção, além das curvas de calibração dos contaminantes escolhidos neste trabalho, obtidos nos estudos de Braz (2011).

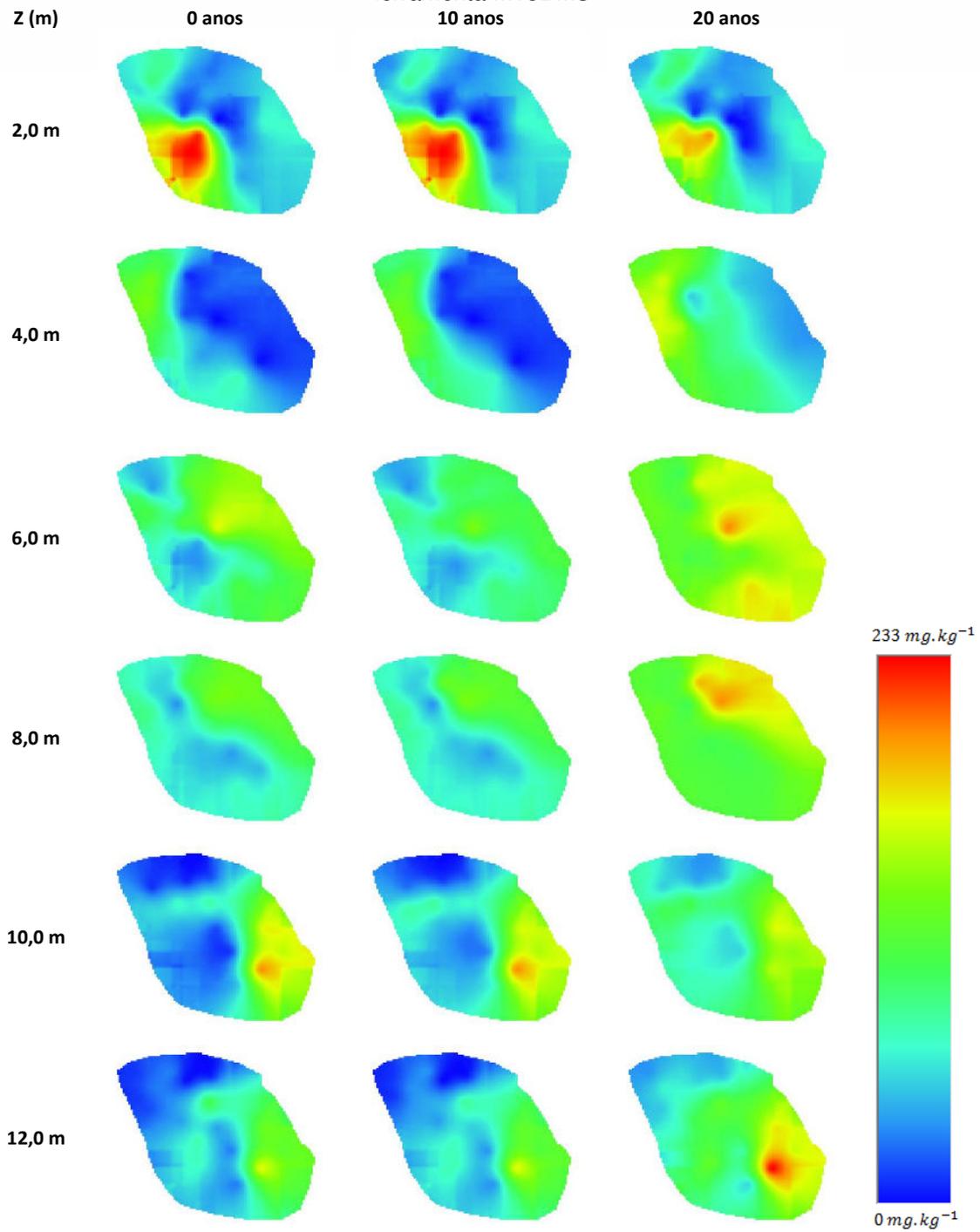
Ao se proceder com a interpolação dos valores obtidos dos metais, com a krigagem dos resultados espacializados, foram obtidos os mapas de concentrações dos três elementos quantificados, possibilitando uma visualização da situação no tempo inicial, caracterizado pelo início da simulação. A aplicação do modelo MT3DMS para a simulação da mobilidade dos elementos pode ser visualizada nas Figuras 6, 7 e 8.

Figura 6: Simulação da variação das concentrações de Zinco ao longo de 20 anos com a ferramenta MT3DMS



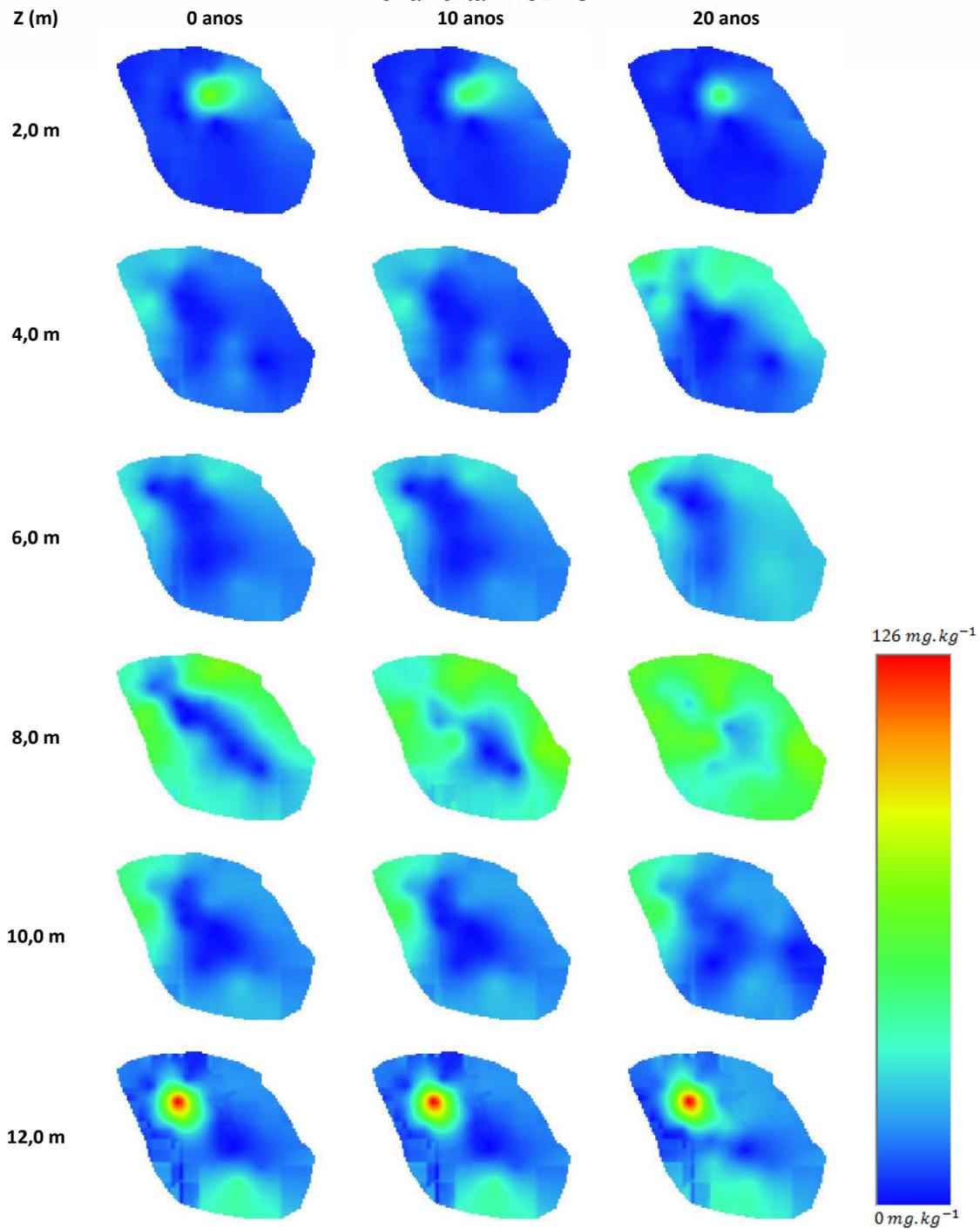
Fonte: Elaboração dos autores

Figura 7: Simulação da variação das concentrações de Cromo ao longo de 20 anos com a ferramenta MT3DMS



Fonte: Elaboração dos autores

Figura 8: Simulação da variação das concentrações de Níquel ao longo de 20 anos com a ferramenta MT3DMS



Fonte: Elaboração dos autores

É possível observar nas Figuras 6, 7 e 8, que a variação das concentrações nas diferentes profundidades, ao longo de 20 anos de simulação se mostra significativa, evidenciando uma considerável mobilidade dos

contaminantes metálicos no volume estudado. A variação das concentrações de zinco se mostrou mais intensa nas profundidades de 4 e 6 metros, fato observado de forma similar para o cromo nas profundidades 4, 6 e 8 metros e para o níquel a 8 metros de profundidade. O zinco, na profundidade de 4 metros e segundo o modelo, deve reduzir sua concentração ao longo dos 20 anos de simulação, fato inverso evidenciado nas profundidades de 6, 8 e 10 metros, provavelmente em função da migração da concentração de camadas superiores.

Analisando as variações de concentração do cromo, evidencia-se um aumento de concentração do referido metal nas profundidades de 4, 6 e 8 metros, cuja explicação pode se dar pela redução da presença deste elemento na superfície, caracterizada como a camada de maior concentração observada. A mobilidade do cromo na profundidade de 12 metros é um fator significativo neste estudo, uma vez que sua capacidade de contaminação e potencial poluidor são de grande impacto ao subsolo estudado.

As concentrações do elemento níquel foram as menores dentre os contaminantes analisados neste estudo, alcançando uma concentração máxima de  $126 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Contudo, a camada mais atingida por sua mobilidade pode ser descrita como a de 4 metros de profundidade, tida como a de maior variação de sua concentração ao longo da simulação. A justificativa para esse fato pode estar contida na evidente migração horizontal deste elemento, distinta dos demais analisados neste estudo, caracterizados pela migração vertical contínua na simulação da modelagem proposta.

Todavia, todos os elementos apresentaram uma menor concentração aos 4 metros de profundidade (se comparado com o restante do vazadouro), possivelmente evidenciando uma descontinuidade da disposição de resíduos, caracterizada por uma fina camada de recobrimento. É importante ressaltar que nesse local de estudo não eram feitos os recobrimentos regulares dos resíduos sólidos, tendo sido iniciados apenas após a Deliberação Normativa do COPAM Nº 52, de 2001. Assim, esta descontinuidade pode caracterizar-se como uma barreira à dispersão dos contaminantes situados nas camadas superiores, denotadas por resíduos sólidos mais recentes. De um modo geral, a migração dos contaminantes presentes nas camadas superiores aos 4 metros de

profundidade evidencia a continuidade do processo de contaminação da área, ilustrada pelo aumento das concentrações em períodos de 20 anos, estipulado como final da simulação neste estudo.

Em profundidades maiores (10 a 12 metros), foi possível observar uma mobilidade ínfima dos elementos zinco e níquel, com pouca variação das concentrações observadas no estudo. Assim, o potencial poluidor por estes elementos pode ser compreendido como menos preocupante do que pelo elemento cromo, evidenciado como variações significativas nas referidas profundidades.

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo teve como finalidade modelar a dispersão de contaminantes metálicos — zinco, cromo e níquel — em uma área de disposição final de resíduos sólidos urbanos localizada no município de Divinópolis, Minas Gerais, por meio dos modelos computacionais MODFLOW e MT3DMS. Os resultados obtidos demonstraram que os contaminantes apresentaram mobilidade significativa ao longo do tempo e da profundidade, evidenciando a atuação dos processos de advecção, dispersão e sorção em meios porosos. A influência das camadas de recobrimento e da heterogeneidade do maciço de resíduos sobre a variação das concentrações reforça a importância do correto manejo dos resíduos e da implantação de barreiras físicas que dificultem a migração de poluentes.

A aplicação da modelagem computacional mostrou-se eficaz como ferramenta de diagnóstico e prognóstico ambiental, contribuindo para a avaliação da extensão e da dinâmica da contaminação subterrânea em aterros. Do ponto de vista acadêmico, o estudo amplia o repertório metodológico disponível para a análise da mobilidade de metais pesados em solos contaminados. Já para a sociedade, os dados obtidos subsidiam práticas de gestão ambiental mais eficazes, promovendo o aprimoramento de políticas públicas voltadas ao controle da poluição do solo e das águas subterrâneas.

Entre as limitações encontradas neste trabalho, destaca-se a necessidade de utilização de parâmetros estimados com base em estudos prévios, o que pode influenciar a precisão dos resultados. Além disso, o estudo foi circunscrito a um único local e a três metais específicos, o que restringe sua generalização a outros cenários.

Recomenda-se, para pesquisas futuras, a expansão da modelagem para áreas com diferentes características geológicas e tipos de resíduos, a inclusão de outros contaminantes de interesse ambiental, bem como a integração de séries temporais de monitoramento da qualidade da água subterrânea para aprimorar a calibração dos modelos empregados. Tais aprimoramentos poderão fortalecer o papel da modelagem como instrumento técnico-científico de suporte à tomada de decisão no campo do gerenciamento de resíduos sólidos e da proteção ambiental.

## REFERÊNCIAS

ALLER, L., BENNETT, T., LEHR, J. H., PETTY, R. J., HACKETT, G. **DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings**. Dublin, Ohio: USEPA, 1987.

ALMEIDA, G. C. F., SILVA, I. R. Intervalos de Confiança via Simulação Monte Carlo: O Estado da Arte. **Revista da Estatística da Universidade Federal de Ouro Preto**, v. 4, p. 559 – 622, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: 2004. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro: 2001. 17 p.

AYDI, A. Assessment of heavy metal contamination risk in soils of landfill of Bizerte (Tunisia) with a focus on application of pollution indicators. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, n. 4, p. 3019-3027, mar. 2015.

BAKIS, R., TUNCAN, A. An investigation of heavy metal and migration through groundwater from the landfill area of Eskisehir in Turkey. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 176, n. 1, p. 87-98, mai. 2011.

BIEDA, B. Stochastic approach to municipal solid waste landfill life based on the contaminant transit time modeling using the Monte Carlo (MC) simulation. **Science of the Total Environment**, v. 442, p. 489-496, nov. 2013.

BRAZ, A. M. S. **Coeficiente de Distribuição de Metais Pesados em Solos Paraenses**. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2011.

BROMBAL, D., WANG, H., PIZZOL, L., CRITTO, A., GIUBILATO, E., GUO, G. Soil environmental management systems for contaminated sites in China and the EU. Common challenges and perspectives for lesson drawing. **Land Use Policy**, v. 48, p. 286-298, nov. 2015.

BUTT, T. E., GOUDA, H. M., BALOCH, M. I., PAUL, P., JAVADI, A. A., ALAM, A. Literature review of baseline study for risk analysis — The landfill leachate case. **Environmental International**, v. 63, p. 149-162, fev. 2014.

BYRNES, M. E. **Field Sampling Methods for Remedial Investigations**. Second Edition. Boca Raton: CRC Press, 2009.

CAIRES, S. M. **Determinação dos Teores Naturais de Metais Pesados em Solos do Estado de Minas Gerais Como Subsídio ao Estabelecimento de Valores de Referência de Qualidade**. 2009. 304 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, MG, 2009.

CHANG, N. B. e DAVILA, E. Municipal solid waste characterizations and management strategies for the Lower Rio Grande Valley, Texas. **Waste Management**, v. 28, n. 5, p. 776–794, jun. 2008.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução Nº 420 de dezembro de 2009. **Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.**

EEA – EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Management of contaminated sites in Western Europe - Topic Report N. 13/1999. Copenhagen, 2000. Disponível em < [https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/topic\\_report\\_no\\_131999](https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/topic_report_no_131999). Acesso em 20 jun. 2016.

FINEZA, A. G. **Modelagem Hidrogeológica de um Aquífero Freático Poroso com o Visual Modflow e por Meio de Redes Neurais Artificiais.** 2015. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015.

GRUPO DE RESÍDUOS SÓLIDOS (GRS) – UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. **Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão.** Jaboação dos Guararapes, 2014.

HARBAUGH, A. W. **MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process.** Reston, VA: USGS, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Sinopse do Senso Demográfico de 2010.** Rio de Janeiro, 2011.

IRITANI, M. A. **Modelação Matemática Tridimensional para a Proteção das Captações de Água Subterrânea.** 1999. 200 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1999.

JESUS, S. C. **Estudo *In Situ* e em Laboratório da Mobilidade de Metais Pesados em Solo.** 2009. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

KULIKOWSKA, D., GUSIATIN, Z. M., BULKOWSKA, K., KLIK, B. Feasibility of using humic substances from compost to remove heavy metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) from contaminated soil aged for different periods of time. **Journal of Hazardous Materials**, v. 300, p. 892-891, dez. 2015.

LEBERSORGER, S. & BEIGL, P. Municipal solid waste generation in municipalities: Quantifying impacts of households structure, commercial waste and domestic fuel. **Waste Management**, v. 31, n. 9-10, p. 1907-1915, set/out. 2011.

LINHARES, L. A., EGREJA FILHO, F. B., BELLIS, V. M., SANTOS, E. A., IANHEZ, R. Utilização dos modelos de Langmuir e de Freundlich na adsorção de cobre e zinco em solos Brasileiros. **Acta Agronômica**, v. 59, n. 3, p. 303-315, 2010.

LUO, X., XUE, Y., WANG, Y., CANG, L., XU, B., DING, J. Source identification and apportionment of heavy metals in urban soil profiles. **Chemosphere**, v. 127, p. 152-157, mai. 2015.

MCDONALD, M. G., HARBAUGH, A. W. **A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey**. Denver, CO: USGPO, 1988.

MURAOKA, T. Efeito de fontes de nitrogênio na absorção de fósforo pelo trigo. **Energia Nuclear e Agricultura**, v. 5, p. 31-40, 1983.

NEZHAD, M. M., JAVADI, A. A., REZANIA, M. Modeling of contaminant transport in soils considering the effects of micro- and macro-heterogeneity. **Journal of Hydrology**, v. 404, n. 3-4, p. 332-338, jul. 2011.

OLIVEIRA, F. J. S., CALIXTO, R. O. R., FELIPPE, C. E. C., FRANCA, F. P. Waste management and contaminated site remediation practices after oil spill: A case study. **Waste Management and Research**, v. 31, n. 12, p. 1190-1194, out. 2013.

PIZARRO, M. L. P. **Simulação de Fluxo de Água e Transporte de Solutos na Zona Não-Saturada do Solo pelo Método de Elementos Finitos Adaptativo**. 2009. 185 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2009.

POLLOCK, D. W. **User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U. S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model**. Reston, VA: USGS, 1994.

ROCHA, E. F. **Determinação da Condutividade Hidráulica e da Capacidade de Campo de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2008. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

ROELSMA, J. & HENDRIKS, R.F.A. Comparative study of nitrate leaching models on a regional scale. **Science of Total Environment**, v. 499, p. 481 – 496, nov. 2014.

SEWAYBRICKER, V. V. S. **Estudo de Método para Avaliação de Incerteza na Simulação de Fluxo em Meios Porosos**. 2009. 61 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2009.

SORVARI, J., SEPPÄLÄ, J. A decision support tool to prioritize risk management options for contaminated sites. **Science of the Total Environment**, v. 408, n. 8, p. 1786-1799, mar. 2010.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Ground-Water Modeling Compendium – Model Fact Sheets, Descriptions, Applications and Cost Guidelines**. Second Edition. USEPA, 1994.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Types of Contaminated Sites**. Abr. 2016. Disponível em < <https://www.epa.gov/enforcement/types-contaminated-sites> >. Acesso em 20 jun. 2016.

WANG, H., GAO, J. E., ZHANG, M., LI, X., ZHANG, S., JIA, L. Effects of rainfall intensity on groundwater recharge based on simulated rainfall experiments and a groundwater flow model. **Catena**, v. 127, p. 80-91, ago. 2015.

WU, Q., LEUNG, J. Y. S., GENG, X., CHEN, S., HUANG, X., LI, H., HUANG, Z., ZHU, L., CHEN, J., LU, Y. Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: Implications for dissemination of heavy metals. **Science of the Total Environment**, v. 506-507, p. 217-225, fev. 2015.

XU, L., LIU, G. The study of a method of regional environmental risk assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 11, p. 3290-3296, ago. 2009.

ZABEO, A., PIZZOL, L., AGOSTINI, P., CRITTO, A., GIOVE, S., MARCOMINI, A. Regional risk assessment for contaminated sites Part 1: Vulnerability assessment by multicriteria decision analysis. **Environment International**, v. 37, n. 8, p. 1295-1306, nov. 2011.

ZHENG, C. Model Viewer: A Three-Dimensional Visualization Tool for Ground Water Modelers. **Groundwater Software Spotlight**, v. 42, n. 2, p. 164-166, mar/abr. 2004.

ZHENG, C., WANG, P. P. **MT3DMS - A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems**. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers, 2000.

ZHOU, Y., JIANG, Y., AN, D., MA, Z., XI, B., YANG, Y., LI, M., HAO, F., LIAN, X. Simulation on forecast and control for groundwater contamination of hazardous waste landfill. **Environmental Earth Sciences**, v. 72, n. 10, p. 4097-4104, nov. 2014.

ZHU, Y., SHI, L., LIN, L., JANG, J., YE, M. A fully coupled numerical modeling for regional unsaturated-saturated water flow. **Journal of Hydrology**, v. 475, p. 188-203, dez. 2012.