

Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente

Modelação dinâmica do transporte e destino de metais pesados em depósitos de resíduos mineiros abandonados

Dissertação

Para obtenção de grau de Mestre em Engenharia de Minas e Geo-ambiente

Ana Luísa de Sousa Soares

Departamento de Engenharia de Minas e Geo-Ambiente



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

FEUP

Orientadora: Professora Doutora Maria Cristina Vila

Outubro 2009

Agradecimentos

Chegando ao final deste longo percurso foram muitas as dificuldades com que me deparei, estas foram ultrapassadas graças a ajuda de variadas pessoas, de entre estas gostaria de agradecer especialmente:

À minha tia, por todo o apoio, carinho, atenção e paciência que teve para mim ao longo de todos estes anos, sem ela nada disto seria possível.

À Professora Doutora Maria Cristina da Costa Vila, orientadora científica desta tese, por me ter atribuído um trabalho dentro de um assunto que me fascina e pela imensa disponibilidade, amabilidade e amizade durante toda a elaboração desta tese.

À Eng.^a Márcia Costa Leite por ser uma amiga incansável e pelo imenso apoio que me proporcionou neste período.

À Professora Doutora Aurora Futuro pela amizade demonstrada ao longo do meu percurso académico.

Ao meu irmão, à minha mãe, aos meus queridos primos, avô, tio, pai e Ana por todo o apoio e paciência que tiveram para me aturar nesta última etapa académica.

Ao meu namorado e companheiro que se manteve a meu lado durante todo este processo e me ajudou de todas as formas, e a sua família que se tornou uma segunda família para mim.

A todos os meus amigos pelo apoio e incentivo demonstrado, especialmente à Aline, à Mi e ao Quim.

Finalmente, a todos os que tornaram, directa e indirectamente, possível a execução desta dissertação.

Resumo

No âmbito da problemática da contaminação de solos e aquíferos, foi efectuada a modelação dinâmica do transporte de metais pesados a partir de um depósito a céu aberto de resíduos mineiros (escombreira).

O transporte de metais pesados para o meio envolvente ao da escombreira é desencadeado principalmente pela acção dos agentes de geodinâmica externa, nomeadamente a pluviosidade e o vento. O destino de contaminação que maior preocupação inspira é a unidade geológica subjacente à escombreira, que constitui um aquífero onde circula e é armazenada a água subterrânea essencial à biota circundante.

Foram definidas as geometrias da escombreira (1D) e da camada subjacente (3D), que constituem os domínios espaciais de integração das equações às derivadas parciais de transporte de contaminantes em meios porosos, calculando a variação espacial e temporal da concentração dos metais pesados em estudo.

O modelo matemático foi implementado num programa em Matlab desenvolvido para este caso de estudo. Para a geometria unidimensional faz-se a integração analítica e a integração numérica através do método das diferenças finitas. O passo de integração no domínio temporal é calculado de modo a minimizar o erro da solução numérica. A comparação entre a solução exacta (analítica) e a solução aproximada (numérica) confirmou a robustez do método numérico utilizado. O modelo 3D não admite solução analítica, pelo que foi integrado apenas por recurso ao método numérico das diferenças finitas.

Os resultados obtidos neste estudo constituem uma ferramenta que permite estudar a evolução temporal da concentração na água subterrânea de diferentes metais pesados, num determinado domínio temporal. Através dos resultados da simulação do transporte de metais pesados comparam-se as concentrações iniciais verificadas na mina da Panasqueira com as concentrações esperadas ao fim de diferentes instantes temporais para a zona envolvente.

Palavras-chave (Tema): Transporte e destino de contaminantes, metais pesados, integração numérica, equações às derivadas parciais, água subterrânea

Abstract

In the context of aquifers and groundwater contamination from heavy metals, dynamical modelling of heavy metals transport from a mine waste deposit was done.

Heavy metals transport to the mine waste deposit surroundings is usually triggered by external geodynamical agents, namely rain and wind. The fate of these contaminants that inspires a special concern is the geological unit underlying the mine waste deposit which constitutes an aquifer where the surrounding biota essential groundwater circulates and is stored.

The geometry of the units which constitute the spatial domains of integration of the partial differential equations was defined.

The mathematical model was implemented in a Matlab program specially developed for this case study. To the one dimensional domain the functions were integrated by both analytical and numerical methods. Time step was calculated to minimize numerical solution errors. The exact and the approximated solutions were compared and the robustness of the numerical method was confirmed. The three dimensional model does not admit an exact solution, so it was only integrated using the finite differences method.

Results allow us to predict time evolution concentration in groundwater for different heavy metals that are well known to be present in mine waste from metallic ores exploitations.

Key words (Subject): Transport and destination of contaminants, heavy metals, numerical integration, partial differential equations, soils, aquifers and groundwater.

Índice

1	Introdução.....	12
<u>1.1</u>	Enquadramento e Apresentação	12
<u>1.2</u>	Organização da Tese	14
2	Conceitos Gerais	16
<u>2.1</u>	Sistema Solo - Água - Contaminantes	16
<u>2.2</u>	Lei de Darcy.....	25
3	O caso de Estudo	40
<u>3.1</u>	O modelo 1D	44
3.1.1	Solução numérica	44
3.1.2	Solução analítica	46
<u>3.2</u>	O modelo 3D	47
4	Discussão e Interpretação de Resultados.....	50
<u>4.1</u>	Modelo 1D	50
4.1.1	Controle de precisão	50
4.1.2	Transporte de contaminante dentro da escombreira.....	52
<u>4.2</u>	Modelo 3D	75
4.2.1	Transporte de contaminante dentro na unidade de contaminação.	75
5	Conclusões	88
	Referências	91
	Anexos	93
	Anexo A.....	94
	Anexo B.....	103
	Anexo C.....	105
	Anexo D	109
	Anexo E.....	113
	Anexo F.....	117

Índice de Figuras

FIGURA 1 - EXEMPLO ILUSTRATIVO DA ESCOMBREIRA E DA UNIDADE GEOLÓGICA DE CONTAMINAÇÃO	13
FIGURA 2 - CICLO HIDROGEOLÓGICO	19
FIGURA 3 - ESQUEMA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	20
FIGURA 4- LINHAS DE FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NUM AQUÍFERO LIVRE	24
FIGURA 5 – TABELA COM VALORES DO INVERSO DA TORTUOSIDADE	25
FIGURA 6 - ESQUEMA DA EXPERIÊNCIA DE DARCY	26
FIGURA 7 - VARIAÇÃO DE DEBITO NUM DADO VOLUME.....	31
FIGURA 8 - REACTOR TUBULAR	34
FIGURA 9- ESQUEMA DA MALHA DE DISCRETIZAÇÃO NUM DOMÍNIO BIDIMENSIONAL.....	37
FIGURA 10 - ERRO ABSOLUTO PARA LAMBDA 1/2	50
FIGURA 11 – ERRO ABSOLUTO PARA LAMBDA 1/6.....	51
FIGURA 12– VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E PROFUNDIDADE INICIAL	54
FIGURA 13 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E PROFUNDIDADE MÉDIA	54
FIGURA 14 -VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E PROFUNDIDADE MÁXIMA	55
FIGURA 15 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO PARA TEMPO INICIAL E TODAS AS PROFUNDIDADES	55
FIGURA 16 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO PARA TEMPO FINAL E AO LONGO DA PROFUNDIDADE	56
FIGURA 17 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E PROFUNDIDADE INICIAL.....	58
FIGURA 18 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E PROFUNDIDADE MÉDIA	58
FIGURA 19 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO PROFUNDIDADE MÁXIMA.....	59
FIGURA 20 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO NO TEMPO INICIAL E AO LONGO DA PROFUNDIDADE.....	59
FIGURA 21 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO NO TEMPO FINAL E AO LONGO DA PROFUNDIDADE.....	60
FIGURA 22 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E PROFUNDIDADE INICIAL.....	62
FIGURA 23 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E PROFUNDIDADE MÉDIA	62
FIGURA 24 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E PROFUNDIDADE MÁXIMA	63
FIGURA 25 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO NO TEMPO INICIAL E AO LONGO DA PROFUNDIDADE.....	63
FIGURA 26 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO NO TEMPO FINAL E AO LONGO DA PROFUNDIDADE.....	64
FIGURA 27 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E PROFUNDIDADE INICIAL.....	66
FIGURA 28 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E PROFUNDIDADE MÉDIA	66
FIGURA 29 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E PROFUNDIDADE MÁXIMA	67
FIGURA 30 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO NO TEMPO INICIAL E AO LONGO DA PROFUNDIDADE.....	67
FIGURA 31 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO NO TEMPO FINAL E AO LONGO DA PROFUNDIDADE.....	68
FIGURA 32 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E PROFUNDIDADE INICIAL.....	70
FIGURA 33 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E PROFUNDIDADE MÉDIA	70
FIGURA 34 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E PROFUNDIDADE MÁXIMA.....	71

FIGURA 35 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO NO TEMPO INICIAL E AO LONGO DA PROFUNDIDADE	71
FIGURA 36 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO NO TEMPO FINAL E AO LONGO DA PROFUNDIDADE	72
FIGURA 37- GRÁFICO COMPARATIVO DE VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO EM G/L	73
FIGURA 38 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E DA PROFUNDIDADE, PARA Y=3 E Z=3.....	76
FIGURA 39- VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E DA PROFUNDIDADE, PARA Y=6 E Z=6	76
FIGURA 40 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E DA PROFUNDIDADE, PARA Y=11 E Z=11.....	77
FIGURA 41 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E DA PROFUNDIDADE, PARA Y=3 E Z=3.....	78
FIGURA 42- VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E DA PROFUNDIDADE, PARA Y=6 E Z=6	78
FIGURA 43 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E DA PROFUNDIDADE, PARA Y=11 E Z=11.....	79
FIGURA 44 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E DA PROFUNDIDADE, PARA Y=3 E Z=3.....	80
FIGURA 45- VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E DA PROFUNDIDADE, PARA Y=6 E Z=6	80
FIGURA 46 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E DA PROFUNDIDADE, PARA Y=11 E Z=11.....	81
FIGURA 47 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E DA PROFUNDIDADE, PARA Y=3 E Z=3.....	82
FIGURA 48 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E DA PROFUNDIDADE, PARA Y=6 E Z=6.....	82
FIGURA 49- VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E DA PROFUNDIDADE, PARA Y=11 E Z=11	83
FIGURA 50 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E DA PROFUNDIDADE, PARA Y=3 E Z=3.....	84
FIGURA 51 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E DA PROFUNDIDADE, PARA Y=6 E Z=6.....	84
FIGURA 52 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO E DA PROFUNDIDADE, PARA Y=11 E Z=11.....	85

Índice de Tabelas

TABELA 1 - VALORES DE ÍNDICES DE VAZIOS DE SOLOS GRANULARES	18
TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS ARENOSOS QUANTO À COMPACIDADE	19
TABELA 3 – CONDIÇÕES INICIAIS DE CADA CONTAMINANTE	41
TABELA 4- CONDIÇÕES INICIAIS DO CONTAMINANTE	53
TABELA 5- CONDIÇÕES INICIAIS PARA A UNIDADE GEOLOGIA DE CONTAMINAÇÃO	75

Notação

A	Secção	L^2
A_i	Área de vazios	L^2
B	Permeabilidade	L^2
C	Concentração	ML^{-3}
C_a	Concentração na água	ML^{-3}
C_s	Concentração mássica	MM^{-3}
D	Difusividade	L^2T^{-1}
D'	Difusividade efectiva	L^2T^{-1}
G	Aceleração da gravidade	LT^{-2}
Δh	Perda de carga hidráulica	L
H	Altura manométrica	L
I	Gradiente hidráulico	
J	Fluxo de contaminante	$ML^{-2}T^{-1}$
K	Condutividade hidráulica	LT^{-1}
k	Constante de decaimento	T^{-1}
K_F	Coefficiente de Freundlich	
K_s	Coefficiente de partilha solo-água	L^3M^{-1}
K_k	Constante de tortuosidade	
K_0	Factor dependente da secção transversal dos canais	L^2
L	Comprimento da coluna	L
L	Distância entre 2 pontos	L
M_s	Massa seca	M
M_h	Massa húmida	M
P	Queda de pressão (pressão hidráulica)	$M(LT^{-2})^{-1}$
P	Pressão	ML^{-2}

Q	Caudal volúmico	L^3T^{-1}
S	Saturação	
S	Capacidade de armazenamento do aquífero	L^2
T	Transmissividade	L^2T^{-1}
V	Velocidade	LT^{-1}
V_a	Volume ocupado fase gasosa	L^3
V_w	Volume ocupado por água	L^3
V_t	Volume total	L^3
v_i	Velocidade linear de infiltração	LT^{-1}
v_c	Velocidade do contaminante	LT^{-1}
V_s	Volume seco	L^3
X	Distancia percorrida	L

Letras gregas

E	Porosidade	
μ	Viscosidade	L^2T^{-1}
ρ	Densidade de um fluido	$M(L^3)^{-1}$
ρ	Densidade a granel	$M(L^3)^{-1}$
ρ	Densidade das partículas	$M(L^3)^{-1}$
\square	Humidade	
ρ	Densidade da água	$M(L^3)^{-1}$
α	Compressibilidade do aquífero	L^3
β	Compressibilidade da água	L^3

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Apresentação

O transporte de contaminantes em águas subterrâneas, resultante da percolação de águas pluviais ao longo de uma escombreira rica em metais pesados, pode significar um grave problema para a sociedade e para a biota autóctone.

A existência de escombreiras a céu aberto deu origem a uma série de problemas. Um deles é a mobilidade de metais pesados para o meio envolvente, dependente dos agentes de geodinâmica externa.

O comportamento de metais pesados tais como o arsénio, prata, cádmio, cobre, mercúrio, manganês, chumbo e selénio é estudado ao longo deste trabalho. Estes contaminantes são considerados extremamente tóxicos devido à incapacidade do corpo humano em os sintetizar e excluir do seu sistema.

Esta dissertação tem como objectivo estudar o comportamento e desenvolvimento da concentração de vários contaminantes, simulando o seu transporte desde a escombreira através da unidade de contaminação e finalizando num aquífero.

Este estudo é realizado de modo a que seja possível fazer uma previsão do grau de contaminação. Este dependendo fortemente da quantidade de material, concentração de metal e propriedades físicas tanto do solo como da escombreira.

Para o presente estudo estabelece-se um cenário hipotético inspirado na escombreira da mina da Panasqueira. Para efeitos de simplificação de cálculos a geometria adoptada foi a de dois paralelepípedos sobrepostos, ambos com as características de solos arenosos.

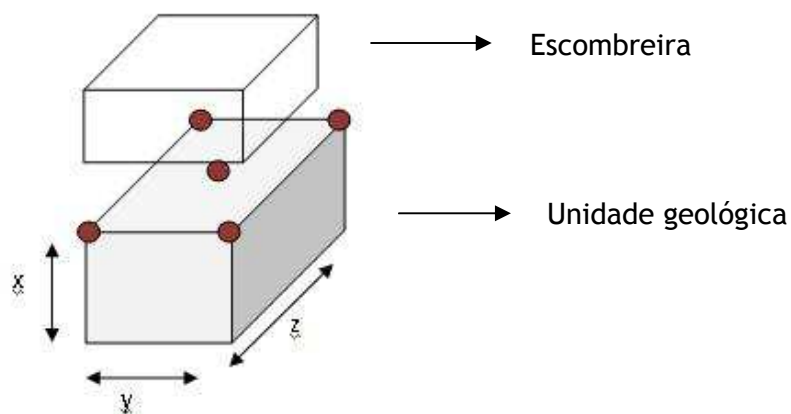


Figura 1 - Exemplo ilustrativo da escombreira e da unidade geológica de contaminação

Sendo o subsolo e o aquífero a unidade de destino de contaminação, os factores que governam a mobilidade dos contaminantes são variados e complexos. Sabe-se que a sua maior ou menor mobilidade está dependente de características inerentes ao tipo de unidade geológica a estudar.

Como instrumento de análise, foi implementado um modelo matemático numérico, em Matlab, com base numa extensão da lei de Darcy. A expressão foi traduzida através de equações às derivadas parciais e resolvida através do método das diferenças finitas. Esta resolução foi aplicada a dois diferentes domínios, espacial e temporal.

Com a implementação deste modelo foi criada uma ferramenta que permite estudar (de um modo simplificado, porque a concepção de um modelo matemático parte sempre de pressupostos simplificadores da complexidade dos fenómenos reais) a evolução espácio-temporal das concentrações nos diferentes metais pesados.

Ao saber os valores da concentração num determinada posição e instante é possível avaliar o estado do solo e do aquífero quanto a sua qualidade, podendo assim avaliar a viabilidade do aproveitamento da água.

1.2 Organização da Tese

No primeiro capítulo faz-se uma introdução ao tema, descrevendo genericamente todo o trabalho efectuado e esquematizando a organização da dissertação.

No capítulo dois, descreve-se qual o estado dos conhecimentos para a realização de um caso de estudo sobre a problemática da contaminação de solos e aquíferos. Este capítulo subdivide-se nas seguintes secções:

Sistema solo - água - contaminantes

A água proveniente da pluviosidade vai cair sobre a escombreira que por sua vez se encontra a céu aberto e cuja composição é rica em metais pesados. Ao percolar ao longo desta, a água fica contaminada e entra em contacto com o solo promovendo reacções de interacção solo - água - contaminantes. A caracterização desta relação é de extrema importância para este caso de estudo pois a problemática baseia-se na capacidade da água dissolver o contaminante e o transmitir ao longo do solo até chegar a um aquífero.

Características de um solo

Sendo o solo uma das unidades de contaminação, começa-se por descrever o solo e as suas características fundamentais. Pode-se considerar o solo um filtro para qualquer aquífero subjacente. Assim sendo é necessário saber quais as grandezas que o caracterizam, de modo a conseguir prever a evolução do contaminante ao longo deste, como as relações entre o solo e o contaminante.

Ciclo da água

O principal condutor de contaminação é a água, pelo que entender o ciclo hidrológico é de grande importância neste trabalho, fazendo referência ao seu percurso desde a atmosfera, até à superfície e finalmente chegando ao subsolo (unidade geológica de contaminação).

Lei de Darcy

A percolação da água ao longo da escombreira e do solo é regida através da lei de Darcy e das suas extensões. Estas leis tiveram um papel fundamental na elaboração deste trabalho pois a implementação de um modelo matemático baseou-se em fórmulas resultantes do estudo de Darcy.

No terceiro capítulo, faz-se a descrição do modelo onde foi implementado um programa numérico para o desenvolvimento do caso de estudo.

Este estudo foi progressivo, começando-se a desenvolver os cálculos inicialmente num domínio espacial 1D e só depois num domínio 3D. O modelo desenvolvido no domínio 1D foi utilizado para estudar o comportamento da concentração ao longo da escombreira, onde se considera um solo homogéneo e isotrópico. Para estudar o comportamento ao longo da unidade geológica de contaminação usou-se o modelo 3D.

Ambos os modelos se baseiam em equações que estão enunciadas ao longo desta dissertação, bem como nas propriedades individuais de cada solo e contaminante.

No capítulo quatro são apresentados os resultados obtidos com recurso a gráficos. Devido a ser um estudo implementado em Matlab e ser resolvido por métodos numéricos a quantidade de resultados é abundante, pelo que foram escolhidos alguns pontos, considerados essenciais, para fazer a avaliação.

No modelo 1D, na escombreira, fez-se um estudo para a evolução da concentração ao longo do tempo para os seguintes pontos: Altura máxima, altura média e base da escombreira, de modo a obter uma informação de como evoluiria a concentração ao longo do tempo mantendo as profundidades constantes. Esta avaliação foi efectuada assumindo que a base da escombreira se encontra completamente impermeabilizada.

Estudam-se para as condições iniciais e finais a evolução da concentração ao longo da profundidade, analisando como se comporta a concentração variando o espaço e mantendo o tempo constante.

Como o estudo ao longo da unidade geológica de contaminação é desenvolvido num domínio 3D os pontos fundamentais escolhidos são em maior número, gerando uma maior quantidade de resultados. O raciocínio adoptado não é o mesmo pois a concentração está a ser estudada ao longo num corpo com volume, assim sendo, os locais escolhidos como janela de estudo são dois vértices do “paralelepípedo” e o seu centro. Estuda-se assim a evolução da concentração para estes pontos ao longo do tempo e ao longo da profundidade, com o intuito de saber qual a concentração em metais pesados a que a água subterrânea chega ao aquífero.

A fonte de contaminação da unidade geológica para o modelo 3D é a escombreira, porém sem nenhuma camada impermeabilizadora na sua base.

Finalmente no último capítulo apresentam-se as principais conclusões deste trabalho e delineiam-se possíveis desenvolvimentos para trabalhos futuros.

2 Conceitos Gerais

2.1 Sistema Solo - Água - Contaminantes

Um sistema é constituído por matéria com uma composição específica, formando um órgão funcional interligado. Às substâncias que constituem um sistema denominam-se as componentes de um sistema. Às porções homogéneas fisicamente distintas dentro de um sistema chamamos a fase de um sistema. Assim sendo no nosso caso de estudo temos um sistema com três fases, gasosa (ar), líquida (água subterrânea) e sólida (partículas de solo com propriedades específicas). Como em todos os sistemas, há reacções entre os seus componentes. Neste caso o que vai ser estudado são as reacções entre o material na escombreira (com resíduos ricos em metais pesados) e a água proveniente da pluviosidade, e as relações entre o solo (filtro entre a escombreira e o aquífero) e a água que percola nos seus interstícios, proveniente da infiltração da água da chuva pela escombreira até chegar ao aquífero.

Para perceber como funcionam estas relações é essencial relembrar variados conceitos tais como as características de um solo arenoso (solo em estudo), o ciclo da água e a classificação de contaminantes. Para completar este raciocínio é fundamental citar leis e coeficientes que relacionam os componentes do sistema em estudo.

2.1.1 - Características de um solo

Sendo o solo um dos principais objectos de estudo nesta dissertação, é necessário compreender e ter noção das propriedades principais de um solo. A percolação da água através do solo é a base sobre a qual assenta o presente trabalho.

- Densidade a granel é a razão entre a massa de solo seco e o volume total (volume das partículas sólidas mais volume de água mais o volume de ar) [7].

$$\rho_g = \frac{M_s}{V_t} \quad (1)$$

onde M_s é a massa do solo seco (em g), V_t o volume total (em cm^3) de solo e ρ_g a densidade a granel (em g/cm^3).

- Densidade das partículas

$$\rho_m = \frac{M_s}{V_s} \quad (2)$$

onde V_s é o volume de partículas sólidas (em cm^3) seco e ρ_m é a densidade (em g/cm^3) de cada partícula que faz parte de um solo e M_s é a massa do solo seco (em g),

- Porosidade

$$\varepsilon = \frac{V_a + V_w}{V_t} = 1 - \frac{\rho_g}{\rho_m} \quad (3)$$

onde ε é a porosidade, V_a é o volume ocupado pela fase gasosa (em cm^3) e V_w o volume ocupado por água (em cm^3). A porosidade (%) é a fracção de volume de solo que está preenchido por água ou ar, dependendo da sua saturação. Este conceito é considerado um dos mais importantes, pois é nesta fracção de volume que a água subterrânea vai circular. A porosidade constitui um pilar importante em que assenta grande parte do desenvolvimento do estudo a tratar no capítulo seguinte;

- Humidade

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{M_h - M_s}{\rho_w V_t} \quad (4)$$

a humidade representa a fracção volúmica do solo que está preenchido por água onde ρ_w é a densidade da água (em g/cm^3), θ a humidade, M_s é a massa do solo seco (em g) e M_h é a massa do solo húmido (em g), ;

- Saturação

$$S = \frac{V_w}{V_a + V_w} = \frac{\theta}{\varepsilon} \quad (5)$$

o grau de saturação (S) é também um conceito muito importante, pois representa a fracção da porosidade que está preenchida por água. Consoante o grau de saturação vamos ter uma maior ou menor capacidade de percolação da água subterrânea.

Após terem sido enunciadas as principais características de um solo arenoso é necessário referenciar as suas propriedades e valores. Estes conceitos são fundamentais para compreender a movimentação da água dentro de um solo arenoso, parte essencial do tema desta dissertação.

O Índice Vazios (e) é a relação entre o volume de vazios e o volume ocupado pelas partículas sólidas num solo. O índice de vazios descreve quantitativamente o espaço vazio que há entre partículas de solo que pode ser preenchido por ar ou por água no caso de o solo estar saturado [6].

Tipo de Solo	Índice de Vazios	
	$e_{\text{máx}}$	e_{min}
Esferas de igual diâmetro	0.91	0.35
Areia uniforme	1.00	0.40
Silte uniforme e inorgânico	1.10	0.40
Areia siltosa	0.90	0.30
Areia (mistura fina e grossa)	0.95	0.20
Areia, silte e cascalho	0.85	0.14

Tabela 1 - Valores de índices de vazios de solos granulares adaptado de [6]

O Índice de Compacidade (ID) é o parâmetro que caracteriza a progressiva redução do índice de vazios. Esta redução está directamente ligada a um rearranjo das partículas resultante da aplicação de forças associadas a carregamentos de novas camadas ou de vibrações provocadas por sismos. A próxima tabela classifica os solos arenosos quanto à compacidade.

Areia	ID(%)
Muito solta	0-20
Solta	20-40
Medianamente compacta	40-60
Compacta ou densa	60-80
Muito compacta ou muito densa	80-100

Tabela 2 - Classificação de solos arenosos quanto à compactidade adaptada de [6]

2.1.2 - Ciclo da água

A movimentação de água subterrânea é o principal mecanismo de transporte de contaminantes no subsolo. Analisando o ciclo da água, é possível compreender melhor este fenómeno/movimento.

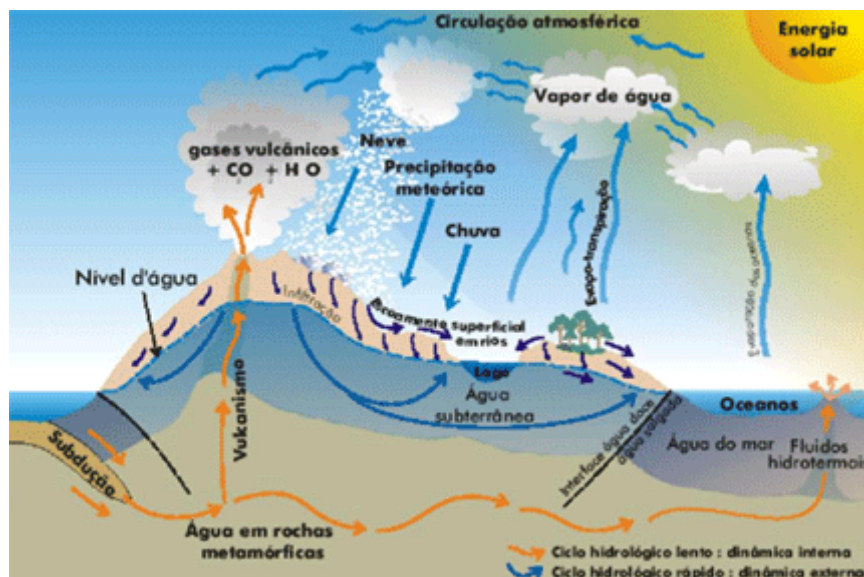


Figura 2 - Ciclo Hidrogeológico, adaptado de [14]

O ciclo hidrogeológico esquematiza a contínua transferência da água desde a atmosfera passando pela superfície até ao subsolo. Este ciclo inicia-se pela precipitação, dando-se de seguida um escoamento que pode ser pela superfície (indo aumentar o caudal de rios, lagos e mares e parcialmente voltando à atmosfera, por evaporação) ou infiltrar-se no solo, onde começa a área de infiltração.

No caso em estudo considera-se a área de infiltração a base da escombreira, onde chega a água resultante da percolação ao longo desta. A figura seguinte ilustra a movimentação da água subterrânea.



Figura 3 - Esquema da água subterrânea, adaptado de [14]

Designa-se por água subterrânea toda a água que ocupa os espaços vazios (poros) dentro de uma unidade geológica. É resultante da infiltração da água proveniente da precipitação e da alimentação dos rios e dos lagos, e percola através de um meio poroso até chegar a uma camada impermeável, geralmente constituída por matéria argilosa, onde se começa a armazenar, formando assim um aquífero.

Estas águas são ricas em sais, pois ao percolarem ao longo do solo, dissolvem componentes destes, criando assim uma relação de “simbiose” entre o solo e a água.

Estas águas são um recurso natural de extremo valor pois representam uma alta percentagem das reservas naturais de água doce do mundo.

Um aquífero é uma unidade ou formação geológica que reúne as condições necessárias para armazenar uma certa quantidade de água. Existem vários tipos de aquíferos com diferentes composições.

Um aquífero cuja pressão da água na zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica com a qual se comunica livremente e é limitado na base por uma camada impermeável, é denominado um aquífero livre.

Aquífero confinado é aquele cuja formação geológica é permeável e toda ela saturada de água, limitada na base e no topo por material impermeável, confinando a água a um espaço. A pressão dentro destes aquíferos é superior a pressão atmosférica.

Um aquífero confinado é uma formação geológica de natureza semi-permeável cuja extração de água não é viável pois a sua taxa de transmissividade é muito baixa.

A uma formação geológica, geralmente argilosa, que retém água mas onde esta não circula chama-se um aquífero confinado. A exploração de recurso hídrico neste tipo de formações também não é viável.

Um aquífero não confinado é uma formação geológica impermeável sem capacidade de armazenar nem transmitir água.

2.1.3 - Contaminantes

Contaminante é um constituinte indesejado, que pode surgir quer na fase líquida quer na fase sólida ou ainda na gasosa e que por acções humanas afectam a biota autóctone.

Os contaminantes estão classificados consoante as suas características (ver anexo B), no entanto será necessário realçar que os que vão ser estudados ao longo desta dissertação são os metais pesados. Este estudo é apoiado num caso real que é o da mina da Panasqueira, os seus resíduos são ricos em metais pesados.

Estes contaminantes são compostos inorgânicos que não são naturalmente sintetizados pelo corpo humano, criando assim uma grande preocupação em situações de contaminação de um solo ou aquífero. Os principais metais pesados são: Arsénio, bário, cádmio, cromo, cobre, chumbo, mercúrio, selénio, prata, zinco, manganês e níquel. De entre eles, os que estão geralmente presentes em maior quantidade nos resíduos mineiros são o cobre, o selénio, o chumbo, o arsénio e o zinco [7].

Os contaminantes tendem a mover-se das regiões de alta concentração para regiões de baixa concentração, procurando o equilíbrio. A este movimento de matéria chama-se Difusão (equação 6), que é gerado pelo gradiente de concentração. A lei de FICK permite-nos calcular a massa de contaminante que passa através de unidade de área por unidade de tempo.

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial X} \quad (6)$$

onde J é o fluxo de contaminante (em mol/cm² s), X é a distância percorrida em metros pelo contaminante, D a difusividade (em cm²/s) e C a concentração (em mol/cm³).

O valor da difusividade (D) encontra-se geralmente tabelado, quando isso não acontece o seu valor pode ser estimado relacionando as difusividades e massas molares de compostos quimicamente idênticos como indica a equação 7

$$\frac{D_1}{D_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \quad (7)$$

onde D_1 e D_2 são as difusividades (em cm²/s) e M_1 e M_2 as massas moleculares dos compostos (em g/mol).

Para saber a quantidade de contaminante que é “partilhado” com a água e a parte que continua no sólido, é necessário estudar os coeficientes de partilha. São constantes empíricas que descrevem como um composto se distribui entre duas fases. Existem três coeficientes de partilha de maior importância em equilíbrios nestes sistemas: solo-água, vapor-líquido e octanol-água.

A próxima equação quantifica o coeficiente de partilha do octanol-água:

$$K_{ow} = \frac{C_o}{C} \quad (8)$$

onde K_{ow} é o coeficiente de partilha octanol-água, adimensional, C_o a concentração do contaminante no octanol e C a concentração do contaminante na água sendo o valor determinado num sistema bifásico octanol-água. Todas as concentrações são apresentadas em mol/dm³.

O coeficiente de partilha octanol-água não será considerado no estudo desenvolvido nesta dissertação, sendo apenas apresentado no enquadramento da teoria. No entanto poderá ser útil em termos de desenvolvimentos futuros.

A intensidade com que um contaminante se propaga depende de variados factores. Antes de passar às equações que enunciam o modo como os contaminantes se repartem entre a fase sólida e fase aquosa de um solo, saturado ou não saturado, ou de um sedimento, será necessário enunciar as propriedades físicas com as quais esta repartição está relacionada.

Os factores são: o pH do solo e da água, temperatura, distribuição granulométrica e superfície específica das partículas sólidas, salinidade da água, constante de solubilidade, sólidos suspensos, presença de mecanismos que impeçam o estado de equilíbrio, relação de fases sólido-líquido entre muitas outras.

O índice que vai ser utilizado para caracterizar o modo como o contaminante se reparte entre a fase sólida e líquida ao longo desta dissertação é o coeficiente de partilha solo- água que está expresso na equação 9.

$$K_s = \frac{C_s}{C_a} \quad (9)$$

onde K_s é o coeficiente de partilha solo-água, C_o é a concentração do contaminante no solo (em g/kg) e C_a é a concentração na água (em g/dm³).

Sorção

A sorção é uma reacção de retardação. Impede que o transporte de contaminante flua de uma forma natural. Dá-se quando uma substância dissolvida num fluido é impregnada na matriz sólida de um meio poroso.

O seu efeito é diminuir os valores dos parâmetros da difusividade e da velocidade intersticial, ou seja, atenua picos de concentração. O processo de sorção do contaminante vai determinar qual a quantidade de contaminante que fica no solo e a que continua na água.

No que diz respeito à velocidade de percolação, sabe-se que a velocidade do contaminante é menor que a velocidade da água subterrânea aquando do efeito da sorção. O coeficiente de retardamento (R_f) devido ao efeito de sorção escreve-se da seguinte forma:

$$R_f = 1 + \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) \rho_s K_s \quad (10)$$

$$v_c = \frac{v_i}{R_f} \quad (11)$$

onde ε é a porosidade em percentagem, ρ_s a densidade do solo (em g/cm³) e K_s o coeficiente de partilha solo-água. v_c é a velocidade do contaminante dissolvido na água (em m/s) e v_i a velocidade linear de infiltração (em m/s).

A relação de sorção pode ser calculada através da equação de Freundlich

$$C_s = K_F C^{1/n} \quad (12)$$

onde C_s é a concentração mássica no solo (massa de contaminante por massa de solo seco), K_F um parâmetro chamado coeficiente de Freundlich (adimensional) e n uma medida de não-linearidade da relação. Quando estamos perante concentrações baixas, o valor de n é próximo da unidade nestes casos podemos exprimir a tendência de adsorção de um composto em termos de um só parâmetro, o coeficiente de partilha solo-água, que mede a tendência de um composto ser adsorvido pelo solo ou por sedimentos.

Advecção (convecção)

Advecção é o mecanismo de transporte de uma substância (neste caso um contaminante) num fluido em movimento. Este movimento é caracterizado por linhas de fluxo (figura 4), determinando a sua direcção e velocidade. Chama-se transporte advectivo quando se trata de fluidos subterrâneos que percolam por espaços intersticiais, limitados pelo espaço ocupado por partículas sólidas. Este transporte ocorre predominantemente em estruturas fracturadas cársicas com alto grau de permeabilidade.

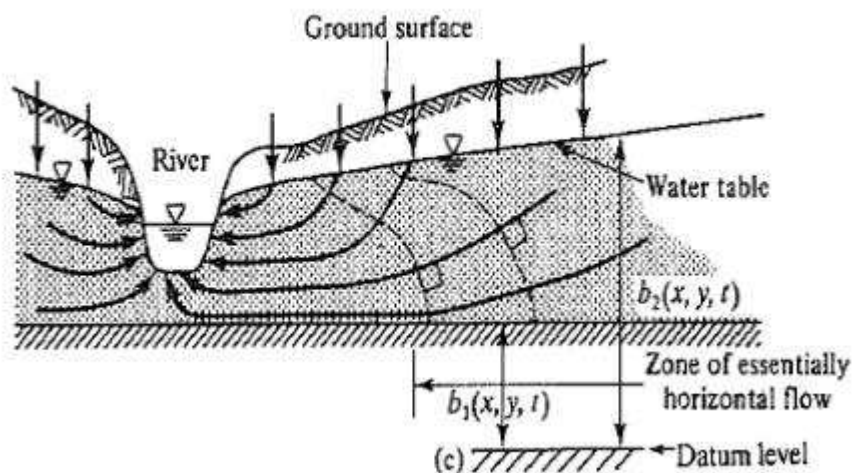


Figura 4- Linhas de fluxo de água subterrânea num aquífero livre, adaptado de [2]

Dispersão (difusão)

Ao mecanismo de transporte que conjuga a dispersão e difusão chama-se *transporte dispersivo*.

A difusão transporta o contaminante segundo um gradiente de concentração, movimentando-o de uma zona de alta concentração para uma zona de baixa concentração, procurando a uniformização da concentração.

As principais causas da dispersão são o facto de o fluido no meio poroso não apresentar velocidade constante fazendo com que uma fracção do fluido contaminado se mova mais rapidamente que o restante, e também devido à tortuosidade dos poros constituintes da unidade geológica que pode fazer com que as linhas de fluxo próximas se separem e se misturem com outras linhas de fluxo, uniformizando assim a concentração de contaminante.

A tortuosidade é um parâmetro que relaciona o comprimento do percurso do fluido através de um certo tramo e o comprimento efectivo deste. É um parâmetro que depende fortemente da forma da secção do canal pelo qual o fluido se move. Directamente ligado com o inverso da tortuosidade está a difusividade. Os valores do inverso da tortuosidade estão apresentados na seguinte tabela.

50% areia-bentonite	0,08 - 0,12
0, 10, 25, 50,75% bentonite-areia	0,01 - 0,70
Marga siltosa e argilosa, argila	0,20 - 0,33
Marga silto-argilosa, marga arenosa	0,08 - 0,31
Terras soltas	0,02 - 0,54
Marga	0,003 - 0,023
Marga, Marga argilosa, Argila	0,027 - 0,31
Contas vidro de 75 µm e 200 µm	0,04 - 0,45

Figura 5 - Tabela com valores do inverso da tortuosidade, adaptado de [7]

2.2 Lei de Darcy

Em 1856, Henry Darcy, engenheiro civil residente em Dijon, França, preocupado com o abastecimento de água na sua própria cidade, leva a cargo uma investigação sobre as leis que regem o fluxo das águas subterrâneas e o comportamento destas num meio poroso.

Devido ao presente estudo ter como base a percolação de água contaminada através de um meio poroso, todo o desenvolvimento matemático foi fundamentado na lei de Darcy e nas suas extensões.

A sua experiência consistiu na medição do débito do fluxo de água que percorre uma coluna de areia saturada, permitindo entender um pouco mais como se processa a infiltração. Revelou que o escoamento do fluxo de água através da coluna de areia é proporcional à diferença de carga hidráulica nos extremos da coluna e inversamente proporcional ao comprimento desta coluna (ver equação 15).

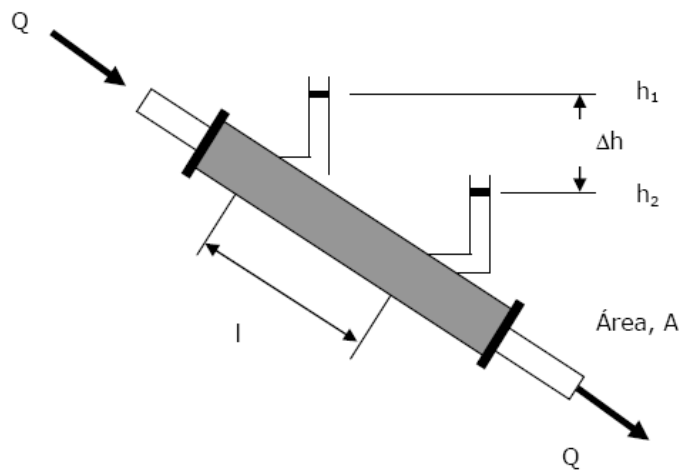


Figura 6 - Esquema da experiência de Darcy, adaptado de [9]

$$\Delta h = h_2 - h_1 \quad (13)$$

$$i = \frac{\Delta h}{l} \quad (14)$$

$$Q = AK \frac{\Delta h}{l} \quad (15)$$

$$Q = KiA \quad (16)$$

$$v = \frac{Q}{A} = Ki \quad (17)$$

onde Q é o débito (em m^3/s), A a área de secção transversal (em m^2) e K a condutividade hidráulica (em m/s) e a constante de proporcionalidade entre o débito e a queda de pressão.

O gradiente hidráulico representa a diferença de carga hidráulica entre os dois pontos h_1 e h_2 ao longo de um percurso (em m) (ver equação 14). A perda de carga hidráulica corresponde à dissipação da energia por unidade de peso de água (em m) que pode ser expressa pela equação de Bernoulli (equação 18):

$$\frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + h_2 = \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + h_1 \quad (18)$$

onde v_2 é a velocidade à saída da secção (em m/s), g a aceleração da gravidade (em m/s^2) ρ a densidade do fluido (em g/cm^3), P a pressão (em atm), h_2 a altura atingida pelo fluido a saída da secção (em m), v_1 a velocidade a entrada da secção e P_1 e h_1 a pressão e altura atingida pelo fluido a entrada da secção [16]. Considerando v_1 e v_2 constante obtêm-se a equação 19.

$$h_1 - h_2 = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho g} \quad (19)$$

O gradiente hidráulico ($i = h_1 - h_2 / l$) descreve a alteração de pressão ou energia potencial do fluido quando ele atravessa o meio poroso.

Simplificando a equação 16 dividindo-a por A , chegamos a equação que descreve a velocidade de Darcy, (equação 17).

Esta equação foi posteriormente validada após diversas experiências e verificou-se que para materiais de alta condutividade hidráulica ou gradientes hidráulicos elevados e fluidos incompressíveis, homogêneos, esta lei é válida apenas quando o fluxo é laminar (o que acontece no fluxo da água subterrânea), i.e., número de Reynolds inferior a 2100.

Sabendo que o fluxo se dá no sentido de diminuição de pressão, numa forma diferencial a lei de Darcy pode ser expressa considerando $\frac{dh}{dl}$ o gradiente hidráulico. Obtém-se um sinal de acordo com a convenção adoptada para fluidos subterrâneos tal que,

$$v = -K \frac{dh}{dl} \quad (20)$$

Ao analisar a equação 16, a área A refere-se à secção transversal total do meio poroso. No entanto, a água apenas percola pelo volume de vazios (espaços intersticiais), pelo que se considera o débito igual à multiplicação da velocidade de filtração pela área dos vazios, equação 20. Sendo ε a porosidade e admitindo um meio homogéneo em todo o domínio espacial chegamos à equação 21, adaptado de [7]

$$Q = vA = v_i A_i \quad (19)$$

simplificando:

$$v_i = v \frac{A}{A_i} \quad (20)$$

$$v_i = \frac{v}{\varepsilon} \quad (21)$$

Sabendo à partida que a Lei de Darcy reflecte um comportamento médio, podemos afirmar que o transporte advectivo se faz, através de um meio poroso, segundo esta lei. Esta lei pode ser expressa pelas seguintes fórmulas equivalentes, adaptado de [7]:

$$v = \frac{B}{\mu} \frac{\partial P}{\partial X} = K \frac{\partial h}{\partial X} \quad (22)$$

onde v é a velocidade (débito por unidade de área em m/s), B a permeabilidade (em mD, mili Darcy), μ a viscosidade (em N/m²/s), P a queda de pressão (em Pascal ou N/m²) através de um meio poroso, X a distância percorrida em metros.

$$V = \frac{B}{\mu} \frac{\partial [\rho g h]}{\partial X} = \frac{B \rho g}{\mu} \frac{\partial h}{\partial X} = K \frac{\partial h}{\partial X} \quad (23)$$

Pela equação 23 verifica-se a relação entre a condutividade hidráulica e a permeabilidade para um fluido incompressível, na equação 22 substitui-se $P = \rho g h$ onde ρ (em g/m³) é a densidade de um fluido e g a aceleração da gravidade (em m/s²).

$$K = \frac{B \rho g}{\mu} \quad (24)$$

Através da equação 24, pode-se concluir que os factores de que depende a condutividade hidráulica são as propriedades do meio poroso (através da permeabilidade) e as propriedades do fluido (densidade e viscosidade).

Para uma melhor percepção de como as propriedades de um solo poroso se relacionam, faz-se uma breve referência à equação de Kozeny [7], que define a permeabilidade segundo um modelo em que um fluido percorre canais tortuosos.

$$B = \frac{1}{K_K} \frac{\varepsilon^3}{S^2(1-\varepsilon)^2} \quad (25)$$

$$K_K = \frac{l'}{l} K_0 \quad (26)$$

onde S é a superfície específica das partículas (área por unidade de volume) e K_K uma constante que depende da tortuosidade e da forma das partículas. Sendo $\frac{l'}{l}$ a tortuosidade que compara o comprimento do percurso do fluido através do meio poroso e o seu comprimento efectivo e K_0 um factor dependente da forma da secção transversal dos canais de percolação do fluido.

Com as equações 25 e 26 pode-se concluir que a permeabilidade aumenta com a porosidade, varia inversamente com a tortuosidade e finalmente, decresce com a superfície específica das partículas (que é inversamente proporcional ao calibre dos mesmos).

Considerando uma unidade volúmica e retomando o raciocínio da equação 23, é necessária uma caracterização do movimento em cada uma das direcções, quando a condutividade hidráulica (K) não é constante nas três dimensões do espaço x, y, z ;

$$v_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial X} \quad ; \quad v_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial Y} \quad ; \quad v_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial Z} \quad (27)$$

Esta caracterização é necessária pois a capacidade do material de transmitir água não é igual nas três dimensões, pelo que é necessário estudar a sua capacidade em cada uma das direcções. Adaptado de [7]

Transporte do contaminante

Ao longo dos anos, o estudo do fluxo de águas subterrâneas e de transporte de massas tem sido feito através de linguagem matemática. As equações que em seguida vão ser apresentadas fazem parte da resposta a grandes questões que surgem da problemática do movimento de contaminantes em águas subterrâneas quer no solo quer no subsolo. Para começar este estudo é necessário estar ciente de uma equação básica que se chama balanço de massa. Este baseia-se no princípio da conservação da massa onde Lavoisier disse;

Massa que entra num sistema - Massa que sai do sistema = Massa retida no sistema e

Modificada ao longo do tempo

Esta equação de balanço pode ser aplicada a um domínio com quaisquer dimensões. Toma-se como exemplo uma secção infinitesimal descrita pela seguinte figura cujo raciocínio foi adaptado de [7]:

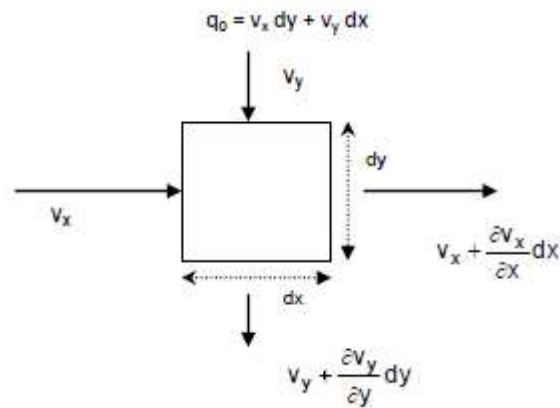


Figura 7 - Variação de debito num dado volume, adaptado de [7]

Sendo o caudal de entrada

$$q_0 = v_x dy + v_y dx \quad (28)$$

e o caudal de saída

$$q_s = \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dy + \left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy \right) dx \quad (29)$$

No estado estacionário $q_0 = q_s$ ou seja o caudal que entra será igual ao caudal que sai, (considerando o volume constante) e assim sendo

$$0 = \frac{\partial v_x}{\partial x} dx dy + \frac{\partial v_y}{\partial y} dx dy \quad (30)$$

dividindo ambos os membros por $dx dy$

$$0 = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \quad (31)$$

Sabendo que o valor da condutividade hidráulica é diferente em x e y e conjugando com a equação 27 vem:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (32)$$

Considerando o meio isotrópico e homogêneo, onde $K_x = K_y$, obtêm-se a seguinte equação de Laplace para um fluxo bidimensional;

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (32)$$

cuja extensão a um fluxo tridimensional assume a forma de;

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (33)$$

Esta equação de Laplace é largamente usada no âmbito da hidrogeologia. A sua solução dá-nos o valor da altura manométrica em qualquer ponto tridimensional do fluxo.

Admitindo que há variações de volume e que estas são proporcionais à variação da altura manométrica, conclui-se que o aumento desta altura indica um aumento do volume e vice-versa, logo a água subterrânea ficou armazenada. Ou seja vamos considerar que a água se encontra num regime transitório, assim sendo obtêm-se as seguintes equações considerando dois tipos de aquíferos, saturado e confinado (equação 34) e saturado não confinado (equação 35).

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{\rho_w g (\alpha + \varepsilon \beta)}{k} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (34)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (35)$$

onde (na equação 34) h é a altura manométrica, ρ_w a massa volumica da água (em g/m^3), g a aceleração da gravidade (em m/s^2), α e β as compressibilidades (em m^2/s), nomeadamente do aquífero e da água.

Relativamente ao aquífero não confinado (equação 35), o volume de água vai variando consoante haja recargas ou não. O seu volume está dependente da capacidade de armazenamento do aquífero (S em m) e da sua transmissividade (T em m^2/s), que nos indica a capacidade de um meio transmitir água quantificando a água que escoo verticalmente num aquífero. A equação (35) calcula a altura manométrica da água numa coordenada (x, y, z) para um determinado tempo.

Como já foi dito, existem dois tipos de mecanismo de transporte que regem o fluxo dos contaminantes em águas subterrâneas, o transporte advectivo e o difusional. A equação do fluxo difusional baseada na lei de Fick (equação 6) é dada por;

$$J_A = -D \nabla C_A = -CD \nabla Y_A \quad (36)$$

Após o estudo da equação 6 as novas variáveis aqui apresentadas são o símbolo ∇ que é o operador gradiente e Y_A que é a fracção mássica de A , onde A é um fluido exemplificativo. O operador gradiente com variação em ordem a (x, y, z) pode ser expresso da seguinte forma:

$$\nabla = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (37)$$

$$\frac{\partial ()}{\partial x} + \frac{\partial ()}{\partial y} + \frac{\partial ()}{\partial z} \quad (38)$$

Esta expressão (38) descreve a variação espacial de uma certa propriedade. Ao querer saber a variação da concentração ao longo dos eixos x , y e z , coloca-se dentro dos parêntesis vazios a variável dependente C . Ou seja quantifica a variação de uma determinada quantidade segundo os três eixos.

$$\frac{\partial(C)}{\partial x} + \frac{\partial(C)}{\partial y} + \frac{\partial(C)}{\partial z} \quad (39)$$

Tal como foi visto anteriormente o cálculo da difusão nos solos é expressa da seguinte forma,

$$J_A = -(\tau D)\theta \nabla C_A = -D'\theta \nabla C_A \quad (40)$$

onde τ é o inverso da tortuosidade, θ a humidade e D' a difusividade efectiva (Difusividade \times inverso da tortuosidade em cm^2/s).

No presente caso de estudo as condições são não estacionárias e para isso será necessário recorrer à segunda lei de Fick que, para uma dimensão e entrando apenas com o transporte difusional, enuncia:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D' \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (41)$$

Pode-se estabelecer a analogia do transporte de contaminante no subsolo com o regime tubular. Avaliando o seguinte reactor tubular de comprimento L (em metros) em que no seu interior percorre uma solução de velocidade $v(z,t)$ de concentração $C(z,t)$ num soluto que não reage durante o percurso.

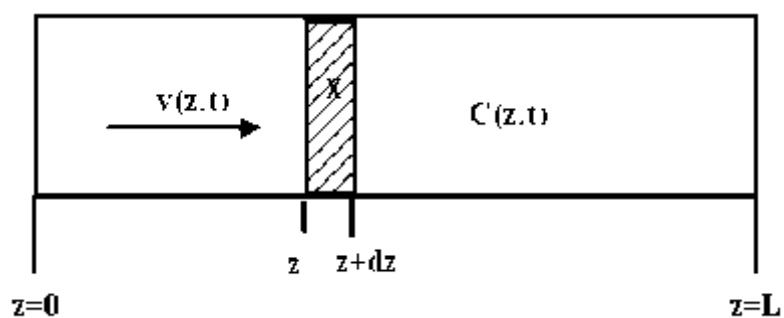


Figura 8 - Reactor tubular, adoptado de [7]

Considerando X um elemento infinitesimal de volume (em m^3) a distância Z (em m) e de espessura dz (em m), J sendo o fluxo difusional (em $mol/m^2 \cdot s$) dado pela 1ª lei de Fick (equação 6) e considerando a equação de balanço mássico do soluto em estudo, obtém-se

$$Entrada = vAC + A \cdot J \quad (42)$$

$$Saída = vAC + AJ + \frac{\partial(vAC + Aj)}{\partial z} dz \quad (43)$$

$$Acumulação = \frac{\partial}{\partial t} (ACdz) \quad (44)$$

logo :

$$\frac{\partial}{\partial t} (ACdz) = vAC + A \cdot J - \left[vAC + AJ + \frac{\partial(vAC + sj)}{\partial z} dz \right] \quad (46)$$

dividindo por $A \cdot dz$:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(vC + J)}{\partial z} = 0 \quad (47)$$

Aplicando a lei de Fick (substituindo J):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(vC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D \frac{\partial C}{\partial z} \right] \quad (48)$$

sendo v e D constantes, a equação do transporte convectivo e difusional é a seguinte

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad \text{ou} \quad D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (49)$$

Existe um factor de elevada importância que é necessário referir, o decaimento cinético (k). Este fenómeno controla a velocidade a que um material se dissolve, fenómeno que é necessário aplicar na situação em estudo.

Sendo um decaimento cinético de primeira ordem do contaminante, obtém-se o seguinte modelo a uma dimensão no espaço:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} - kC \quad (50)$$

Devido ao solo ser heterogéneo e anisotrópico tanto os valores da difusividade (D) como os valores da velocidade (v) assumem valores diferentes nas diferentes direcções espaciais. Pode-se então estender a equação de transporte (50) a um espaço tridimensional:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} - v_z \frac{\partial C}{\partial z} - kC \quad (51)$$

Resolução numérica de equações às derivadas parciais de 1ª e 2ª ordem.

As equações diferenciais são utilizadas para estudar uma vasta gama de fenómenos cujo comportamento depende da posição ou da posição e do tempo.

Às equações que envolvem mais do que uma variável independente e que envolvem derivadas parciais de uma dada função incógnita chamam-se equações às derivadas parciais. Estas podem ser de várias ordens, a sua ordem é igual ao maior grau da derivada da função incógnita. Neste caso as equações 50 e 51 são de segunda ordem.

As EDP's podem ser classificadas em três categorias; as Parabólicas e Hiperbólicas, que são evolutivas (associadas a problemas não estacionários) com características difusivas ou convectivas, ou Elípticas, associadas a problemas estacionários e em estado de equilíbrio.

As equações 50 e 51 são equações parabólicas pois são empregadas para caracterizar problemas que variam no tempo considerando o factor difusão.

O problema apresentado envolve uma variação temporal e espacial de concentração. A partir do valor inicial dessa concentração para um dado tempo inicial calcula-se, através de uma solução numérica, a evolução dos seus valores em sucessivos intervalos de tempo até ser alcançado o tempo final.

O método numérico utilizado para resolver estas EDP's foi o método das diferenças finitas.

A discretização dos domínios de integração leva a criação de uma malha de pontos (ilustrada na figura seguinte). Estas resolvem-se substituindo as derivadas parciais por diferenças finitas considerando variações no tempo e no espaço (x , y).

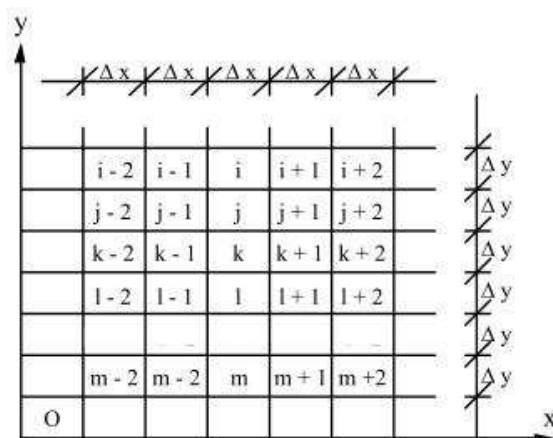


Figura 9- Esquema da malha de discretização num domínio bidimensional adaptado de [15]

As EDP's são equações muito sensíveis no que diz respeito a convergência e estabilidade, foi necessário aplicar um controle de estabilidade, fundamentado por [3]. Quando Δx , Δy , Δz e Δt tendem para zero, o resultado (aproximado) obtido através do método das diferenças finitas converge para o resultado (exacto) obtido por integração analítica. O controlo de estabilidade faz com que os erros não sejam amplificados mas sim atenuados conforme a progressão dos cálculos.

O parâmetro que controla a estabilidade é λ . Este parâmetro assume diferentes valores, se estivermos a trabalhar num universo unidimensional $\lambda \leq 1/2$ para uma solução em que os erros não crescem mas podem oscilar, $\lambda \leq 1/4$ que garante que a solução não oscila e $\lambda \leq 1/6$ que tende a minimizar o erro de truncatura. Assim sendo a expressão que associa λ a Δt é dada por:

$$\Delta t = \lambda \frac{\Delta x^2}{k} \quad (52)$$

sendo k uma constante que neste caso de estudo é D (difusividade).

Para o caso tridimensional o princípio é o mesmo, considerando $\Delta x = \Delta y = \Delta z$, $\lambda \leq 1/16$;

$$\Delta t = \lambda \frac{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}{k} \quad (53)$$

estas equações foram adaptadas de [3].

3 O caso de Estudo

Este caso baseia-se no estudo da movimentação de contaminantes presentes numa escombreira. Para efeitos de simulação construiu-se, inspirado num modelo real, um cenário que envolve a percolação da água através da escombreira, passando para o subsolo e chegando a um aquífero.

O modelo desenvolvido usa como condições iniciais, valores reais da concentração dos contaminantes (2^a coluna da tabela 3).

Foi escolhida a lei de Darcy por esta ser aplicável ao solo em estudo, um solo arenoso.

Antes de caracterizar o solo em estudo foi considerado pertinente um breve esclarecimento do porquê desta lei ser aplicável apenas a solos arenosos, uma vez que há solos argilosos em grande abundância. Solos argilosos são constituídos por partículas muito finas com dimensões perto de 1 μ m, e geralmente compostos por silicatos hidratados de alumínio, magnésio e ferro. O arranjo químico destas moléculas faz com que as cargas eléctricas negativas das partículas fiquem na face destas. Atraindo assim os iões positivos de sais dissolvidos na água bem como moléculas de água dipolares. Esta água uma vez adsorvida não se liberta, é consumida até as argilas ficarem saturadas. Uma vez saturadas tornam-se impermeáveis sendo impossível a percolação da água.

As características do solo são as seguintes;

Um solo arenoso constituído por partículas com dimensões compreendidas entre os 2-5 mm de diâmetro, com uma densidade de $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ g/dm}^3$ (este foi o valor de densidade considerado tanto para a escombreira como para o resíduo pois a diferença de valor era na ordem de 0,2 o que não interferia significativamente nos resultados) com um índice de vazios (e) na ordem de 0,6 (areia uniforme), uma porosidade (ϵ) = 0.4 e com um índice de compactação médio de 50% (areia medianamente compacta). Foram ainda considerados, para efeitos de cálculo, factor correctivo (λ) = 1/16, e para efeitos de geometria;

- Altura $x=40\text{m}$,
- Largura $y=300\text{m}$,
- Comprimento $z=200\text{m}$

A análise química dos contaminantes e sua concentração foram facultadas pela mina da Panasqueira, os restantes valores foram consultados bibliograficamente e ajustados ao caso de estudo.

A seguinte tabela indica quais as condições iniciais relativamente a cada contaminante

Elementos	Teor (ppm)	Teor (g/kg)	$D \cdot 10^{10} \text{m}^2/\text{s}^{[1][7]}$	Mm(g/mol)	$K_s(\text{L}/\text{Kg})^{[1]}$
Mn	1150	1,15	7,44	66	4,2
Cu	487	0,487	7,3	63,54	2,7
Zn	2106	2,106	7,02	65	3,1
Hg	2069	2,069	12,97	200,59	3,8
As	541	0,541	12,88	197,84	3,4
Se	4207	4,207	8,13	79	1,0
Pb	71	0,071	13,18	207,19	4,2
Ag	175	0,175	9,51	108	2,6
Cd	47	0,047	9,70	112,4	2,9

Tabela 3 - Condições iniciais de cada contaminante

Na escombreira foi considerado, para cálculos matemáticos, que o factor correctivo (λ) = 1/6, a porosidade do material na escombreira (ϵ) = 0.4, a sua profundidade 10 metros, e a velocidade a que a água percola na escombreira é de 0.04 m/s.

A resolução numérica das EDP's (50) e (51), através do método das diferenças finitas desenvolve-se da seguinte forma;

$$\frac{\partial C}{\partial z} = \frac{1}{\Delta z} [C(z) - C(z + \Delta z)] \quad (54)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = \frac{1}{(\Delta z)^2} [C(z) - 2C(z - \Delta z) + C(z - 2\Delta z)] \quad (55)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [C(t) - C(t - \Delta t)] \quad (56)$$

aplicando este método a equação 50

$$\frac{C(t, z) - C(t - \Delta t, z)}{\Delta t} = -v \frac{C(t, z) - C(t, z - \Delta z)}{\Delta z} + D \frac{C(t, z) - 2C(t, z - \Delta z) + C(t, z - 2\Delta z)}{(\Delta z)^2} - KC(t, z) \quad (57)$$

a equação 51 vem;

$$\begin{aligned} & \frac{C(x, y, z, t) - C(x, y, z, t - \Delta t)}{\Delta t} = \\ & = -v_x \frac{C(x, y, z, t) - C(x - \Delta x, y, z, t)}{\Delta x} - v_y \frac{C(x, y, z, t) - C(x, y - \Delta y, z, t)}{\Delta y} - v_z \frac{C(x, y, z, t) - C(x, y, z, t - \Delta z)}{\Delta z} + \\ & + D_x \frac{C(x, y, z, t) - 2C(x - \Delta x, y, z, t) + 2C(x - 2\Delta x, y, z, t)}{\Delta x^2} + \\ & + D_y \frac{C(x, y, z, t) - 2C(x, y - \Delta y, z, t) + 2C(x, y - 2\Delta y, z, t)}{\Delta y^2} + \\ & + D_z \frac{C(x, y, z, t) - 2C(x, y, z - \Delta z, t) + 2C(x, y, z - 2\Delta z, t)}{\Delta z^2} - KC(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (58)$$

A equação 50 (unidimensional) admite solução analítica. No entanto este método não nos garante uma solução isenta de erros na medida em que as funções erro e erro complementar são calculadas numericamente apresentando valores aproximados e não soluções exactas. A solução analítica é dada por:

$$C = \frac{C_0}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{z - vt}{\sqrt{4Dt}}\right) \times e^{-kt} \quad \text{se } z \geq vt \quad (59)$$

$$C = \frac{C_0}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{vt - z}{\sqrt{4Dt}}\right) \right] \times e^{-kt} \quad \text{se } z \leq vt \quad (60)$$

onde C_0 é a concentração inicial expressa (em g/l) , erfc a função complementar de erro e erf a função erro, D a difusividade (em m^2/s), v a velocidade de Darcy (em m/s) e C o valor da concentração a ser calculado.

A solução analítica apenas resolve problemas unidimensionais, pelo que por motivo de coerência foi decidido implementar o método numérico em todas as situações.

O cálculo da variação da concentração através do método analítico serviu para controlar a precisão do método numérico. Ao calcular a variação da concentração na escombreira (unidimensional) pelos dois métodos é permitido calcular erro absoluto pela seguinte fórmula;

$$\text{erro absoluto} = \left| \text{valor numerico} - \text{valor analitico} \right| \quad (61)$$

Aplicando a teoria atrás enunciada ao caso prático inspirado na mina da Panasqueira, foi implementado um programa em matlab. Este programa calcula o valor da concentração, dos metais pesados, ao longo do espaço (escombreira e subsolo) e do tempo. A obtenção destes valores permite realizar um estudo relativamente à contaminação do solo e da água.

Necessário será lembrar que este modelo será aplicado nove vezes, pois existem nove contaminantes a serem estudados, todos estes com características próprias e diferentes entre si. Devido à quantidade abundante de dados e a sua semelhança apenas quatro resultados serão discutidos no corpo deste trabalho, os resultados dos restantes serão apresentados em anexo.

3.1 O modelo 1D

3.1.1 Solução numérica

Inicialmente desenvolveu-se um modelo unidimensional para estudar o comportamento da concentração de contaminante ao longo da escombreira. Admite-se que esta escombreira tem uma geometria aproximada a um paralelepípedo. Admite-se que o material depositado na escombreira é homogéneo e isotrópico. Permitindo-se a simplificação de considerar dispensável o esforço computacional que seria necessário para calcular o transporte dentro da escombreira em 3D.

Para obter uma maior precisão o modelo teve em consideração as características do solo e também do contaminante que já tinham sido estudadas. Assim sendo o modelo matemático segue o seguinte esquema:

I) Entrada de dados → II) Pré-Cálculos → III) Integração EDP → IV) Saída de Resultados

I) Os dados necessários para o desenvolvimento deste programa dividem-se em duas classes distintas. Uma relativa ao processo em estudo, e outra ao modelo matemático que reproduz o fenómeno. Este dimensionamento está directamente ligado com o parâmetro responsável pela estabilidade do método numérico aplicado.

Dados iniciais:

c_0 - concentração de contaminante no solo em g/Kg;

K_s - Constante de partilha solo-água para o contaminante a estudar;

v - velocidade em m/s;

densidade - densidade do solo em kg/m³;

D - difusividade do material em m²/s;

K - constante de decaimento cinético do contaminante;

ϵ - Porosidade do solo

Variáveis responsáveis pelo dimensionamento:

Lambda - constante que controla a estabilidade do método numérico; dz - variação da profundidade; zfinal - altura total da escombreira

II) Todos os pré-cálculos efectuados foram fundamentados nas equações enunciadas no segundo capítulo deste trabalho. Assim sendo determina-se:

z1- vector profundidade;

nz1 - dimensão do vector profundidade;

dt - variação do tempo ;

tfinal - tempo máximo que demora água a chegar ao fim da escombreira;

t1-vector tempo;

nt1 - dimensão do vector tempo;

Ki - concentração inicial na água;

Rf - o efeito do retardamento devido ao efeito da sorção;

v1 - velocidade intersticial da água em m/s;

vel - velocidade intersticial da água contaminada em m/s

III) A Integração numérica da EDP é efectuada com base na resolução descrita no capítulo anterior, calculando os valores de c - Concentração do contaminante segundo tempo e espaço e dc - variação da concentração de contaminante ao longo do tempo e espaço.

IV) Os resultados obtidos foram apresentados em formato matricial, apresentando a variação da concentração ao longo do espaço unidimensional e do tempo.

3.1.2 Solução analítica

Para aferir a qualidade dos resultados obtidos através do método numérico foi efectuado também a integração analítica da equação diferencial. A implementação do modelo segue o seguinte esquema para o modelo 1D:

I)Entrada de dados —————> II) Cálculos —————> III)Resultados

I) A entrada de dados é idêntica à do modelo numérico acima referido.

II) Os cálculos efectuados são diferentes, pois seguem as formulas 59 e 60 e os cálculos efectuados são apenas da variação da concentração ao longo do tempo e do espaço.

III) A apresentação dos resultados é idêntica à do método numérico.

3.2 O modelo 3D

A equação (51) apenas admite uma solução numérica. Como já foi mencionado o destino de contaminação é o subsolo, disposto imediatamente abaixo da escombreira. Admite-se que esta unidade tem uma geometria aproximada à de um paralelepípedo.

Foi considerado um modelo tridimensional dependente do tempo. Admitindo velocidades e difusividades diferentes nas três direcções (x , y , z).

O esquema utilizado na implementação do programa é análogo ao usado no modelo 1D numérico e analítico.

I) Entrada de dados → II) Pré-Cálculos → III) Integração EDP → IV) Saída de Resultados

I) Os dados sob os quais este modelo vai trabalhar são semelhantes aos referidos anteriormente. No entanto como este modelo é 3D os valores vão ser diferentes nas três dimensões. Tal como no modelo 1D, os dados necessários para o desenvolvimento deste programa dividem-se em duas partes distintas: os dados que caracterizam o solo e o contaminante são introduzidos na primeira parte do programa (modelo 1D), a esta altura só se introduzem os dados referentes ao domínio espacial da unidade geológica. Portanto os dados são:

v_x - velocidade ao longo do eixo dos xx ;

v_y - velocidade ao longo do eixo dos yy ;

v_z - velocidade ao longo do eixo dos zz ;

D_x - difusividade ao longo dos xx ;

D_y - difusividade ao longo dos yy ;

D_z - difusividade ao longo dos zz ;

K - constante de decaimento cinético do solo;

x_{final} - altura da camada de destino do contaminante;

y_{final} - largura da camada de destino do contaminante;

z_{final} - comprimento da camada de destino do contaminante;

λ_2 - constante que controla a estabilidade do método numérico;

n_i - numero de passos de integração

II) Baseado nos valores dos dados introduzidos e nas equações atrás enunciadas calculam-se os seguintes valores:

v_{x1} - velocidade intersticial da água ao longo do eixo dos xx ;

v_{y1} - velocidade intersticial da água ao longo do eixo dos yy ;

v_{z1} - velocidade intersticial da água ao longo do eixo dos zz ;

v_x - velocidade intersticial da água contaminada ao longo do eixo dos xx ;

v_y - velocidade intersticial da água contaminada ao longo do eixo dos yy ;

v_z - velocidade intersticial da água contaminada ao longo do eixo dos zz ;

dx - variação da altura;

dy - variação da largura;

dz - variação do comprimento;

x - vector altura;

y - vector largura;

z - vector comprimento;

n_x - dimensão do vector x ;

n_y - dimensão do vector y ;

n_z - dimensão do vector z ;

dt - variação do tempo;

t_{final} - tempo máximo considerado pela implementação do programa;

t - vector tempo;

n_t - dimensão do vector tempo.

Neste caso a EDP implementada numericamente determina o valor de;

c - Concentração ao longo de um espaço tridimensional e ao longo do tempo;

dc - variação da concentração ao longo de x,y,z , dependentes do tempo.

IV) Os resultados obtidos são apresentados em várias matrizes demonstrando a variação espacial da concentração ao longo do tempo.

Nota: Embora esteja consagrado que em coordenadas espaciais a letra z representa a profundidade, na implementação do programa em 3D, por razões de desenvolvimento matemático, o z foi atribuído para o comprimento da unidade geológica. Assim sendo no estudo 3D a coordenada x refere-se a profundidade, como ilustra a figura 1.

4 Discussão e Interpretação de Resultados

4.1 Modelo 1D

4.1.1 Controle de precisão

A equação (50) admite integração analítica, (que conduz a uma solução quase exacta, não se pode considerar exacta na medida em que a função erf e erfc são funções aproximadas) e numérica. Integra-se das duas maneiras, em implementações em Matlab e estudou-se o comportamento das duas soluções, faz-se ainda a análise de erros.

De modo a tornar a exploração do modelo mais abrangente foram considerados três valores diferentes para a porosidade.

Serão assim apresentados gráficos que quantificam o erro absoluto ao longo do tempo e em todas as camadas. O programa correu para dois valores de lambda, primeiro para $\frac{1}{2}$ e depois para $\frac{1}{6}$ de modo a verificar se a precisão do método numérico aumentava. Os resultados foram os seguintes.

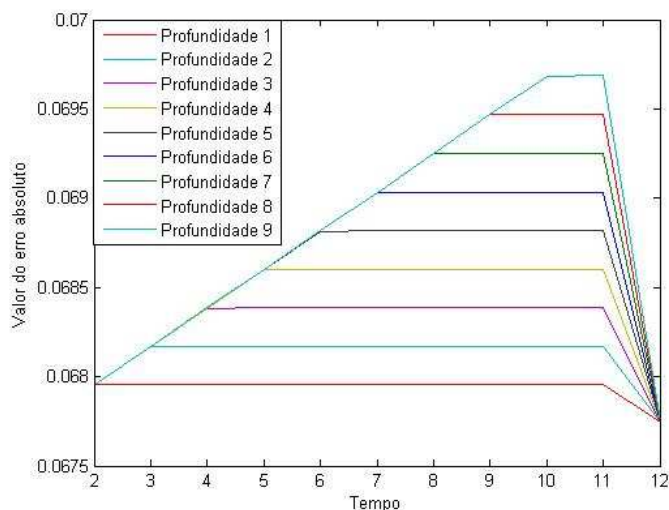


Figura 10 - Erro absoluto para lambda 1/2

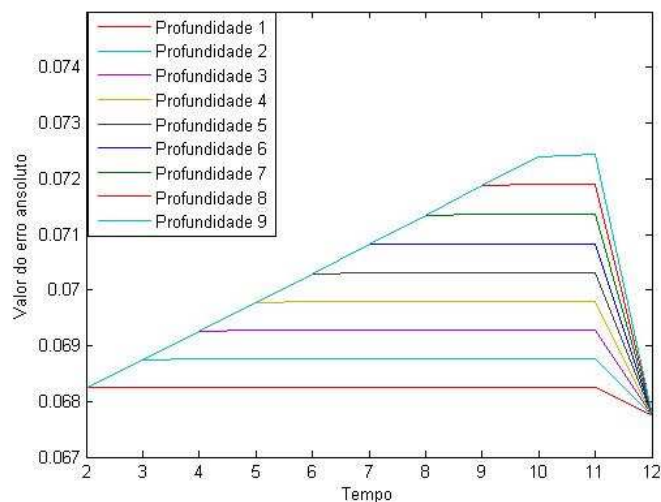


Figura 11 - Erro absoluto para lambda 1/6

Ao analisar os gráficos pode-se constatar que o valor do erro é baixo para ambos os valores de lambda.

Para o gráfico apresentado na figura 10 o valor do erro oscila entre 0,067 e 0,0695. Ao longo da profundidade pode verificar-se que o valor do erro vai aumentando consoante a profundidade vai aumentando também. Relativamente ao decorrer do tempo o erro verifica-se constante até ao tempo 11 e depois decresce até ao valor mínimo de 0,067. Existe no entanto uma excepção, o valor do erro na altura máxima tem um comportamento diferente, cresce desde o tempo igual a 2 até 9, mantendo-se constante até ao tempo 11 e depois decresce juntamente com o valor de todas as outras camadas.

O mesmo se verifica no gráfico apresentado na figura 11, com a única diferença que o valor do erro oscila entre 0,067 e 0,0725.

Podemos assim constatar que o valor do erro é menor para o menor valor de lambda testado.

4.1.2 Transporte de contaminante dentro da escombreira

Por motivos de coerência matemática, o método numérico das diferenças finitas foi o escolhido para resolver a EDP que descreve o comportamento da concentração de contaminação ao longo da escombreira.

Devido a abundância de resultados, foram escolhidos pontos fundamentais que pudessem caracterizar o comportamento do contaminante ao longo de uma escombreira com as características específicas que foram admitidas, i.e., geometria aproximada à de um paralelepípedo, sendo esta homogénea e isotrópica.

Os metais pesados em estudos são nove. Destes foram escolhidos apenas cinco, devido a abundância de resultados, para serem analisados no corpo da tese. Os estudos dos restantes metais são apresentados em anexo.

Foram seleccionados os contaminantes considerados mais tóxicos, os que apresentam maiores perigos para a sociedade aquando da contaminação. Dos nove metais pesados em estudo, os cinco escolhidos foram o Cobre, Zinco, Mercúrio, Arsénio e o Selénio, devido ao seu elevado teor na escombreira e ao seu alto grau de toxicidade.

Para uma melhor leitura dos gráficos da variação dos contaminantes ao longo da escombreira, apresenta-se em seguida um quadro com as condições iniciais de cada ensaio considerando Δz como um passo de integração espacial com valor de 1 metro e Δt um passo de integração temporal que varia de metal para metal.

É necessário referir que, para efeitos de simplificação se considera a base da escombreira completamente impermeável, onde se dá a acumulação de lixiviado rico em metais pesados.

Condições iniciais comuns (factor correctivo $\lambda = 1/6$; porosidade $\varepsilon = 0.4$; profundidade $x = 10\text{m}$; $\rho = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{g/dm}^3$ e $v_x = 0.04 \text{ m/s}$)

Elementos	Teor (ppm)	Teor (g/kg)	$D \cdot 10^{10}$ m ² /s	dt (dias)	Ks(L/Kg)
Mn	1150	1,15	7,44	51,85	4,2
Cu	487	0,487	7,3	52,85	2,7
Zn	2106	2,106	7,02	52,87	3,1
Hg	2069	2,069	12,97	29,74	3,8
As	541	0,541	12,88	29,95	3,4
Se	4207	4,207	8,13	47,45	1,0
Pb	71	0,071	13,18	29,27	4,2
Ag	175	0,175	9,51	40,56	2,6
Cd	47	0,047	9,70	39,77	2,9

Tabela 4- Condições iniciais do contaminante

- Arsénio (As)

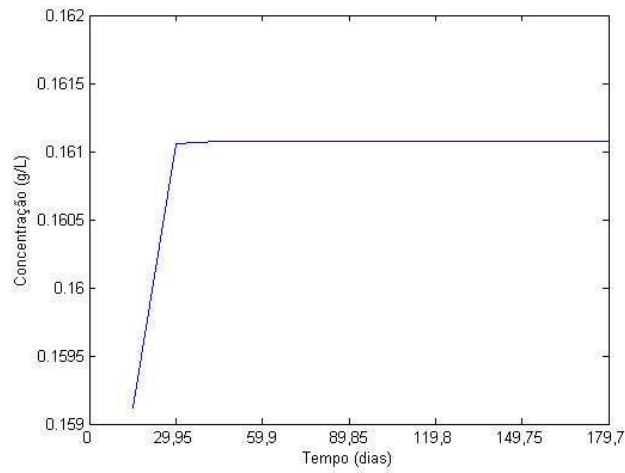


Figura 12- Variação da concentração ao longo do tempo e profundidade inicial

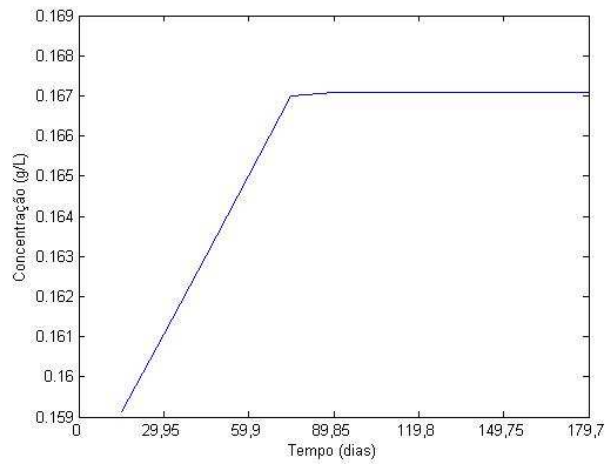


Figura 13 - Variação da concentração ao longo do tempo e profundidade média

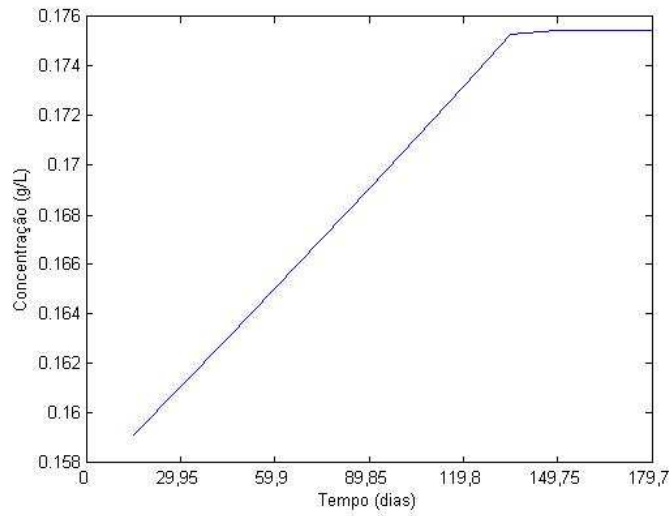


Figura 14 -Variação da concentração ao longo do tempo e profundidade máxima

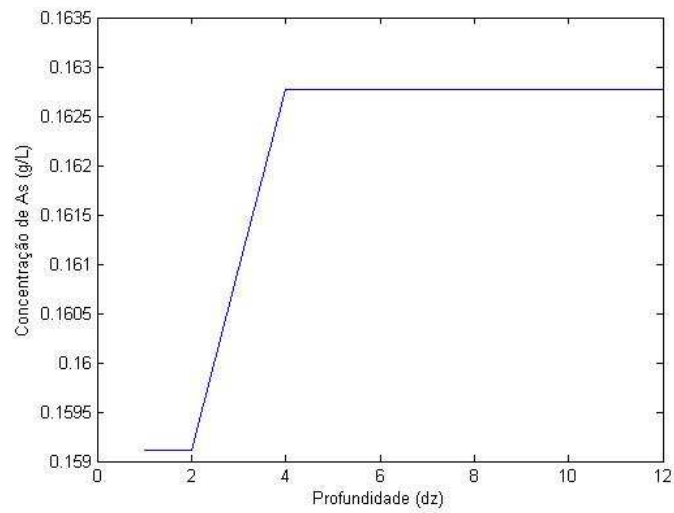


Figura 15 - Variação da concentração para tempo inicial e todas as profundidades

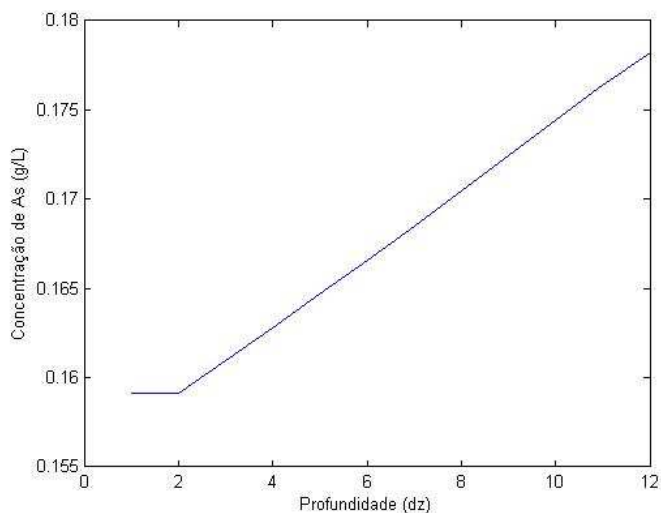


Figura 16 - Variação da concentração para tempo final e ao longo da profundidade

Após a análise dos gráficos que caracterizam a variação da concentração do arsénio constata-se que:

No gráfico da figura 12 observa-se um crescimento brusco: em apenas 29,95 dias o valor da concentração varia de 0,159 g/L a 0,161 g/L mantendo-se constante neste valor.

O comportamento do gráfico apresentado na figura 13 assemelha-se ao anterior no entanto o crescimento da concentração não é tão brusco, crescendo linearmente de 0,159 g/L a 0,1665 g/L num intervalo de aproximadamente 70 dias, mantendo-se constante após este crescimento.

A evolução da concentração no gráfico 14 de Arsénio assume um comportamento idêntico aos dois anteriores, crescendo de 0,159 g/L a 0,177 g/L em 130 dias, mantendo-se constante o resto do tempo.

No gráfico da figura 15 (variação da concentração ao longo da profundidade no instante inicial) a concentração é constante até 2 metros de profundidade, assumindo o valor inicial de 0,159 g/L mostrando seguidamente um aumento constante ao longo da profundidade, a concentração varia de 0,16 g/L a 0,176 g/L.

É possível constatar ao analisar os gráficos apresentados nas figuras 12,13 e 14 onde o estudo é efectuado ao longo do tempo, em camadas da escombreira progressivamente mais profundas. À medida que se evolui no sentido da profundidade, o aumento da concentração não é tão brusco, evoluindo progressivamente e chegando ao seu valor patamar sucessivamente mais tarde. Isto significa que à medida que se caminha ao longo da profundidade mais tempo demora a subir o valor a concentração. Por isso mesmo os valores da concentração são mais elevados em maiores profundidades. Esta afirmação faz todo o sentido, pois quanto mais tempo a água estiver em contacto com o material contaminado maior será a capacidade de o dissolver e o transportar. Pelo que, relativamente ao valor das concentrações este atinge o seu pico ($c=0,177$ g/L) quando o tempo é máximo e a profundidade máxima (gráfico 16).

Na figura 16 o comportamento da concentração mostra-se constante até 2 metros de profundidade, admitindo um valor inicial de 0,159 g/L apresentando depois um crescimento rápido para o valor de 1,6255 g/L de 2 a 4 metros mantendo-se constante ao longo do resto da camada.

Interpreta-se assim que a concentração aumenta consoante a profundidade e o tempo. É possível afirmar que, no instante inicial, a concentração aumenta apenas em camadas superiores, mantendo-se constante ao longo do resto das profundidades. No tempo final a concentração apresenta um crescimento constante isto acontece devido a velocidade de percolação da água, i.e. no tempo inicial a água ainda não tinha tido tempo de percolar toda a escombreira, provocando apenas um aumento nas camadas iniciais, com o passar do tempo a água percolou pela camada toda, criando um aumento de concentração constante ao longo da profundidade.

Nota: Devido ao estudo ter sido efectuado assumindo um solo homogéneo e isotrópico com as mesmas condições para todos os contaminantes, os gráficos apresentados em seguida vão descrever um comportamento semelhante, diferindo apenas a amplitude da curva que descreve a variação da concentração. Assim sendo, para os próximos contaminantes serão apenas apresentados os valores das variações das concentrações, uma vez que a análise exaustiva que já foi realizada para o arsénio é semelhante para os contaminantes que se seguem.

- Cobre (Cu)

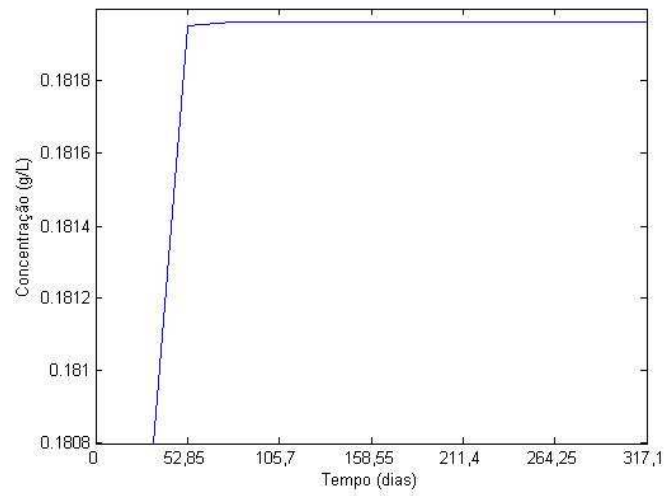


Figura 17 - Variação da concentração ao longo do tempo e profundidade inicial

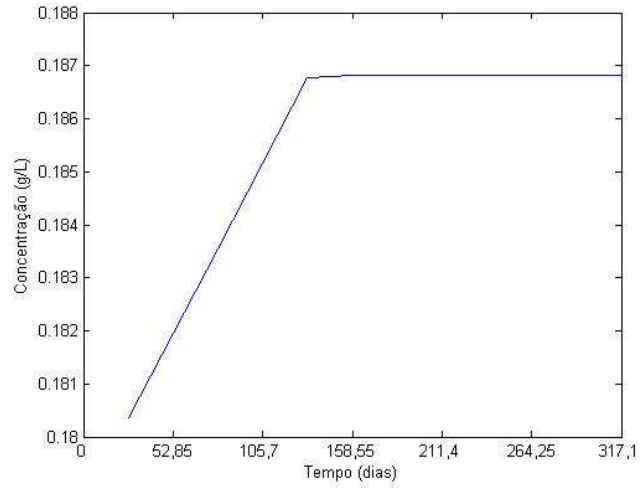


Figura 18 - Variação da concentração ao longo do tempo e profundidade média

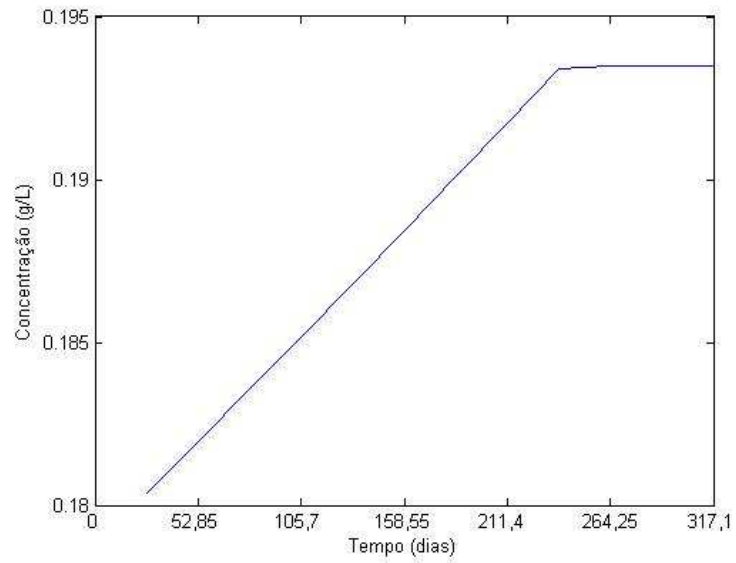


Figura 19 - Variação da concentração ao longo do tempo profundidade máxima

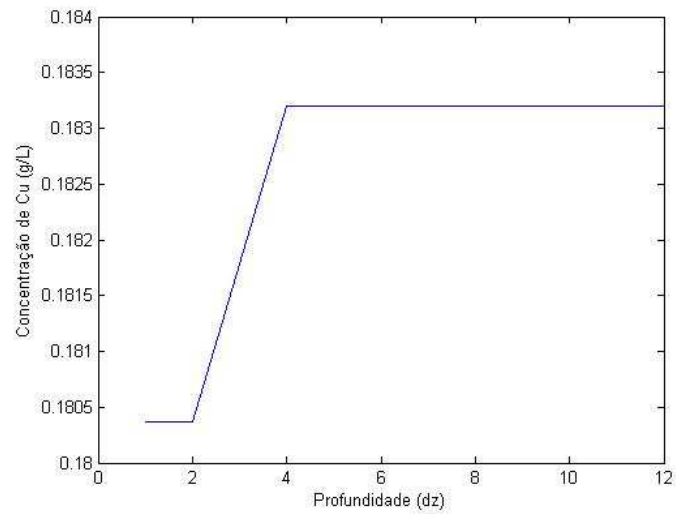


Figura 20 - Variação da concentração no tempo inicial e ao longo da profundidade

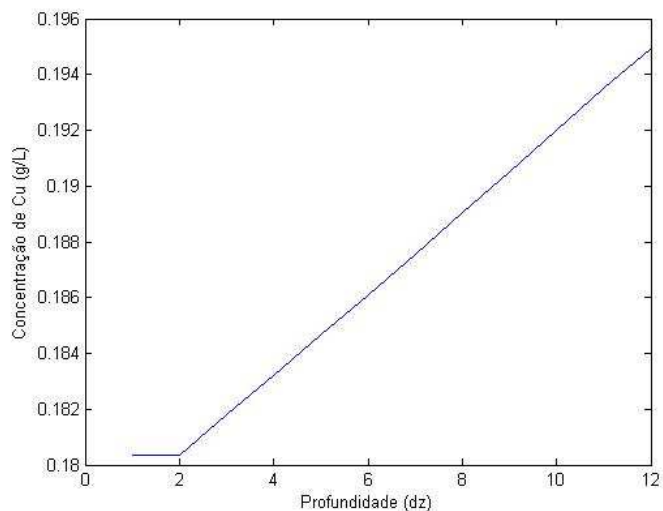


Figura 21 - Variação da concentração no tempo final e ao longo da profundidade

Na figura do gráfico 17 a evolução da concentração dá-se do seguinte modo:

O valor da concentração varia linearmente de 0,1803 g/L a 0,1818 g/L em 52 dias.

O valor da concentração mantém-se constante no valor de 0,1818 g/L durante o resto dos 264,25 dias.

Evolução da concentração no gráfico da figura 18:

Em 130 dias a concentração varia linearmente de 0,180 g/L a 0,1865 g/L, mantendo-se constante no valor de 0,1865 g/L durante os resto do tempo (211 dias, aproximadamente).

Comportamento da concentração no gráfico da figura 19:

Em 220 dias a concentração aumenta linearmente de 0,18 g/L a 0,195 g/L, mantendo-se constante no valor de 0,195 g/L durante os 100 dias finais.

Variação da concentração descrita no gráfico da figura 20:

Em profundidades iniciais (2 metros) a concentração mantém-se constante no valor de 0,159 g/L, aumentando linearmente o seu valor de 0,159 g/L a 0,16255 g/L durante os 2 metros seguintes e mantendo o seu valor constante ao longo das restantes camadas da escombreira.

Descrição da variação da concentração no gráfico da figura 21:

A concentração mantém-se constante no valor de 0,159 g/L nos 2 metros iniciais, crescendo linearmente de 0,159 g/L a 0,177 g/L ao longo da escombreira.

Assim sendo, pode-se averiguar que o valor máximo da contaminação em cobre é de 0,195 g/L no tempo máximo e em profundidade máxima - zona de fronteira com a unidade geológica de contaminação.

- Mercúrio (Hg)

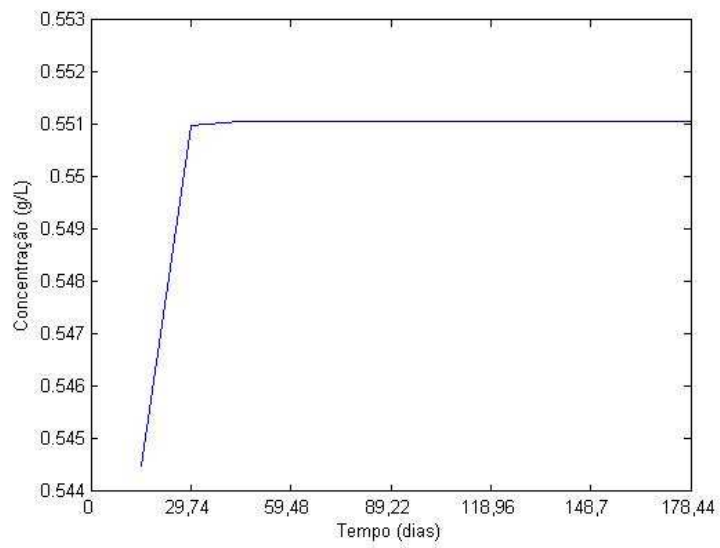


Figura 22 - Variação da concentração ao longo do tempo e profundidade inicial

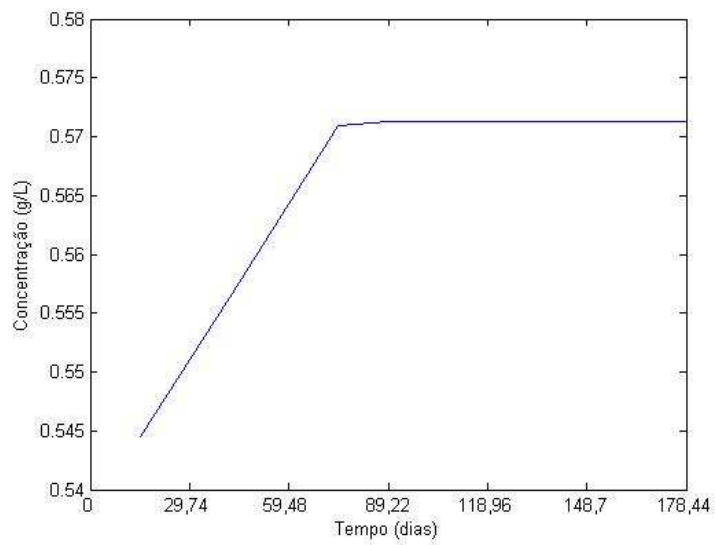


Figura 23 - Variação da concentração ao longo do tempo e profundidade média

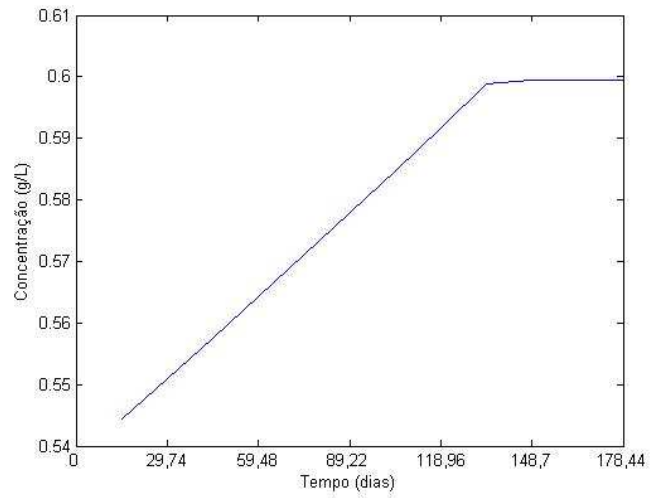


Figura 24 - Variação da concentração ao longo do tempo e profundidade máxima

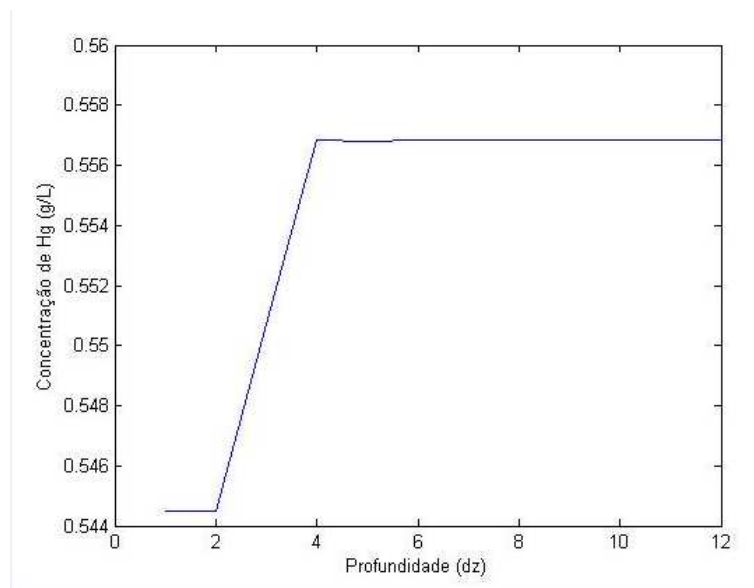


Figura 25 - Variação da concentração no tempo inicial e ao longo da profundidade

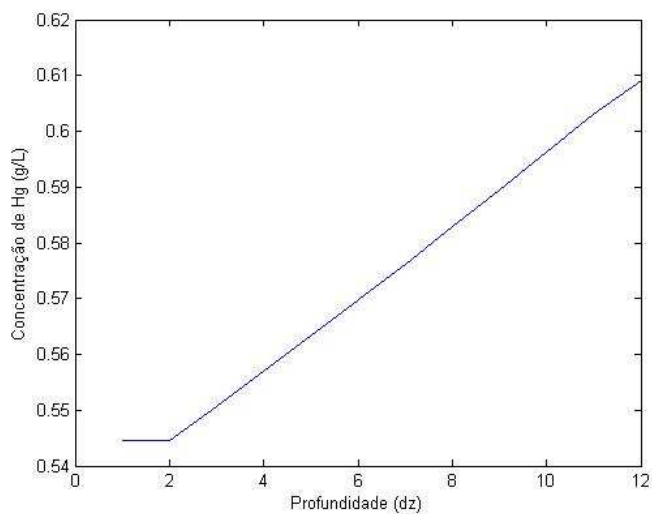


Figura 26 - Variação da concentração no tempo final e ao longo da profundidade

Na figura do gráfico 22 a evolução da concentração evolui da seguinte forma:

Durante 29,74 dias concentração varia linearmente de 0,5445 g/L a 0,5515 g/L, este valor mantém-se constante até ao tempo final, 178,44 dias.

Comportamento da concentração no gráfico da figura 23:

Durante os primeiros 65 dias a concentração varia linearmente de 0,545 g/L a 0,57 g/L mantendo-se constante em 0,57 g/L até ao tempo final.

Evolução da concentração no gráfico da figura 24:

A concentração varia linearmente de 0,545 g/L a 0,603 g/L durante os primeiros mantendo-se constante no valor de 0,603 g/L.

Varição da concentração descrita no gráfico da figura 25:

Nos primeiros 2 metros de profundidade a concentração mantém-se constante no valor de 0,5442 g/L, nos 2 metros seguintes a concentração varia linearmente de 0,5442 g/L a 0,557 g/L mantendo-se constante ao longo do resto da camada.

Descrição da variação da concentração no gráfico da figura 26:

Ao longo da camada inicial (2 metros) a concentração mantém-se constante no valor de 0,545 g/L, variando linearmente de 0,545 g/L a 0,609 g/L ao longo da escombreira.

Portanto, é possível apurar que o valor máximo da contaminação em mercúrio é de 0,609 g/L no tempo máximo e em profundidade máxima - zona de fronteira com a unidade geológica de contaminação.

- Selénio (Se)

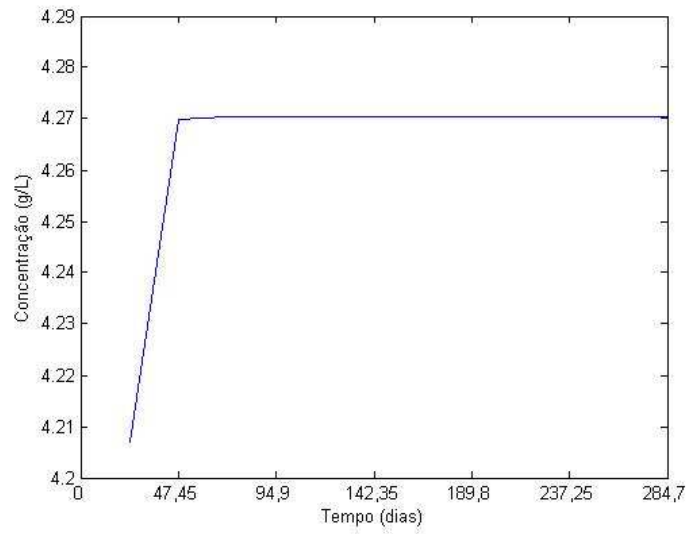


Figura 27 - Variação da concentração ao longo do tempo e profundidade inicial

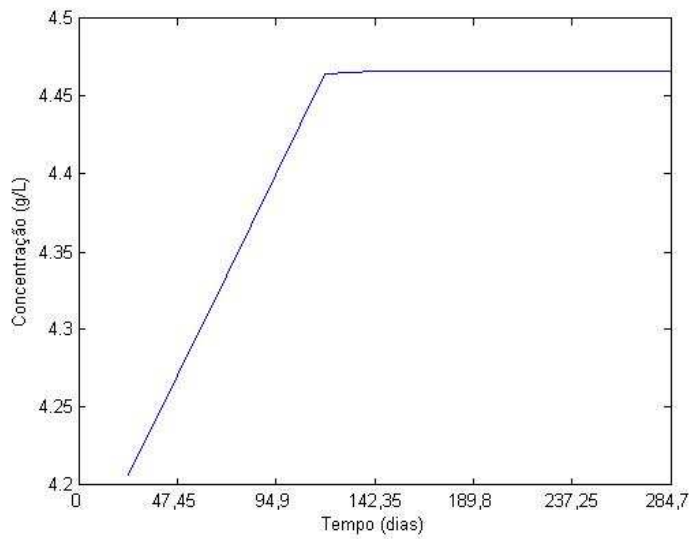


Figura 28 - Variação da concentração ao longo do tempo e profundidade média

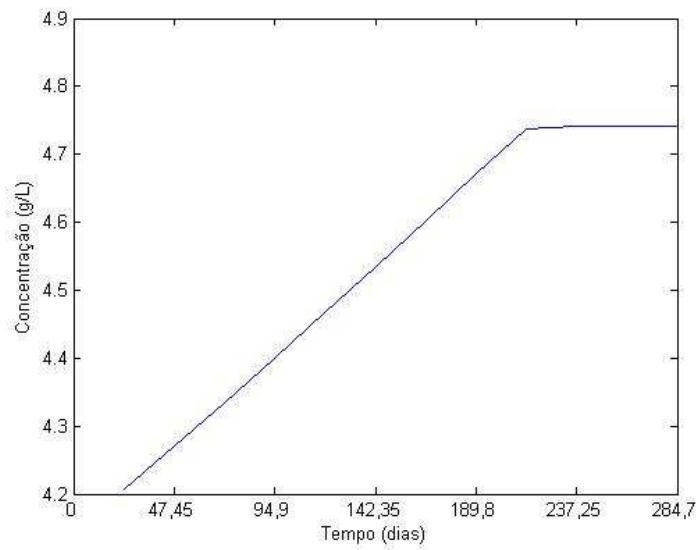


Figura 29 - Variação da concentração ao longo do tempo e profundidade máxima

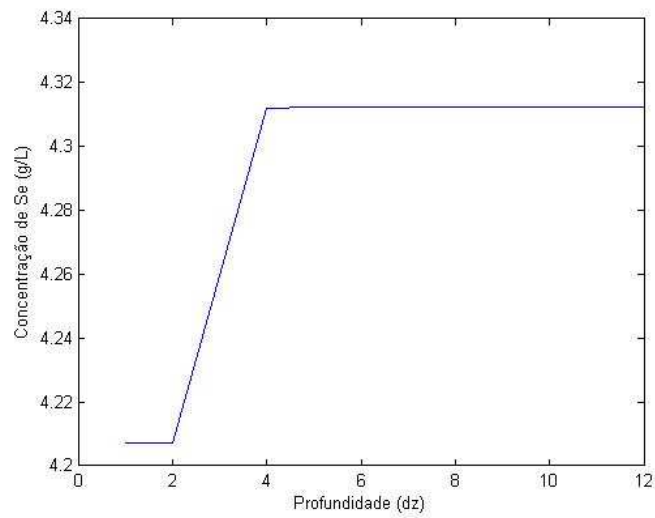


Figura 30 - Variação da concentração no tempo inicial e ao longo da profundidade

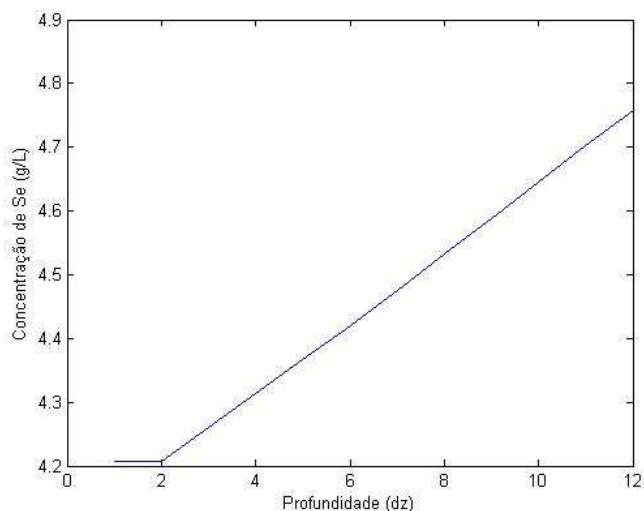


Figura 31 - Variação da concentração no tempo final e ao longo da profundidade

Na figura do gráfico 27 a evolução da concentração dá-se do seguinte modo:

Em 47,45 dias a concentração varia linearmente de 0,4205 g/L a 0,427 g/L mantendo-se constante até ao tempo final.

Evolução da concentração no gráfico da figura 28:

Em 100 dias a concentração varia linearmente de 0,421 g/L a 4,46 g/L, mantendo-se constante o resto do tempo.

Comportamento da concentração no gráfico da figura 29:

Em 220 dias a concentração varia linearmente de 4,2 g/L a 4,73 g/L mantêm-se constante até ao tempo final.

Variação da concentração descrita no gráfico da figura 30:

Ao longo da profundidade inicial (2 metros) a concentração mantêm-se constante no valor de 4,21 g/L, variando linearmente de 4,21 g/L a 4,31 g/L dos 2 aos 4 metros de profundidade mantendo-se constante até a profundidade final.

Descrição da variação da concentração no gráfico da figura 31:

A concentração mantém-se constante no valor de 4,2 g/L durante os 2 metros iniciais, variando linearmente de 4,2 g/L a 4,75 g/L ao longo do resto da camada.

Constata-se que o valor máximo da contaminação em selénio é de 4,75 g/L no tempo máximo e em profundidade máxima - zona de fronteira com a unidade geológica de contaminação.

- Zinco (Zn)

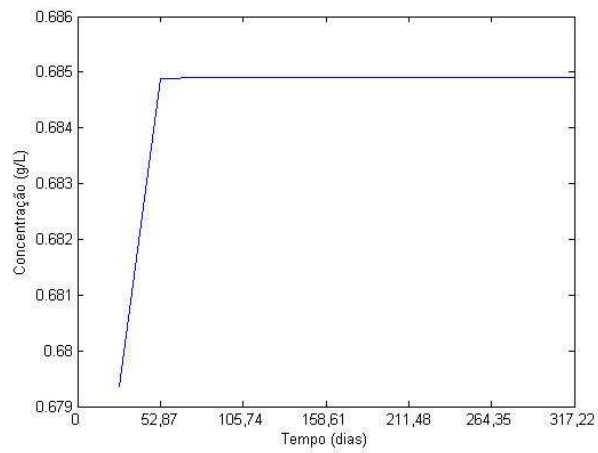


Figura 32 - Variação da concentração ao longo do tempo e profundidade inicial

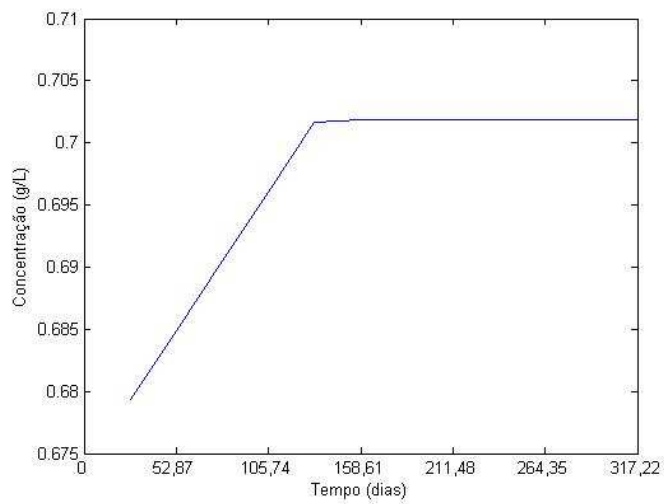


Figura 33 - Variação da concentração ao longo do tempo e profundidade média

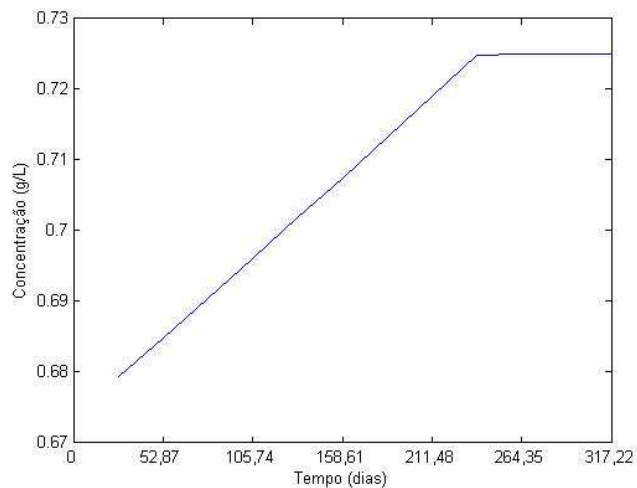


Figura 34 - Variação da concentração ao longo do tempo e profundidade máxima

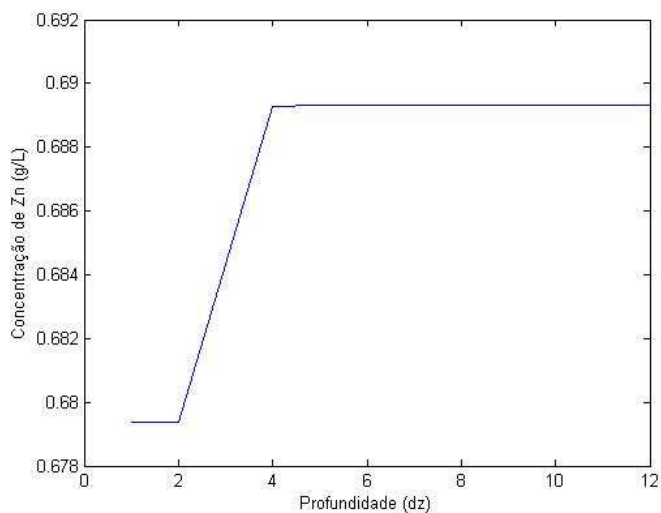


Figura 35 - Variação da concentração no tempo inicial e ao longo da profundidade

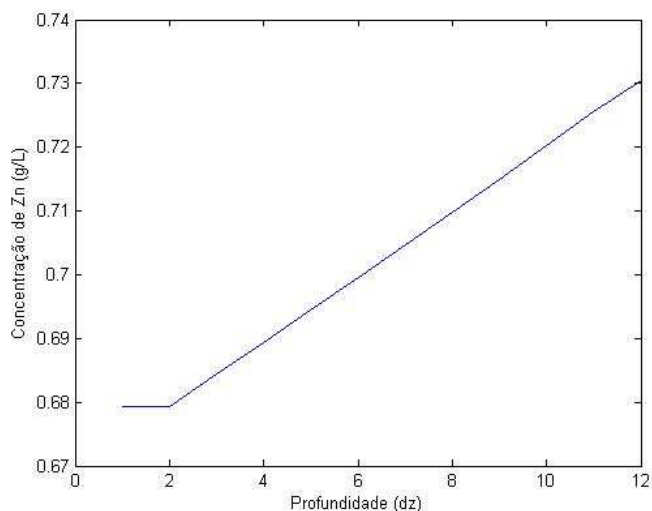


Figura 36 - Variação da concentração no tempo final e ao longo da profundidade

Na figura do gráfico 32 a evolução da concentração dá-se do seguinte modo:

Durante 52,87 dias a concentração varia linearmente de 0,679 g/L a 0,6849 g/L mantendo-se constante no valor de 0,6849 g/L até ao tempo final.

Evolução da concentração no gráfico da figura 33:

Em 120 dias a concentração varia linearmente de 0,677 g/L a 0,7025 g/L, mantendo-se constante até ao tempo final.

Comportamento da concentração no gráfico da figura 34:

Em 230 dias a concentração varia linearmente de 0,68 g/L a 0,725 g/L. A concentração mantém-se constante no valor de 0,725 g/L até ao tempo final.

Variação da concentração descrita no gráfico da figura 35:

De 1 a 2 metros de profundidade a concentração mantém-se constante no valor de 0,679 g/L, variando linearmente de 0,679 g/L a 0,6889 g/L dos 2 aos 4 metros de profundidade, ficando constante até ao fundo da escombreira.

Descrição da variação da concentração no gráfico da figura 36:

De 1 a 2 metros de profundidade a concentração mantém-se constante no valor de 0,68 g/L, a concentração varia linearmente de 0,68 g/L a 0,73 g/L até a profundidade máxima.

Assim sendo, podemos averiguar que o valor máximo da contaminação em Zinco é de 0,73g/L no tempo máximo e em profundidade máxima - zona de fronteira com a unidade geológica de contaminação.

De modo a ter uma melhor percepção da evolução/comportamento da concentração dos diferentes tipos de contaminantes foi efectuado o seguinte gráfico.

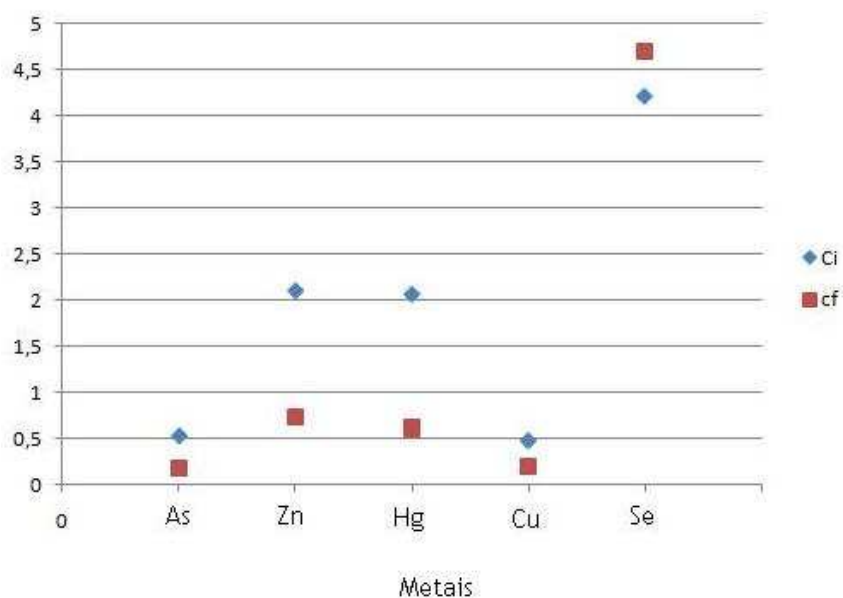


Figura 37- Gráfico comparativo de variação da concentração em g/L na escombreira

Avaliando a relação entre a concentração inicial e final dos contaminantes, é possível verificar que o As, o Cu e o Se são os contaminantes cuja variação da concentração tem menor amplitude. Significa que estes contaminantes têm uma elevada capacidade de dissolução contaminando a água subterrânea mais rapidamente e em mais quantidade relativamente ao Zn e ao Hg.

O Zn e o Hg, são contaminantes que não se dissolvem com tanta facilidade logo não contaminam tão facilmente as águas.

No entanto necessário será relembrar que a quantidade (em g/L) de contaminante na água depende fortemente do teor em sólido. Por mais alto que seja o poder de dissolução de um

contaminante, se este existir em pouca quantidade, como é o caso do cobre, o grau de contaminação da água em cobre nunca vai ser elevado.

Ao contrário existe o exemplo do zinco, que por mais baixo que seja o seu poder de dissolução, sendo o seu teor em sólido elevado, a água vai estar contaminada com elevados valores de zinco.

4.2 Modelo 3D

4.2.1 Transporte de contaminante dentro na unidade de contaminação.

Esta análise consiste em estudar a variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade em 3 pontos-chave, sendo estes os 2 vértices opostos do paralelepípedo (coordenadas $y=3$ $z=3$ e $y=11$ $z=11$) e um ponto central de coordenadas $y=6$ e $z=6$. É necessário ter em conta que, devido a simplificações na implementação do método numérico em Matlab, as coordenadas $x=3$, $y=3$ e $z=3$ são consideradas as coordenadas iniciais.

Para uma melhor percepção dos gráficos que caracterizam o comportamento da variação da concentração dos contaminantes ao longo da unidade geológica é necessário tornar claro que a escombreira assume uma geometria 3D e, ao contrario do exemplo anterior, não está impermeabilizado na base.

Neste caso, como o estudo efectuado é tridimensional, as velocidades nas diferentes direcções também vão variar. Devido a simplificações a nível de programação, as coordenadas geográficas vão ser (x , y e z) no entanto x vai ser atribuído à profundidade, y à largura e z ao comprimento da unidade geológica. Apresenta-se em seguida um quadro com as condições iniciais de cada ensaio.

Condições iniciais comuns (factor correctivo $\lambda = 1/16$; porosidade $\varepsilon = 0.4$)

Elementos	Teor (g/kg)	dt (dias)	v_x (m/s)	v_y (m/s)	v_z (m/s)
Mn	1,15	46,60	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$
Cu	0,487	47,49	$4,7 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$
Zn	2,106	49,39	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$3,12 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Hg	2,069	26,73	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$
As	0,541	26,92	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$
Se	4,207	42,65	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$9,6 \cdot 10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^{-6}$
Pb	0,071	26,30	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$
Ag	0,175	36,46	$7,2 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$
Cd	0,047	35,76	$6,2 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$

Tabela 5- Condições iniciais para a unidade geologia de contaminação

Nota - Relativamente aos gráficos que descrevem o comportamento ao longo da unidade geológica, verifica-se que a concentração aumenta com a profundidade e com o tempo independentemente do metal a ser estudado. Todas as análises foram efectuadas seguindo esta linha de raciocínio.

- Arsénio (As)

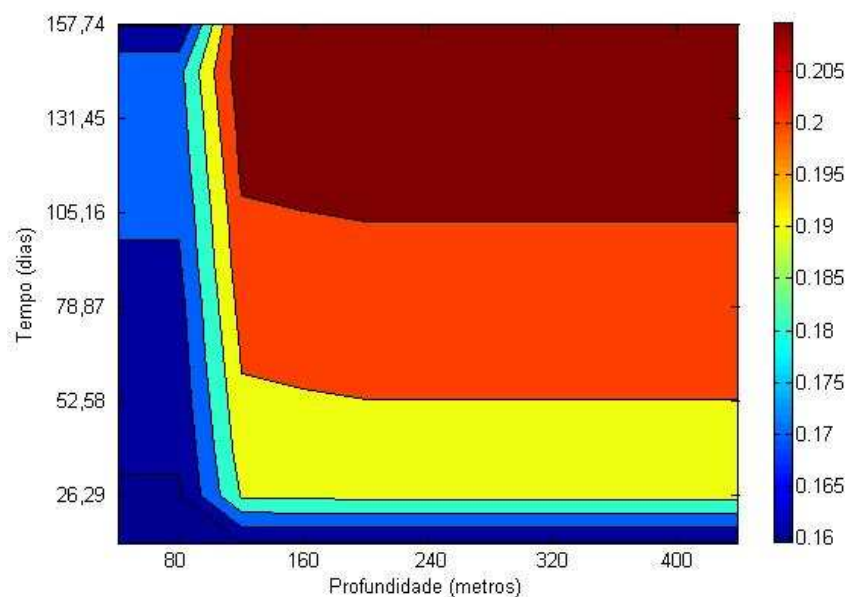


Figura 38 - Variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade, para y=3 e z=3

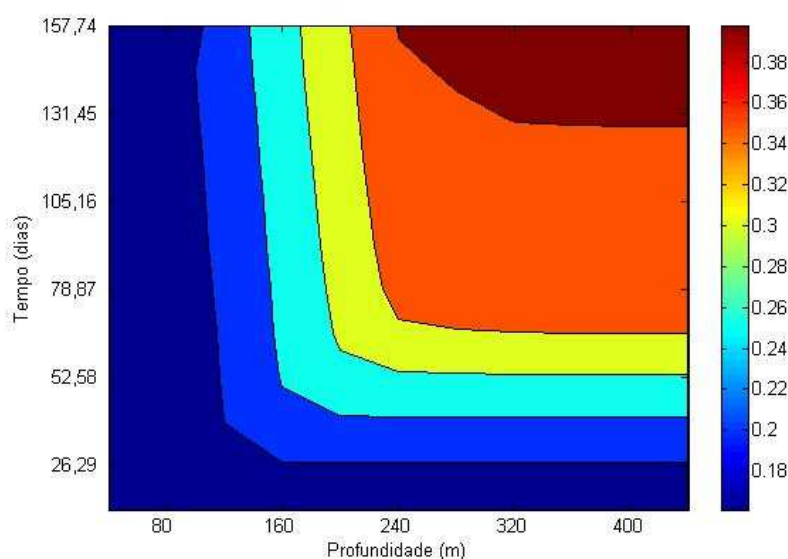


Figura 39- Variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade, para y=6 e z=6

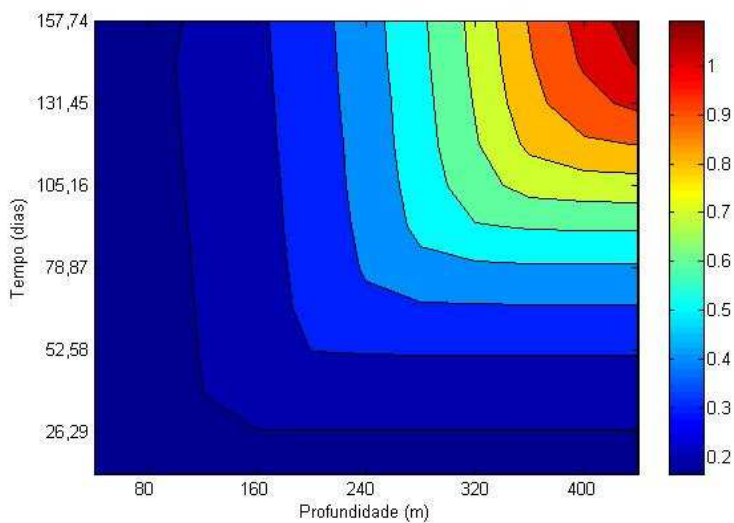


Figura 40 - Variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade, para $y=11$ e $z=11$

Para o ponto $y=3$ $z=3$, a concentração varia 0,05 g/L desde o tempo inicial e camada superficial até ao tempo máximo e profundidade máxima. O arsénio demora 131,45 dias a atingir a concentração máxima a 160 metros de profundidade.

Ao analisar a posição $y=6$ $z=6$ verifica-se que a amplitude da variação da concentração aumenta para 0,2g/L i.e., os valores de concentração mínima neste ponto estão na mesma ordem de valores de concentração máxima obtida no gráfico anterior.

Para a posição $y=11$ $z=11$, a variação de concentração está no valor de 0,8g/L atingindo valores muito altos pois está no vértice extremo, percorrendo assim toda a unidade geológica atingindo as concentrações mais altas.

Tendo em conta que a velocidade ao longo do eixo dos yy é mais alta que ao longo do eixo dos zz , estes resultados demonstram coerência.

- Cobre (Cu)

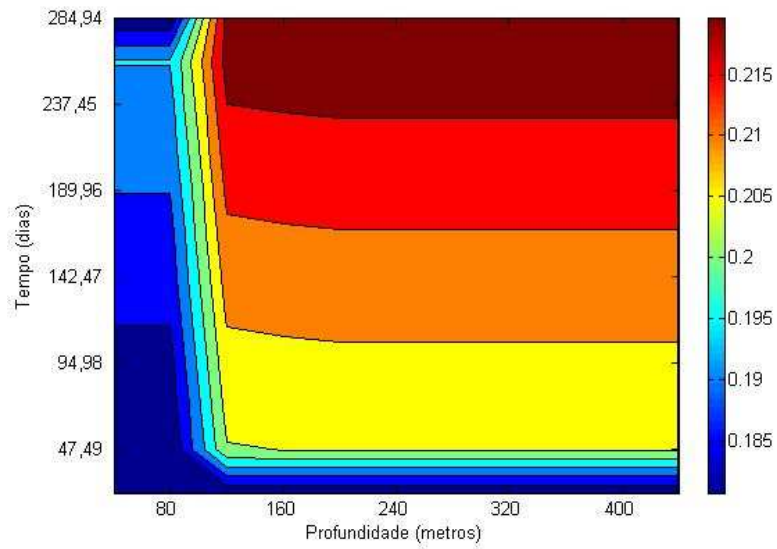


Figura 41 - Variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade, para y=3 e z=3

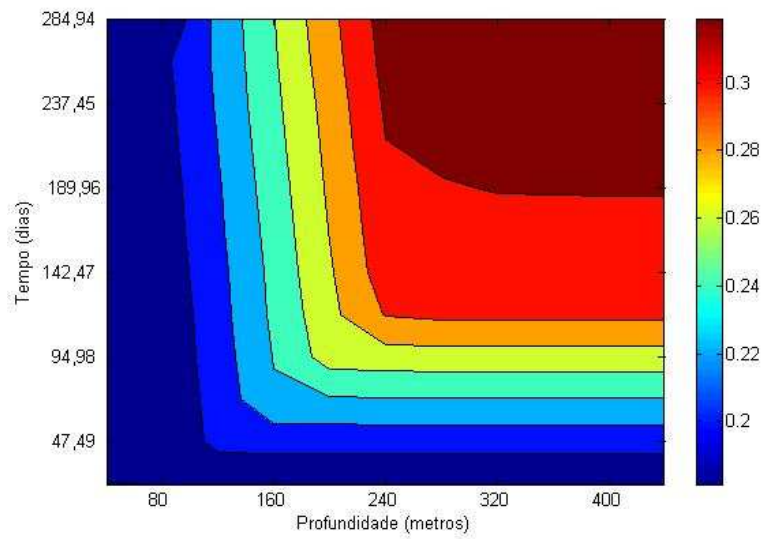


Figura 42- Variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade, para y=6 e z=6

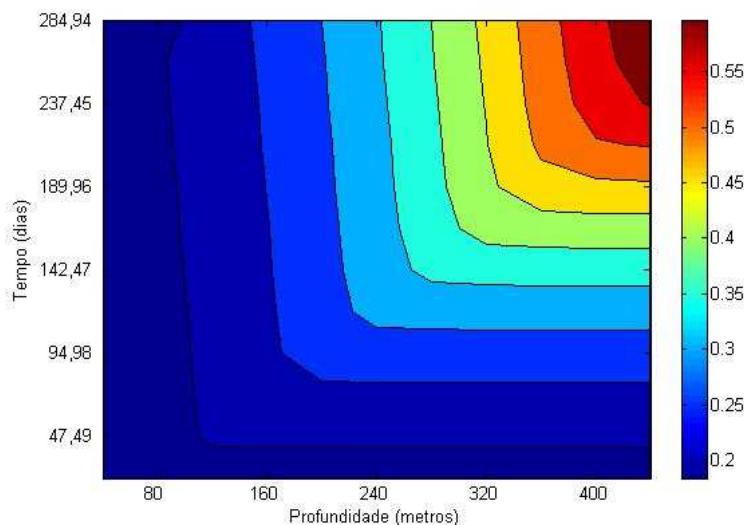


Figura 43 - Variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade, para $y=11$ e $z=11$

Ao analisar o gráfico da variação da concentração nas posições $y=3$ $z=3$ constata-se que a amplitude da concentração é de 0,03 g/L, atingindo 0,215 g/L de valor máximo, demonstrando um comportamento semelhante ao do As.

Para o ponto $y=6$ $z=6$ observa-se um comportamento diferente relativamente ao gráfico anterior. A amplitude do intervalo da variação da concentração é de 0,1g/L, sendo o valor máximo aproximadamente 0,35 g/L. A evolução da concentração ao longo do tempo dá-se de 22 em 22dias no entanto a partir dos 142,47 dias mantém-se constante até ao tempo final até a profundidade de 360 metros.

Relativamente as coordenadas $y=11$ e $z=11$, como já era esperado, o valor da amplitude aumenta para 0,35 g/L, variando quase linearmente ao longo do tempo e do espaço, atingindo uma concentração máxima de 0,55 g/L, quando o tempo e a profundidade são máximos.

- Mercúrio (Hg)

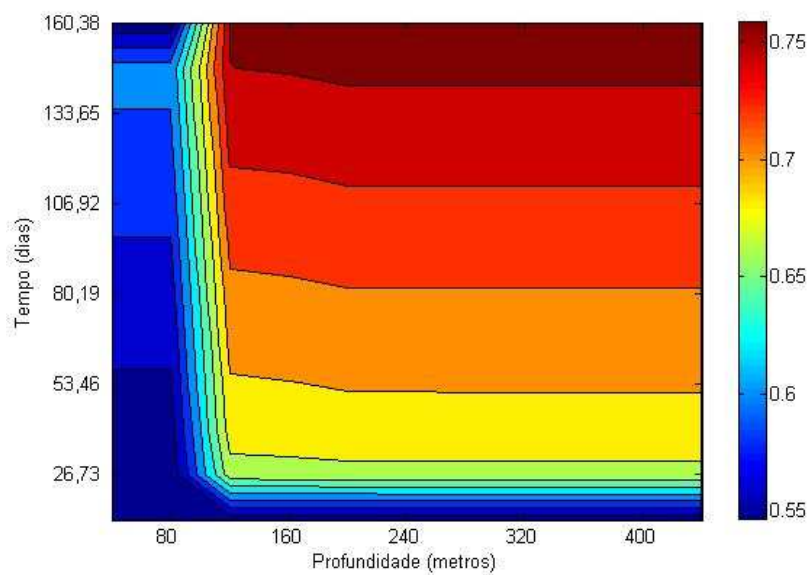


Figura 44 - Variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade, para $y=3$ e $z=3$

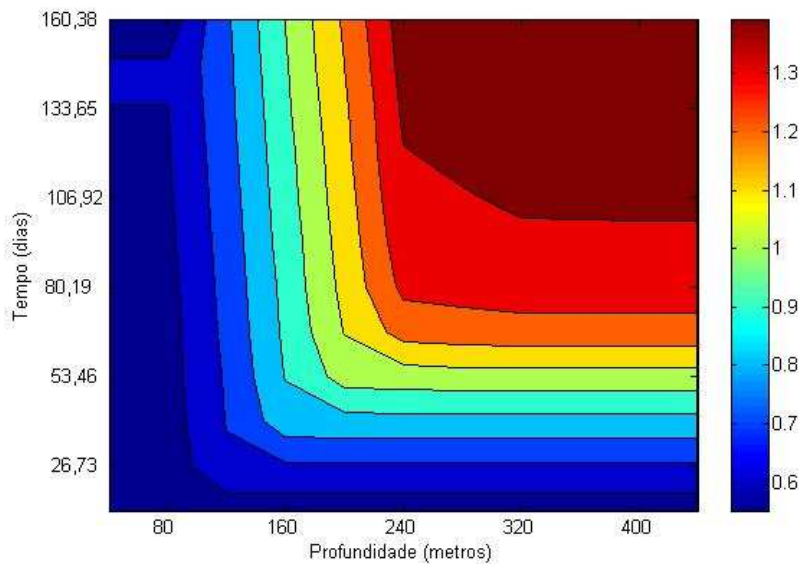


Figura 45- Variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade, para $y=6$ e $z=6$

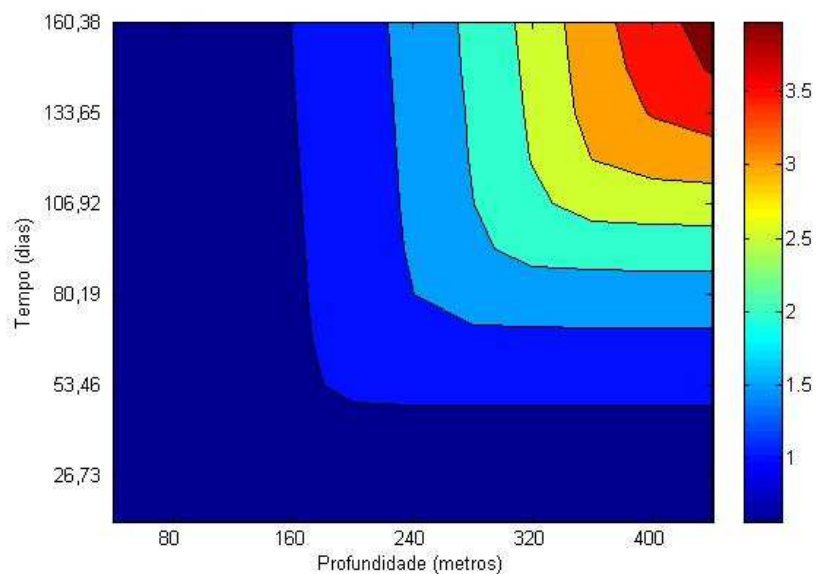


Figura 46 - Variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade, para $y=11$ e $z=11$

O mercúrio segue um comportamento semelhante ao do cobre relativamente no que diz respeito a posição (3,3) , no caso do mercúrio a amplitude da variação da concentração é de 0,2 g/L.

Relativamente ao gráfico que representa o comportamento da concentração no ponto $y=6$ $z=6$, constata-se que há um aumento de amplitude, valendo agora 0,7 g/L, sendo o valor menor próximo do valor de maior concentração nos pontos atrás estudados.

Estudando agora o gráfico 50 é possível apurar que a concentração aumenta significativamente, sendo que a variação oscila de 0,7 para 2,5 g/L, mantendo-se em valores de 1,5 g/L durante todo o tempo até à profundidade de 240 metros, sucedendo um crescimento quase linear, como se pode verificar pelas faixas, até à concentração de 3,5 g/L, esta é apenas atingida mesmo na última fracção de tempo e no fundo da camada.

- Selênio (Se)

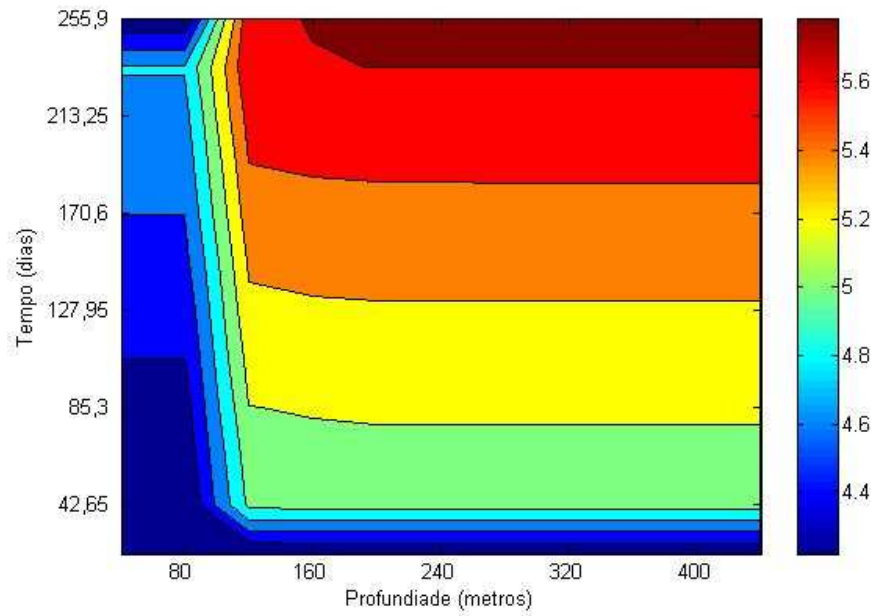


Figura 47 - Variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade, para $y=3$ e $z=3$

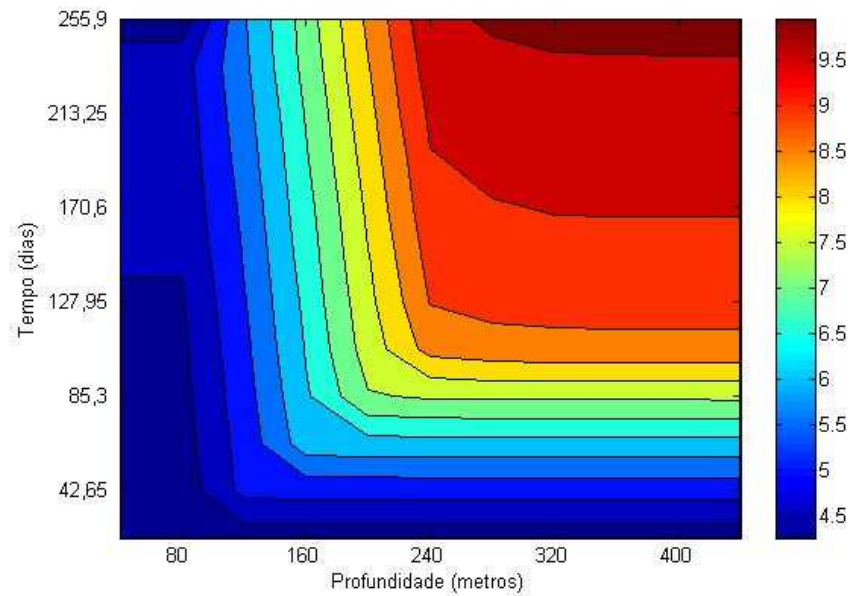


Figura 48 - Variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade, para $y=6$ e $z=6$

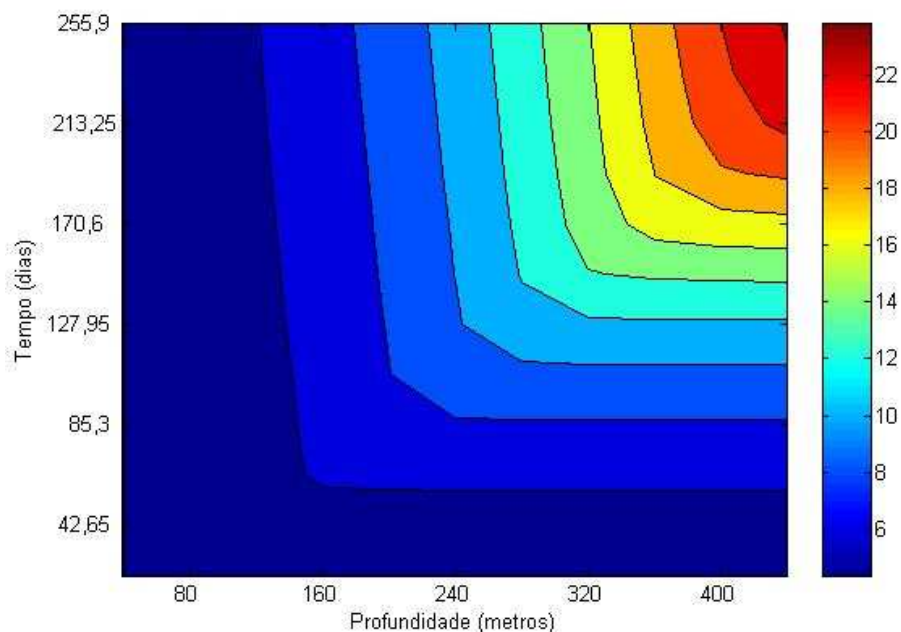


Figura 49- Variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade, para y=11 e z=11

Devido a ter-se admitido que todos os ensaios foram efectuados considerando velocidades intersticiais iguais para todos os metais, o comportamento do contaminante é semelhante em todos os casos, isto acontece com o selénio. Nesta situação a variação da concentração é bastante mais alta chegando a atingir valores na ordem de 1 g/L.

Para a posição y=6 z=6 os valores variam entre 4,5 e 9,5 ($\Delta C=5\text{g/L}$) e para y=11 z=11 a concentração assume os valores mais altos deste estudo, variando de 6g/L a 22g/L

- Zinco (Zn)

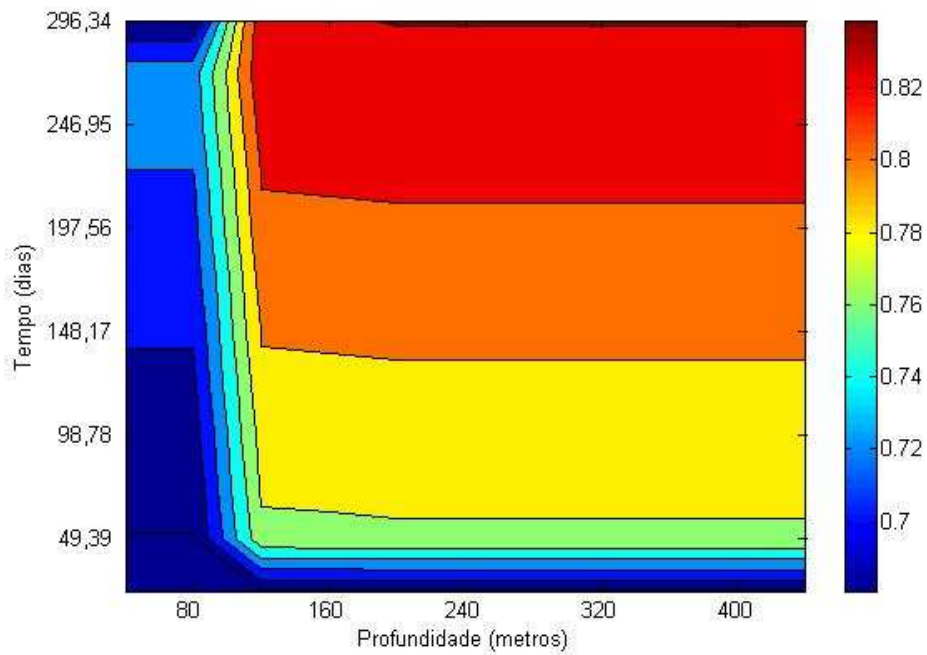


Figura 50 - Variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade, para $y=3$ e $z=3$

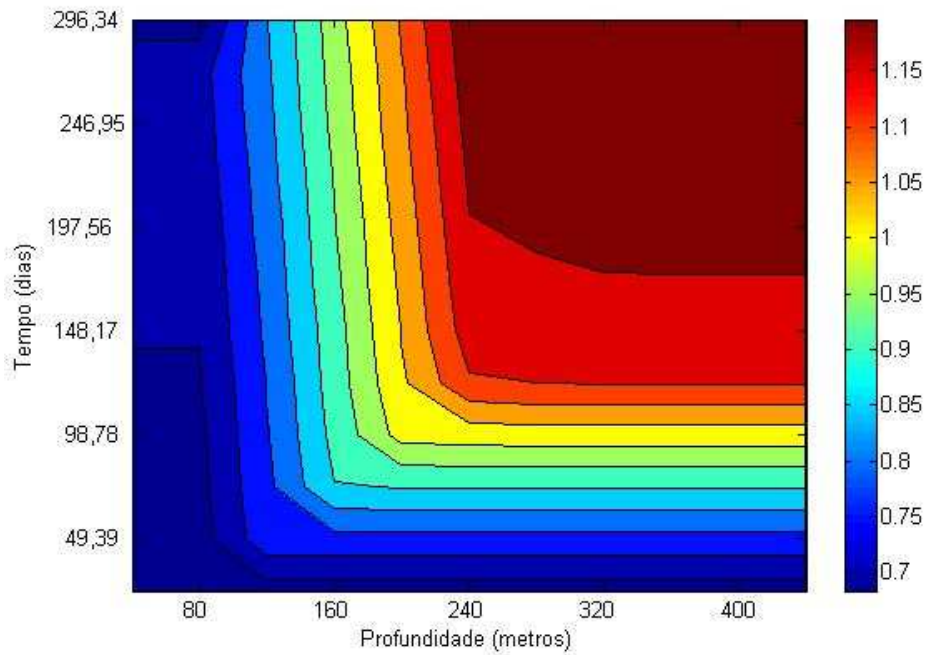


Figura 51 - Variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade, para $y=6$ e $z=6$

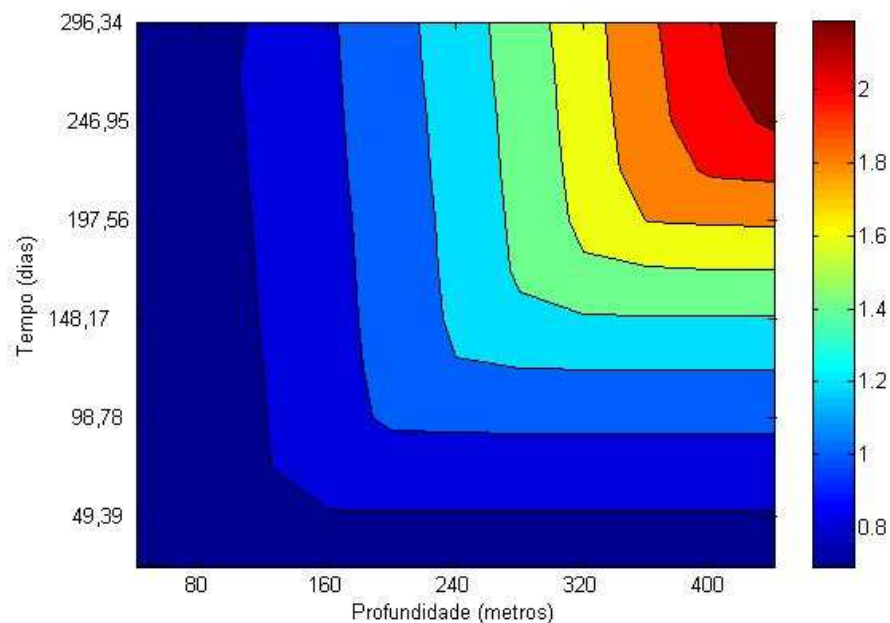


Figura 52 - Variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade, para $y=11$ e $z=11$

Para o caso do zinco as afirmações feitas na análise anterior também são válidas.

Para a posição de $y=3$ $z=3$, a concentração varia de 0,66 a 0,82g/L, para o caso de $y=6$ $z=6$ esta variação assume o valor de 0,4g/L e finalmente para $y=11$ $z=11$ os valores variam de 0,8 a 1,8 g/L.

Após o estudo de todos os gráficos podemos concluir que o metal pesado que apresenta maior concentração é o selénio, atingindo valores de 4,74 g/L na escombreira e de 8,5g/L na unidade geológica na posição $y=11$ $z=11$.

Estes valores causam uma elevada preocupação. O selénio é um metal extremamente tóxico, a sua ingestão por parte de seres humanos e animais pode causar um vasto leque de doenças. Uma água com estas concentrações de selénio seria imprópria para qualquer tipo de consumo. Igualmente preocupante é o caso do arsénio e do mercúrio, embora em menores concentrações máximas (1g/L e 3,5g/L respectivamente), ambas representam perigos para a biota. De menor preocupação no que diz respeito à toxicidade é o caso do cobre e do zinco,

as suas concentrações máximas são: 0,55g/L e 1,15g/L (respectivamente), podendo-se considerar razoavelmente baixas tendo em consideração que são metais essenciais à vida humana.

Necessário é relembrar que os valores das concentrações acima indicadas são referentes à fronteira entre subsolo e aquífero. Como não se consideram efeitos de diluição provenientes de outras recargas do aquífero em questão torna-se incerta qualquer afirmação relativa à qualidade da água em questão.

5 Conclusões

Com inspiração num problema real de grande dimensão - as escombreliras da mina da Panasqueira, desenvolveu-se um modelo fenomenológico de transporte e destino de metais pesados na água subterrânea tendo a escombrelira como fonte de contaminação.

O modelo foi testado para valores de concentrações na fase sólida reais (resultados de análises químicas de uma amostra de resíduos da lavaria da Panasqueira). Os restantes parâmetros envolvidos no modelo foram retirados da bibliografia consultada. Todos os valores destes parâmetros (coeficientes de partilha, constantes cinéticas de decaimento, difusividades, etc.), como constantes empíricas que são, não estão isentas de uma variabilidade, que embora não esteja quantificada, não impede de usar os resultados do modelo para previsões reais. Tal só será possível, quando dispusermos de dados reais suficientes para fazer a calibração e validação do modelo.

O modelo 1D que foi aplicado ao estudo do transporte dos contaminantes na escombrelira mostrou-se robusto, no sentido em que os resultados obtidos pelo método analítico são concordantes com os resultados obtidos pelo método numérico das diferenças finitas. Esta conclusão foi confirmada pelo valor significativamente baixo obtido no cálculo dos erros absolutos.

Na integração numérica, o passo de integração no domínio do tempo foi calculado de modo a minimizar o erro e garantir a estabilidade do método.

Tanto o modelo 1D como o modelo 3D apresentaram resultados satisfatórios e coerentes. Estes resultados foram calculados a partir de dados reais, no entanto, apenas a análise química foi facultada. Os restantes dados foram empíricos, gerando assim valores fidedignos mas não exactos.

Desenvolvimentos Futuros

Para aplicações futuras e para uma maior precisão relativamente aos parâmetros usados no modelo será necessária uma recolha exhaustiva de dados reais, nomeadamente análises químicas, tanto da água como dos solos da envolvente da escombrelira de modo a calibrar e validar o modelo matemático. É essencial que os valores dos parâmetros empíricos sejam afinados de modo a validar e calibrar o modelo.

Para refinar este programa, pode-se ainda trabalhar a sua geometria, admitindo formas detalhadas para o cálculo do volume e considerar valores de precipitação, variáveis com o estado do tempo, e reacções químicas entre os contaminantes.

A tarefa de validação do modelo envolve a continuação do desenvolvimento do programa em Matlab, acrescentando-lhe uma rotina de optimização.

Referências

- [1] Allison, Jerry D., Allison, Terry L. Partition Coefficients for Metals in Surface Water, Soil and Waste , U.S Environmental Protection Agency Office Research and Development , Washington D.C, Julho 2005
- [2] Bear, Jacob Verruijt, Arnold. Theory and Applications of Transport in Poros Media : Modelling Groundwater Flow and Pollution , D. Reidel Publishing Company Dordrecht, Holland, 1987
- [3] Chapra, Steven C. Canale, Raymond P. Métodos Numéricos para Engenheiros, Mcgraw-Hill Brasil 2008
- [4] Costa, Joaquim Botelho da. Caracterização e Constituição do Solo , Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa 1999
- [5] Domenico, Patrick A. , Schwartz, Franklin W. Physical an Chemical Hydrogeology, John Wiley & sons, Inc, U.S.A 1997
- [6] Fernandes, Manuel de Matos. Mecânica dos solos : Conceitos e Princípios Fundamentais Vol I , FEUP edições , Porto 2006
- [7] Fiúza, António . Protecção e Reabilitação de Solos e Aquíferos Contaminados, Edição 2004
- [8] Fiúza, António. Uma Introdução Às Equações Às Derivadas Parciais : Introdução, Modelagem, Resolução Utilizando o Matlab, Transformadas Integrais e sua Descritização
- [9] Gerson,W. Apontamentos de hidromineralugia : UFRJ 1985
- [10] Javandel, Iraj. Groundwater transport: handbook of mathematical models Washington, D.C. American Geophysical Union 1984.
- [11] Schnoor, Jerald L. Environmental Modeling : Fate and Transport of Pollutants in Water, Air and Soil , Wiley - Interscience publication , USA 1996
- [12](http://quimica_basica.sites.uol.com.br/silicato.jpg&imgrefurl=http://quimica_basica.sites.uol.com.br/silicates.htm&usq=__QYzbpS_y4Jts3ZH3fJxL-dPjbpQ=&h=213&w=400&sz=9&hl=pt-PT&start=14&um=1&tbnid=ucTN9m30-yTj4M:&tbnh=66&tbnw=124&prev=/images%3Fq%3Dmolecula%2Bsilicatos%26hl%3Dpt-PT%26client%3Dfirefox-a%26rls%3Dorg.mozilla:pt-PT:official%26sa%3DN%26um%3D1) (Abril 2009)

- [13] (http://www.suderhsa.pr.gov.br/meioambiente/arquivos/Image/suderhsa/images/águas_origem.gif) (Abril 2009)
- [14] http://ltodi.est.ips.pt/mmoreira/PUBLICACOES_P/bernoulli_2003.pdf (Setembro de 2009)
- [15] www.fe.up.pt/~ldinis/cap4placas.pdf

Anexos

Anexo A

Capítulo I

Código do programa implementado

```
porosidade = input ('Qual a porosidade média ? (0.2, 0.3 ou 0.4) ')
```

```
densidade=2.2; %em Kg/dm3- para Rf ser adimensional
```

```
%calcula da concentração na água através de Ks em l/Kg
```

```
c0=0.541; %[g/Kg]
```

```
Ks=3.4;
```

```
ki=c0/Ks;
```

```
%calcula da velocidade entrando com efeito a sorção
```

```
Rf=1+((densidade*Ks)/porosidade);
```

```
v=0.04; %[m/s]
```

```
v1=v/porosidade;
```

```
vel=v1/Rf;
```

```
difusividade=12.88*10^-10; %[m^2/s]
```

```
D=difusividade*0.3; %difusividade efectiva =difusividade*inverso da tortuosidade
```

```
k=0.002;
```

```
lamda=1/6;
```

```
dz=1.5;
```

```
zfinal=10;
```

```
z1=0:dz:zfinal;
```

```
nz1=length(z1);
```

```
%control de estabilidade
```

```
dt=lamda*((dz)^2)/D;
```

```
tfinal=dt*nz1;
```

```
t=0:dt:tfinal;
```

```
nt=length(t);
```

```

for i=1 : nz1+1;
    for j=1 : nt;
        ce(i,j)=ki;
    end
end

%calculo do transporte do contaminante dentro da escombreira
for i=2 :nt;
    for j=3:nz1;
        dc=((dz^2*ce(i-1,j))+((dt*dz*vel-dt^2*D)*ce(i,j-1))+(dt*D*ce(i,j-2)))/(dz^2+(vel*dz*dt)-
(D*dt)+(k*dt*dz^2));
        ce(i,j)=ce(i-1,j-1)+dc;
    end
end
ce;

%calculo da matriz (a), condições fronteira, Zmáx em todos os tempos
%c(nz1,nt);
ce(nz1,:);
o=[ce(nz1,:)]';
for i=1: nt;
    a(i,:)= o(i);

end
a;

%características do solo
%assumimos que porosidade é igual a da escombreira
vxi=0.04;
vyi=0.03;
vzi=0.02;
vx1=vxi/porosidade;

```

```
vy1=vyi/porosidade;  
vz1=vzi/porosidade;  
vx=vx1/Rf  
vy=vy1/Rf  
vz=vz1/Rf  
Dx=D;  
Dy=D;  
Dz=D;  
k=0.002;  
%volume variável  
%dimensões em m  
xfinal=40;  
yfinal=300;  
zfinal=200;  
ni=nz1;  
dx=xfinal/ni;  
dy=yfinal/ni;  
dz=zfinal/ni;  
x=0:dx:xfinal;  
y=0:dy:yfinal;  
z=0:dz:zfinal;  
nx=length(x)-1;  
ny=length(y)-1;  
nz=length(z)-1;  
%control de estabilidade  
lamda2=1/16;  
dt=lamda2*(((dx)^2)+((dy)^2)+((dz)^2))/D  
tfinal=dt*ni;
```

```

t=0:dt:tfinal;
nt=length(t);
% da matriz de apoio para calcular o transporte p metodo das dif.finitas
for i=1 : nt;
    for j=1 : nx;
        for l=1 : ny;
            for m=1:nz;
c(i,j,l,m)=a(i,,:, :, :);
                end
            end
        end
    end
end
c;
%calculo do transporte dentro do solo
for i=2 :nt
    for j=3:nx
        for l=3: ny
            for m=3: nz
dc1 = ((dt*dx^2*dy^2*dz^2)/((dx^2*dy^2*dz^2)+(vx*dt*dx^2*dy^2*dz^2)+ ...
(vy*dt*dx^2*dy*dz^2)+(vz*dt*dx^2*dy^2*dz)-(Dx*dt*dy^2*dz^2)- ...
(Dy*dt*dx^2*dz^2)-(Dz*dt*dx^2*dy^2)+(k*dt*dx^2*dy^2*dz^2)));

dc = dc1 * ((c(i-1,j,l,m)/dt)+(vx*(c(i,j-1,l,m)/dx))+(vy*(c(i,j,l-1,m)/dy))+ ...
(vz*(c(i,j,l,m-1)/dz))- ((2*Dx)/(c(i,j-1,l,m)/dx^2))+ ...
((Dx)*(c(i,j-2,l,m)/dx^2))-((2*Dy)/(c(i,j,l-1,m)/dy^2))+ ...
((Dy)*(c(i,j,l-2,m)/dy^2))-((2*Dz)/(c(i,j,l,m-1)/dz^2))+ ...
((Dz)*(c(i,j,l,m-2)/dz^2)));
c(i,j,l,m)=c(i-1,j-1,l-1,m-1)+dc;
            end
        end
    end
end

```

end
end
end
end

c;

Manual de implementação:

Secção I - Caracterização do material da escombreira

O utilizador escolhe o valor da porosidade entre 0,2 ; 0,3 ; 0,4, após esta escolha dá-se a entrada das seguintes constantes;

- c_0 - concentração de contaminante no solo
- K_s - Constante de partilha solo-água para o contaminante a estudar
- v - velocidade
- densidade - densidade do solo
- D - difusibilidade do material
- K - constante de decaimento cinético do contaminante

Com estes valores calculam-se;

- K_i - concentração inicial na água (equação 2.5)
- R_f - o efeito do retardamento devido ao efeito da sorção (equação 2.6)
- v_1 - velocidade intersticial da água (equação 3.9)
- vel - velocidade intersticial da água contaminada (equação 2.7)

Secção II - Dimensionamento dos vectores tempo e profundidade ,pois há a necessidade de eles terem o mesmo tamanho e controle da estabilidade do método numérico

Dá-se entrada das seguintes constantes;

- λ - constante que controla a estabilidade do método numérico
- dz - variação da profundidade

- z_{final} - altura total da escombreira

Determina-se assim:

- z_1 - dimensionamento vector profundidade
- nz_1 - dimensão do vector profundidade
- dt - variação do tempo (equação 4.kk coisa)
- t_{final} - tempo máximo que demora água a chegar ao fim da escombreira
- t_1 - dimensionamento vector tempo
- nt_1 - dimensão do vector tempo;

Secção III- Criação de uma matriz quadrática de apoio ao cálculo de transporte e cálculo da variação da concentração ao longo do tempo e da profundidade;

Nas primeiras cinco linhas de programação pertencentes a esta secção cria-se uma matriz, $ce(i,j)$, de dimensões $nz+1$ por nt . Implementa-se assim um ciclo for que corre todas as posições i , (de 1 a $nz+1$) e de j , (de 1 a nt) atribuindo-lhe o valor de ki .

O segundo ciclo for calcula, para as posições de $i = 2$ a nz_1 e $j = 3$ a nt , os valores da variação da concentração, dc , através da equação do transporte a uma dimensão espacial (equação 3.kkcoisa), adicionando de seguida dc ao valor de ki .

Secção IV - Calculo do vector de condições fronteira entre a escombreira e o solo;

Este ciclo for cria um vector coluna com a dimensão nt onde as suas posições são ocupadas pelos valores de $z_{máx}$ desde o tempo igual a 1 até ao tempo final (nt).

Secção V - Caracterização do solo e seu dimensionamento

Definem-se as seguintes constantes;

- v_{xi} - velocidade ao longo do eixo dos xx
- v_{yi} - velocidade ao longo do eixo dos yy
- v_{zi} - velocidade ao longo do eixo dos zz
- D_x - constante de difusão ao longo dos xx
- D_y - constante de difusão ao longo dos yy
- D_z - constante de difusão ao longo dos zz
- K - constante de decaimento cinético do solo

- x_{final} - altura da camada de destino do contaminante
- y_{final} - largura da camada de destino do contaminante
- z_{final} - comprimento da camada de destino do contaminante
- λ_2 - constante que controla a estabilidade do método numérico
- n_i - numero de intervalos em que o método numérico deve ser implementado

Com a atribuição destes valores calculam-se os seguintes parâmetros;

- v_{x1} - velocidade intersticial da água ao longo do eixo dos xx (equação 3.9)
- v_{y1} - velocidade intersticial da água ao longo do eixo dos yy (equação 3.9)
- v_{z1} - velocidade intersticial da água ao longo do eixo dos zz (equação 3.9)
- v_x - velocidade intersticial da água contaminada ao longo do eixo dos xx (equação 2.7)
- v_y - velocidade intersticial da água contaminada ao longo do eixo dos yy (equação 2.7)
- v_z - velocidade intersticial da água contaminada ao longo do eixo dos zz (equação 2.7)
- dx - variação da altura
- dy - variação da largura
- dz - variação do comprimento
- x - dimensionamento do vector altura
- y - dimensionamento do vector largura
- z - dimensionamento do vector comprimento
- N_C - dimensão do vector x
- n_y - dimensão do vector y
- n_z - dimensão do vector z
- dt - variação do tempo (equação 4.kkcoisa)

- t_{final} - tempo máximo considerado pela implementação do programa
- t - dimensionamento do vector tempo
- nt - dimensão do vector tempo

Secção VII- Geração de uma matriz de apoio ao cálculo de transporte e cálculo da variação da concentração espacial (x,y,z) e ao longo do tempo;

Implementa-se um ciclo *for* que atribui as posições da matriz $c(i,j,l,m)$, de $i=1$ até nt ; $j=1$ a NC ; $l=1$ a ny ; $m=1$ a nt , os valores do vector com as condições fronteiras calculado na secção IV. Obtemos assim uma matriz com os valores de condições iniciais.

Secção VIII - Calculo do transporte do contaminante no solo e da variação da concentração ao longo de (x,y,z) e do tempo;

Nesta secção o ciclo *for* calcula, para as posições de $i = 2$ a nt ; $j = 3$ a NC ; $l=3$ a ny e $m=3$ a NC , os valores da variação da concentração, dc , através da equação do transporte a três dimensões espaciais (equação 3.kkcoisa), adicionando de seguida dc aos valores de ki gerados na secção VII.

Anexo B

Classificação de contaminantes e caracterização dos contaminantes em estudo.



B. 1- Classificação dos contaminantes

Análise Química de um resíduo médio					
Elementos	Teor (ppm)	Teor (g/kg)	$D \cdot 10^{10} \text{m}^2/\text{s}^{[1][7]}$	MM(g/mol)	$K_s(\text{L/Kg})^{[1]}$
Mn	1150	1,15	7,44	66	4,2
Cu	487	0,487	7,3	63,54	2,7
Zn	2106	2,106	7,02	65	3,1
Hg	2069	2,069	12,97	200,59	3,8
As	541	0,541	12,88	197,84	3,4
Se	4207	4,207	8,13	79	1,0
Pb	71	0,071	13,18	207,19	4,2
Ag	175	0,175	9,51	108	2,6
Cd	47	0,047	9,70	112,4	2,9

B. 2- Valores característicos utilizados na implementação do programa

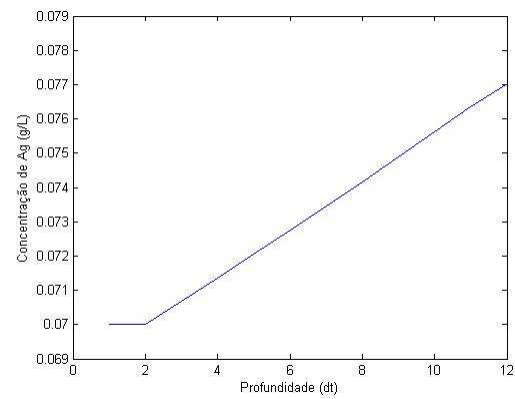
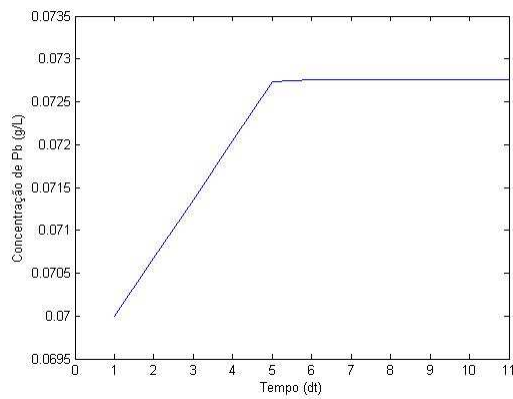
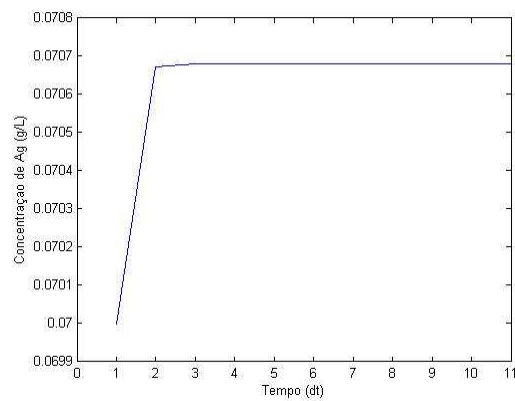
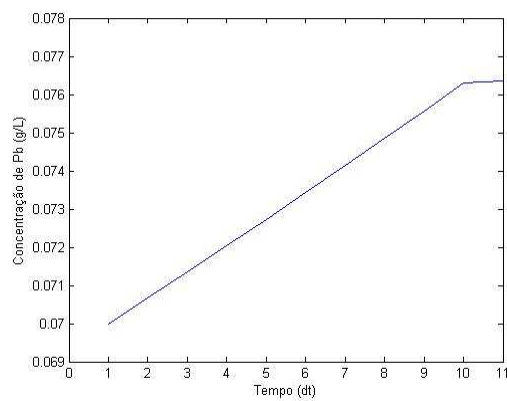
Anexo C

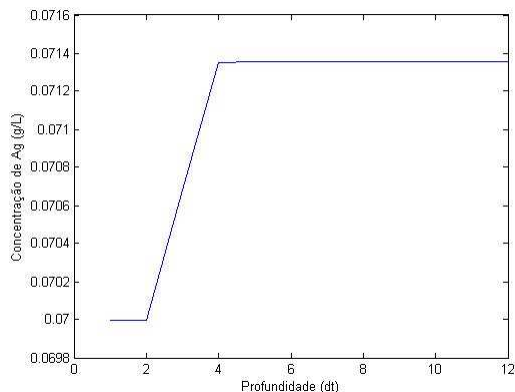
Prata:

- 1D

7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05
7,00E+05	7,00E+05	7,07E+05	7,07E+05	7,07E+05	7,07E+05	7,07E+05	7,07E+05	7,07E+05	7,07E+05	7,07E+05	7,07E+05
7,00E+05	7,00E+05	7,08E+05	7,15E+05	7,15E+05	7,15E+05	7,15E+05	7,15E+05	7,15E+05	7,15E+05	7,15E+05	7,15E+05
7,00E+05	7,00E+05	7,08E+05	7,15E+05	7,23E+05	7,23E+05	7,23E+05	7,23E+05	7,23E+05	7,23E+05	7,23E+05	7,23E+05
7,00E+05	7,00E+05	7,08E+05	7,15E+05	7,23E+05	7,30E+05	7,30E+05	7,30E+05	7,30E+05	7,30E+05	7,30E+05	7,30E+05
7,00E+05	7,00E+05	7,08E+05	7,15E+05	7,23E+05	7,31E+05	7,38E+05	7,38E+05	7,38E+05	7,38E+05	7,38E+05	7,38E+05
7,00E+05	7,00E+05	7,08E+05	7,15E+05	7,23E+05	7,31E+05	7,38E+05	7,46E+05	7,46E+05	7,46E+05	7,46E+05	7,46E+05
7,00E+05	7,00E+05	7,08E+05	7,15E+05	7,23E+05	7,31E+05	7,38E+05	7,46E+05	7,54E+05	7,54E+05	7,54E+05	7,54E+05
7,00E+05	7,00E+05	7,08E+05	7,15E+05	7,23E+05	7,31E+05	7,38E+05	7,46E+05	7,54E+05	7,62E+05	7,62E+05	7,62E+05
7,00E+05	7,00E+05	7,08E+05	7,15E+05	7,23E+05	7,31E+05	7,38E+05	7,46E+05	7,54E+05	7,62E+05	7,70E+05	7,70E+05
7,00E+05	7,00E+05	7,08E+05	7,15E+05	7,23E+05	7,31E+05	7,38E+05	7,46E+05	7,54E+05	7,62E+05	7,71E+05	7,78E+05
7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05

C. 1- Variação da concentração ao longo da escombreira





• 3D

1.

7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05
7,00E+05	7,00E+05	7,24E+05	7,26E+05	7,26E+05	7,26E+05	7,26E+05	7,26E+05	7,26E+05	7,26E+05	7,26E+05
7,74E+05	7,74E+05	7,42E+05	7,40E+05	7,39E+05	7,39E+05	7,39E+05	7,39E+05	7,39E+05	7,39E+05	7,39E+05
8,54E+05	8,54E+05	8,33E+05	8,32E+05	8,31E+05	8,31E+05	8,31E+05	8,31E+05	8,31E+05	8,31E+05	8,31E+05
9,43E+05	9,43E+05	9,36E+05	9,36E+05	9,36E+05	9,36E+05	9,36E+05	9,36E+05	9,36E+05	9,36E+05	9,36E+05
1,04E+06	1,04E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06
1,15E+06	1,15E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06
1,27E+06	1,27E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06
1,40E+06	1,40E+06	1,45E+06	1,45E+06	1,45E+06	1,45E+06	1,45E+06	1,45E+06	1,45E+06	1,45E+06	1,45E+06
1,54E+06	1,54E+06	1,61E+06	1,61E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06
1,68E+06	1,68E+06	1,78E+06	1,78E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06
1,77E+06	1,77E+06	1,94E+06	1,94E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06

C. 2- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=3 z=3

2.

7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05
7,00E+05	7,00E+05	7,28E+05	7,30E+05	7,31E+05	7,31E+05	7,31E+05	7,31E+05	7,31E+05	7,31E+05	7,31E+05
7,74E+05	7,74E+05	7,37E+05	7,66E+05	7,71E+05	7,73E+05	7,73E+05	7,73E+05	7,73E+05	7,73E+05	7,73E+05
8,54E+05	8,54E+05	8,30E+05	7,89E+05	8,19E+05	8,27E+05	8,29E+05	8,30E+05	8,30E+05	8,30E+05	8,30E+05
9,43E+05	9,43E+05	9,35E+05	9,04E+05	8,58E+05	8,89E+05	8,99E+05	9,03E+05	9,05E+05	9,05E+05	9,05E+05
1,04E+06	1,04E+06	1,05E+06	1,04E+06	9,99E+05	9,48E+05	9,80E+05	9,94E+05	9,99E+05	1,00E+06	1,00E+06
1,15E+06	1,15E+06	1,17E+06	1,18E+06	1,17E+06	1,12E+06	1,06E+06	1,10E+06	1,11E+06	1,12E+06	1,12E+06
1,27E+06	1,27E+06	1,31E+06	1,34E+06	1,35E+06	1,33E+06	1,27E+06	1,21E+06	1,24E+06	1,26E+06	1,27E+06
1,40E+06	1,40E+06	1,46E+06	1,51E+06	1,54E+06	1,55E+06	1,53E+06	1,46E+06	1,40E+06	1,41E+06	1,42E+06
1,54E+06	1,54E+06	1,62E+06	1,69E+06	1,75E+06	1,79E+06	1,80E+06	1,77E+06	1,70E+06	1,65E+06	1,65E+06
1,68E+06	1,68E+06	1,79E+06	1,89E+06	1,97E+06	2,04E+06	2,09E+06	2,11E+06	2,07E+06	2,01E+06	1,97E+06
1,77E+06	1,77E+06	1,96E+06	2,10E+06	2,21E+06	2,31E+06	2,40E+06	2,45E+06	2,47E+06	2,44E+06	2,40E+06

C. 3- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=11 z=11

3.

7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05
7,00E+05	7,00E+05	7,28E+05	7,30E+05	7,31E+05	7,31E+05	7,31E+05	7,31E+05	7,31E+05	7,31E+05	7,31E+05
7,74E+05	7,74E+05	7,37E+05	7,66E+05	7,71E+05	7,72E+05	7,72E+05	7,72E+05	7,72E+05	7,72E+05	7,72E+05
8,54E+05	8,54E+05	8,30E+05	7,90E+05	8,13E+05	8,18E+05	8,20E+05	8,20E+05	8,21E+05	8,21E+05	8,21E+05
9,43E+05	9,43E+05	9,35E+05	9,04E+05	8,66E+05	8,82E+05	8,87E+05	8,88E+05	8,89E+05	8,89E+05	8,89E+05
1,04E+06	1,04E+06	1,05E+06	1,04E+06	1,01E+06	9,74E+05	9,66E+05	9,64E+05	9,64E+05	9,64E+05	9,64E+05
1,15E+06	1,15E+06	1,17E+06	1,18E+06	1,17E+06	1,14E+06	1,14E+06	1,13E+06	1,13E+06	1,13E+06	1,13E+06
1,27E+06	1,27E+06	1,31E+06	1,34E+06	1,35E+06	1,34E+06	1,34E+06	1,33E+06	1,33E+06	1,33E+06	1,33E+06
1,40E+06	1,40E+06	1,46E+06	1,51E+06	1,54E+06	1,55E+06	1,55E+06	1,55E+06	1,55E+06	1,55E+06	1,55E+06
1,54E+06	1,54E+06	1,62E+06	1,69E+06	1,74E+06	1,77E+06	1,77E+06	1,77E+06	1,77E+06	1,77E+06	1,77E+06
1,68E+06	1,68E+06	1,79E+06	1,89E+06	1,96E+06	2,00E+06	2,01E+06	2,01E+06	2,01E+06	2,01E+06	2,01E+06
1,77E+06	1,77E+06	1,96E+06	2,09E+06	2,19E+06	2,26E+06	2,27E+06	2,27E+06	2,27E+06	2,27E+06	2,27E+06

C. 4- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=6 z=6

4.

7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05
7,00E+05	7,00E+05	7,26E+05	7,28E+05	7,28E+05	7,28E+05	7,28E+05	7,28E+05	7,28E+05	7,28E+05	7,28E+05
7,74E+05	7,74E+05	7,40E+05	7,37E+05	7,37E+05	7,37E+05	7,37E+05	7,37E+05	7,37E+05	7,37E+05	7,37E+05
8,54E+05	8,54E+05	8,31E+05	8,30E+05	8,29E+05	8,29E+05	8,29E+05	8,29E+05	8,29E+05	8,29E+05	8,29E+05
9,43E+05	9,43E+05	9,36E+05	9,35E+05	9,35E+05	9,35E+05	9,35E+05	9,35E+05	9,35E+05	9,35E+05	9,35E+05
1,04E+06	1,04E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06
1,15E+06	1,15E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06
1,27E+06	1,27E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06
1,40E+06	1,40E+06	1,46E+06	1,46E+06	1,46E+06	1,46E+06	1,46E+06	1,46E+06	1,46E+06	1,46E+06	1,46E+06
1,54E+06	1,54E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06
1,68E+06	1,68E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06
1,77E+06	1,77E+06	1,95E+06	1,96E+06	1,96E+06	1,96E+06	1,96E+06	1,96E+06	1,96E+06	1,96E+06	1,96E+06

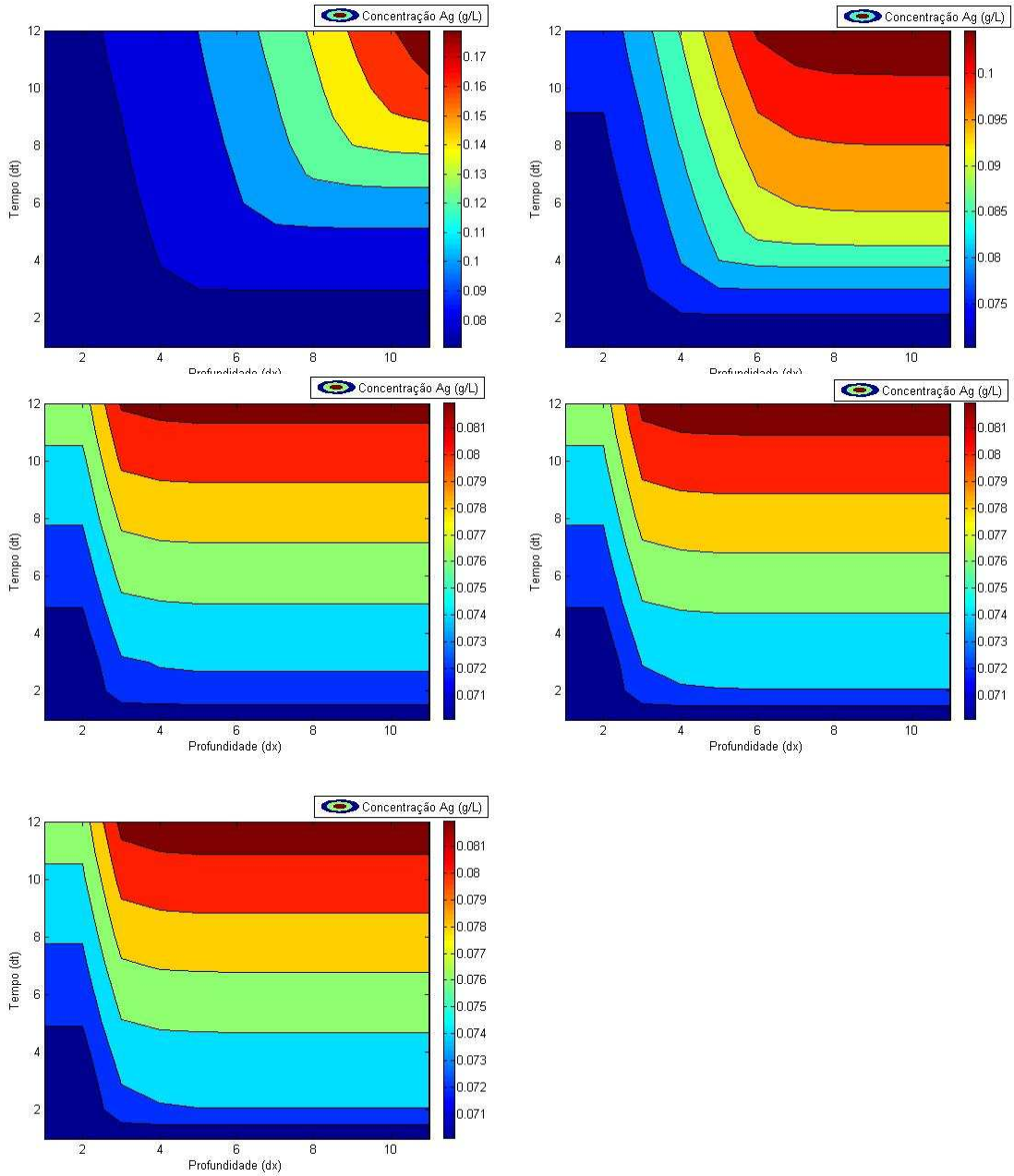
C. 5- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=3 z=11

5.

7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05	7,00E+05
7,00E+05	7,00E+05	7,26E+05	7,28E+05	7,28E+05	7,28E+05	7,28E+05	7,28E+05	7,28E+05	7,28E+05	7,28E+05
7,74E+05	7,74E+05	7,40E+05	7,37E+05	7,37E+05	7,37E+05	7,37E+05	7,37E+05	7,37E+05	7,37E+05	7,37E+05
8,54E+05	8,54E+05	8,32E+05	8,30E+05	8,30E+05	8,30E+05	8,30E+05	8,30E+05	8,30E+05	8,30E+05	8,30E+05
9,43E+05	9,43E+05	9,36E+05	9,35E+05	9,35E+05	9,35E+05	9,35E+05	9,35E+05	9,35E+05	9,35E+05	9,35E+05
1,04E+06	1,04E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06	1,05E+06
1,15E+06	1,15E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06	1,17E+06
1,27E+06	1,27E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06	1,31E+06
1,40E+06	1,40E+06	1,46E+06	1,46E+06	1,46E+06	1,46E+06	1,46E+06	1,46E+06	1,46E+06	1,46E+06	1,46E+06
1,54E+06	1,54E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,62E+06
1,68E+06	1,68E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,79E+06
1,77E+06	1,77E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06

C. 6- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=11 z=3

Modelação dinâmica do transporte e destino de metais pesados em depósitos de resíduos mineiros abandonados



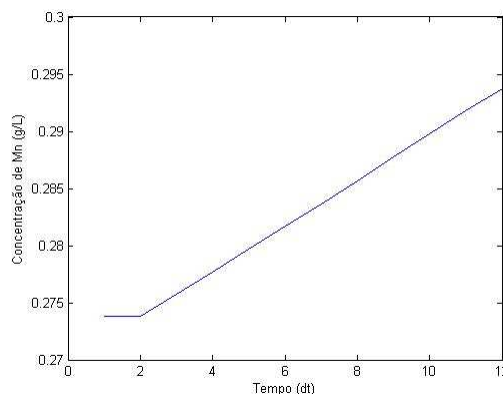
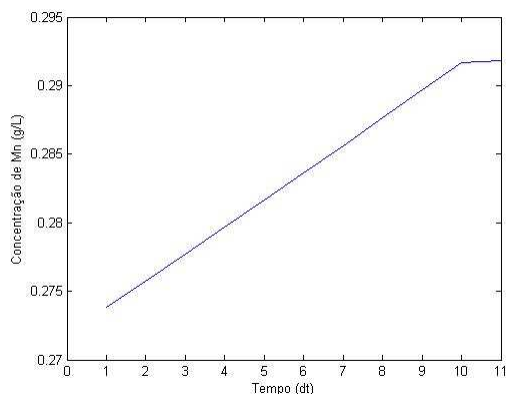
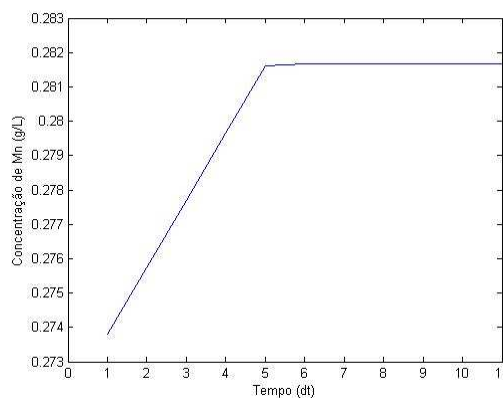
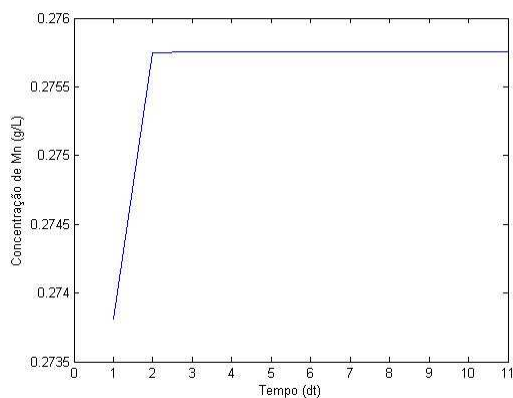
Anexo D

Manganês:

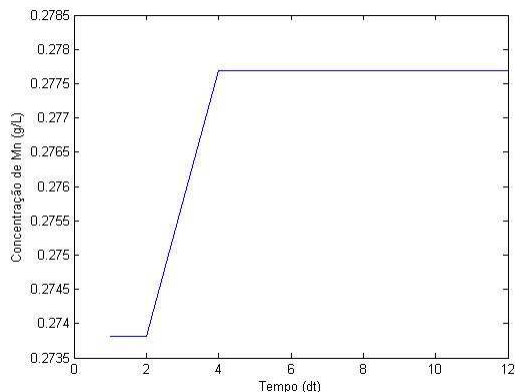
- 1D

2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06
2,74E+06	2,74E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06
2,74E+06	2,74E+06	2,76E+06	2,78E+06	2,78E+06	2,78E+06	2,78E+06	2,78E+06	2,78E+06	2,78E+06	2,78E+06	2,78E+06
2,74E+06	2,74E+06	2,76E+06	2,78E+06	2,80E+06	2,80E+06	2,80E+06	2,80E+06	2,80E+06	2,80E+06	2,80E+06	2,80E+06
2,74E+06	2,74E+06	2,76E+06	2,78E+06	2,80E+06	2,82E+06	2,82E+06	2,82E+06	2,82E+06	2,82E+06	2,82E+06	2,82E+06
2,74E+06	2,74E+06	2,76E+06	2,78E+06	2,80E+06	2,82E+06	2,84E+06	2,84E+06	2,85E+06	2,85E+06	2,85E+06	2,85E+06
2,74E+06	2,74E+06	2,76E+06	2,78E+06	2,80E+06	2,82E+06	2,85E+06	2,87E+06	2,87E+06	2,87E+06	2,87E+06	2,87E+06
2,74E+06	2,74E+06	2,76E+06	2,78E+06	2,80E+06	2,82E+06	2,85E+06	2,87E+06	2,89E+06	2,89E+06	2,89E+06	2,89E+06
2,74E+06	2,74E+06	2,76E+06	2,78E+06	2,80E+06	2,82E+06	2,85E+06	2,87E+06	2,89E+06	2,91E+06	2,91E+06	2,91E+06
2,74E+06	2,74E+06	2,76E+06	2,78E+06	2,80E+06	2,82E+06	2,85E+06	2,87E+06	2,89E+06	2,91E+06	2,93E+06	2,93E+06
2,74E+06	2,74E+06	2,76E+06	2,78E+06	2,80E+06	2,82E+06	2,85E+06	2,87E+06	2,89E+06	2,91E+06	2,93E+06	2,96E+06
2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06

D. 1- Variação da concentração ao longo da escombreira



Modelação dinâmica do transporte e destino de metais pesados em depósitos de resíduos mineiros abandonados



• 3D

1.

2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06
2,74E+06	2,74E+06	3,09E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06
2,95E+06	2,95E+06	3,12E+06	3,50E+06	3,51E+06	3,51E+06	3,51E+06	3,51E+06	3,51E+06	3,51E+06	3,51E+06
3,17E+06	3,17E+06	3,35E+06	3,55E+06	3,91E+06	3,92E+06	3,93E+06	3,93E+06	3,93E+06	3,93E+06	3,93E+06
3,41E+06	3,41E+06	3,60E+06	3,80E+06	4,01E+06	4,36E+06	4,37E+06	4,39E+06	4,39E+06	4,39E+06	4,39E+06
3,67E+06	3,67E+06	3,88E+06	4,10E+06	4,29E+06	4,52E+06	4,53E+06	4,54E+06	4,54E+06	4,54E+06	4,54E+06
3,95E+06	3,95E+06	4,18E+06	4,41E+06	4,63E+06	4,83E+06	4,84E+06	4,85E+06	4,85E+06	4,85E+06	4,85E+06
4,25E+06	4,25E+06	4,50E+06	4,75E+06	4,98E+06	5,20E+06	5,22E+06	5,22E+06	5,22E+06	5,22E+06	5,22E+06
4,57E+06	4,57E+06	4,84E+06	5,12E+06	5,37E+06	5,61E+06	5,62E+06	5,63E+06	5,63E+06	5,63E+06	5,63E+06
4,91E+06	4,91E+06	5,21E+06	5,51E+06	5,78E+06	6,04E+06	6,06E+06	6,06E+06	6,07E+06	6,07E+06	6,07E+06
5,24E+06	5,24E+06	5,59E+06	5,93E+06	6,23E+06	6,51E+06	6,52E+06	6,53E+06	6,53E+06	6,53E+06	6,53E+06
5,46E+06	5,46E+06	5,97E+06	6,37E+06	6,70E+06	7,01E+06	7,02E+06	7,03E+06	7,04E+06	7,04E+06	7,04E+06

D. 2- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=6 z=6

2.

2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06
2,74E+06	2,74E+06	3,07E+06	3,07E+06	3,08E+06	3,08E+06	3,08E+06	3,08E+06	3,08E+06	3,08E+06	3,08E+06
2,95E+06	2,95E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06
3,17E+06	3,17E+06	3,34E+06	3,34E+06	3,34E+06	3,34E+06	3,34E+06	3,34E+06	3,34E+06	3,34E+06	3,34E+06
3,41E+06	3,41E+06	3,59E+06	3,59E+06	3,59E+06	3,59E+06	3,59E+06	3,59E+06	3,59E+06	3,59E+06	3,59E+06
3,67E+06	3,67E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06
3,95E+06	3,95E+06	4,16E+06	4,16E+06	4,17E+06	4,17E+06	4,17E+06	4,17E+06	4,17E+06	4,17E+06	4,17E+06
4,25E+06	4,25E+06	4,48E+06	4,48E+06	4,48E+06	4,48E+06	4,48E+06	4,48E+06	4,48E+06	4,48E+06	4,48E+06
4,57E+06	4,57E+06	4,82E+06	4,82E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06
4,91E+06	4,91E+06	5,19E+06	5,19E+06	5,19E+06	5,19E+06	5,19E+06	5,19E+06	5,19E+06	5,19E+06	5,19E+06
5,24E+06	5,24E+06	5,57E+06	5,58E+06	5,58E+06	5,58E+06	5,58E+06	5,58E+06	5,58E+06	5,58E+06	5,58E+06
5,46E+06	5,46E+06	5,94E+06	5,94E+06	5,95E+06	5,95E+06	5,95E+06	5,95E+06	5,95E+06	5,95E+06	5,95E+06

D. 3- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=3 z=3

3.

2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06
2,74E+06	2,74E+06	3,08E+06	3,08E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06
2,95E+06	2,95E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06
3,17E+06	3,17E+06	3,34E+06	3,34E+06	3,34E+06	3,34E+06	3,34E+06	3,34E+06	3,34E+06	3,34E+06	3,34E+06
3,41E+06	3,41E+06	3,60E+06	3,60E+06	3,60E+06	3,60E+06	3,60E+06	3,60E+06	3,60E+06	3,60E+06	3,60E+06
3,67E+06	3,67E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06
3,95E+06	3,95E+06	4,17E+06	4,17E+06	4,17E+06	4,17E+06	4,17E+06	4,17E+06	4,17E+06	4,17E+06	4,17E+06
4,25E+06	4,25E+06	4,48E+06	4,49E+06	4,49E+06	4,49E+06	4,49E+06	4,49E+06	4,49E+06	4,49E+06	4,49E+06
4,57E+06	4,57E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06
4,91E+06	4,91E+06	5,19E+06	5,20E+06	5,20E+06	5,20E+06	5,20E+06	5,20E+06	5,20E+06	5,20E+06	5,20E+06
5,24E+06	5,24E+06	5,58E+06	5,58E+06	5,59E+06	5,59E+06	5,59E+06	5,59E+06	5,59E+06	5,59E+06	5,59E+06
5,46E+06	5,46E+06	5,95E+06	5,95E+06	5,96E+06	5,96E+06	5,96E+06	5,96E+06	5,96E+06	5,96E+06	5,96E+06

D. 4 - Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=11 z=3

4.

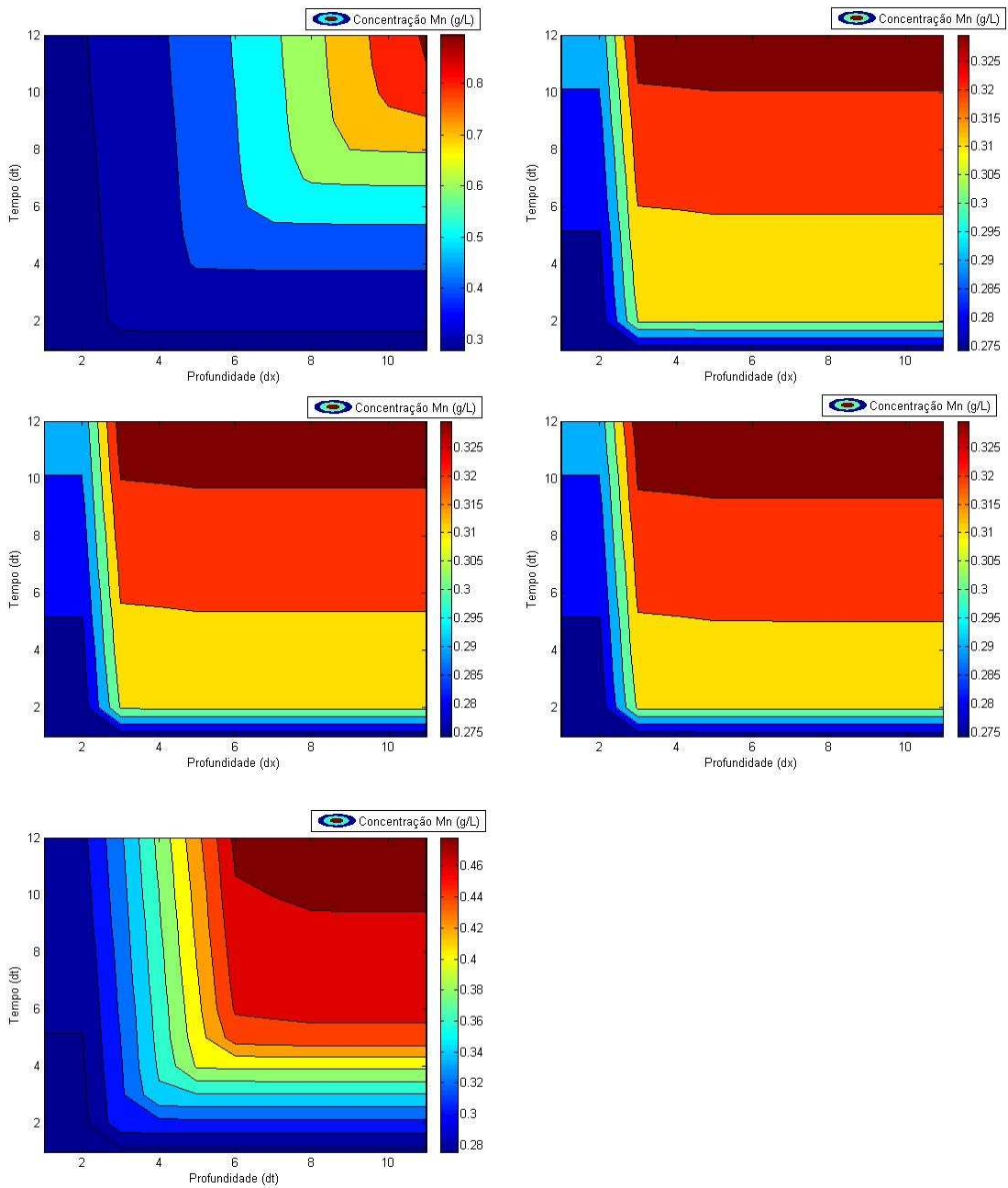
2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06
2,74E+06	2,74E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06
2,95E+06	2,95E+06	3,11E+06	3,12E+06	3,12E+06	3,12E+06	3,12E+06	3,12E+06	3,12E+06	3,12E+06	3,12E+06
3,17E+06	3,17E+06	3,34E+06	3,35E+06	3,35E+06	3,35E+06	3,35E+06	3,35E+06	3,35E+06	3,35E+06	3,35E+06
3,41E+06	3,41E+06	3,60E+06	3,60E+06	3,60E+06	3,60E+06	3,60E+06	3,60E+06	3,60E+06	3,60E+06	3,60E+06
3,67E+06	3,67E+06	3,87E+06	3,88E+06	3,88E+06	3,88E+06	3,88E+06	3,88E+06	3,88E+06	3,88E+06	3,88E+06
3,95E+06	3,95E+06	4,17E+06	4,17E+06	4,17E+06	4,17E+06	4,18E+06	4,18E+06	4,18E+06	4,18E+06	4,18E+06
4,25E+06	4,25E+06	4,49E+06	4,49E+06	4,49E+06	4,49E+06	4,49E+06	4,49E+06	4,49E+06	4,49E+06	4,49E+06
4,57E+06	4,57E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,84E+06	4,84E+06	4,84E+06	4,84E+06	4,84E+06	4,84E+06	4,84E+06
4,91E+06	4,91E+06	5,20E+06	5,20E+06	5,20E+06	5,20E+06	5,20E+06	5,20E+06	5,20E+06	5,20E+06	5,20E+06
5,24E+06	5,24E+06	5,59E+06	5,59E+06	5,59E+06	5,59E+06	5,59E+06	5,59E+06	5,59E+06	5,59E+06	5,59E+06
5,46E+06	5,46E+06	5,96E+06	5,96E+06	5,97E+06	5,97E+06	5,97E+06	5,97E+06	5,97E+06	5,97E+06	5,97E+06

D. 5 - Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=3 z=11

5.

2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06
2,74E+06	2,74E+06	3,09E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06
2,95E+06	2,95E+06	3,12E+06	3,50E+06	3,51E+06	3,52E+06	3,52E+06	3,52E+06	3,52E+06	3,52E+06	3,52E+06
3,17E+06	3,17E+06	3,35E+06	3,55E+06	3,96E+06	3,98E+06	3,99E+06	3,99E+06	3,99E+06	3,99E+06	3,99E+06
3,41E+06	3,41E+06	3,60E+06	3,81E+06	4,05E+06	4,49E+06	4,52E+06	4,53E+06	4,53E+06	4,53E+06	4,53E+06
3,67E+06	3,67E+06	3,88E+06	4,10E+06	4,33E+06	4,62E+06	5,10E+06	5,13E+06	5,15E+06	5,15E+06	5,15E+06
3,95E+06	3,95E+06	4,18E+06	4,41E+06	4,66E+06	4,93E+06	5,27E+06	5,77E+06	5,81E+06	5,84E+06	5,84E+06
4,25E+06	4,25E+06	4,50E+06	4,75E+06	5,02E+06	5,31E+06	5,62E+06	6,01E+06	6,53E+06	6,58E+06	6,62E+06
4,57E+06	4,57E+06	4,84E+06	5,12E+06	5,41E+06	5,72E+06	6,05E+06	6,40E+06	6,84E+06	7,25E+06	7,30E+06
4,91E+06	4,91E+06	5,21E+06	5,51E+06	5,83E+06	6,17E+06	6,52E+06	6,88E+06	7,28E+06	7,64E+06	8,02E+06
5,24E+06	5,24E+06	5,60E+06	5,93E+06	6,28E+06	6,64E+06	7,03E+06	7,42E+06	7,83E+06	8,15E+06	8,50E+06
5,46E+06	5,46E+06	5,97E+06	6,37E+06	6,76E+06	7,15E+06	7,57E+06	8,00E+06	8,44E+06	8,77E+06	9,09E+06

D. 6- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para $y=11$ $z=11$



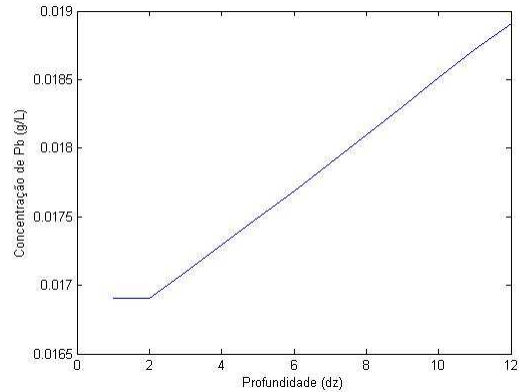
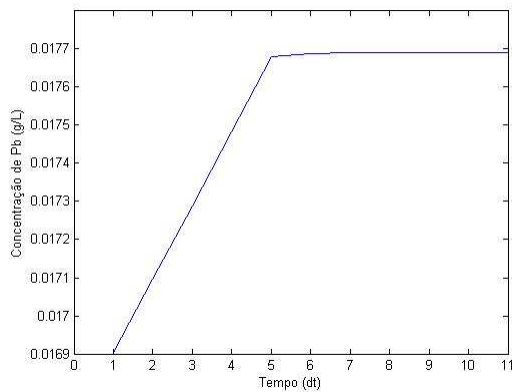
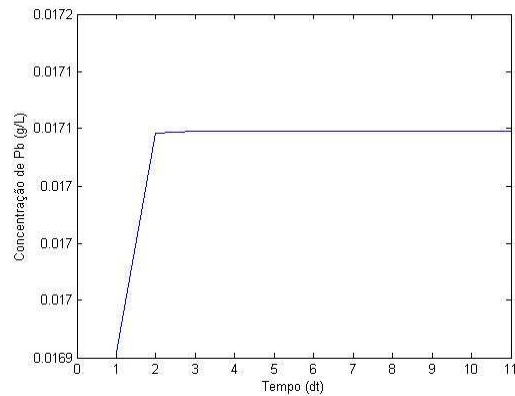
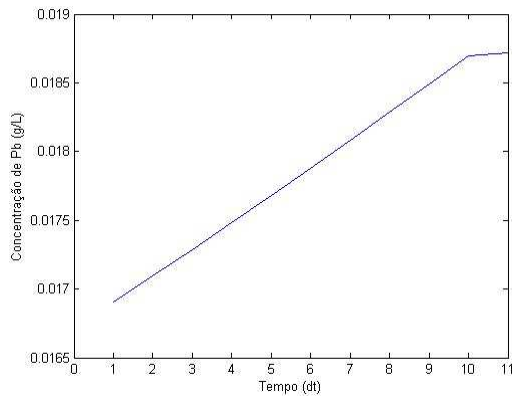
Anexo E

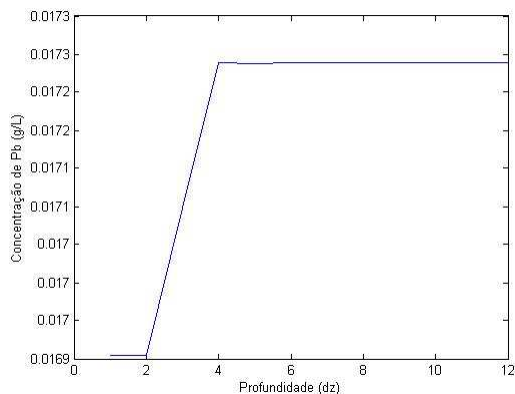
Chumbo:

- 1D

1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05
1,69E+05	1,69E+05	1,71E+05	1,71E+05	1,71E+05	1,71E+05	1,71E+05	1,71E+05	1,71E+05	1,71E+05	1,71E+05	1,71E+05	1,71E+05
1,69E+05	1,69E+05	1,71E+05	1,73E+05	1,73E+05	1,73E+05	1,73E+05	1,73E+05	1,73E+05	1,73E+05	1,73E+05	1,73E+05	1,73E+05
1,69E+05	1,69E+05	1,71E+05	1,73E+05	1,75E+05	1,75E+05	1,75E+05	1,75E+05	1,75E+05	1,75E+05	1,75E+05	1,75E+05	1,75E+05
1,69E+05	1,69E+05	1,71E+05	1,73E+05	1,75E+05	1,77E+05	1,77E+05	1,77E+05	1,77E+05	1,77E+05	1,77E+05	1,77E+05	1,77E+05
1,69E+05	1,69E+05	1,71E+05	1,73E+05	1,75E+05	1,77E+05	1,79E+05	1,79E+05	1,79E+05	1,79E+05	1,79E+05	1,79E+05	1,79E+05
1,69E+05	1,69E+05	1,71E+05	1,73E+05	1,75E+05	1,77E+05	1,79E+05	1,81E+05	1,81E+05	1,81E+05	1,81E+05	1,81E+05	1,81E+05
1,69E+05	1,69E+05	1,71E+05	1,73E+05	1,75E+05	1,77E+05	1,79E+05	1,82E+05	1,84E+05	1,84E+05	1,84E+05	1,84E+05	1,84E+05
1,69E+05	1,69E+05	1,71E+05	1,73E+05	1,75E+05	1,77E+05	1,79E+05	1,82E+05	1,84E+05	1,86E+05	1,86E+05	1,86E+05	1,86E+05
1,69E+05	1,69E+05	1,71E+05	1,73E+05	1,75E+05	1,77E+05	1,79E+05	1,82E+05	1,84E+05	1,86E+05	1,88E+05	1,88E+05	1,88E+05
1,69E+05	1,69E+05	1,71E+05	1,73E+05	1,75E+05	1,77E+05	1,79E+05	1,82E+05	1,84E+05	1,86E+05	1,88E+05	1,90E+05	1,90E+05
1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05

E. 1- Variação da concentração ao longo da escombreira





• 3D

1.

1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05
1,69E+05	1,69E+05	-3,47E+05	1,03E+05	-5,48E+05	4,67E+04	-1,16E+06	-7,12E+03	7,17E+06	-1,08E+04	4,82E+06
1,89E+05	1,89E+05	-3,35E+05	1,31E+05	-4,84E+05	7,64E+04	-8,26E+05	2,44E+04	-1,46E+06	-7,46E+03	7,31E+06
2,12E+05	2,12E+05	-2,59E+05	2,25E+05	-2,66E+05	2,15E+05	-3,10E+05	1,82E+05	-4,16E+05	1,36E+05	3,40E+05
2,37E+05	2,37E+05	-1,80E+05	3,69E+05	-1,08E+05	5,60E+05	-6,24E+04	9,08E+05	-3,48E+04	1,56E+06	6,68E+04
2,65E+05	2,65E+05	-1,02E+05	6,48E+05	1,67E+04	-2,92E+06	9,91E+04	-3,69E+05	2,40E+05	3,81E+04	-1,24E+06
2,96E+05	2,96E+05	-2,57E+04	2,23E+06	1,43E+05	-4,58E+05	2,74E+05	-7,71E+04	8,46E+05	9,88E+04	-4,76E+05
3,31E+05	3,31E+05	5,04E+04	-5,97E+05	2,99E+05	-2,21E+04	2,56E+06	1,89E+05	5,02E+04	-8,11E+05	2,15E+05
3,69E+05	3,69E+05	1,27E+05	-2,05E+05	5,35E+05	1,55E+05	1,80E+05	-1,09E+04	4,99E+06	1,93E+05	8,26E+04
4,10E+05	4,10E+05	2,02E+05	3,96E+04	-9,38E+05	3,72E+05	1,75E+05	1,76E+04	-2,13E+06	3,38E+05	1,33E+05
4,45E+05	4,45E+05	2,72E+05	1,81E+05	-1,14E+04	4,92E+06	3,94E+05	3,04E+05	-1,04E+04	5,35E+06	3,93E+05
4,64E+05	4,64E+05	3,25E+05	2,68E+05	2,12E+05	6,42E+05	3,65E+05	3,00E+05	2,34E+05	7,07E+05	3,73E+05

E. 2- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=3 z=3

2.

1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05
1,69E+05	1,69E+05	-3,02E+04	2,32E+06	4,56E+05	7,85E+04	-5,60E+05	5,80E+05	1,70E+05	-8,78E+05	2,61E+05
1,89E+05	1,89E+05	8,41E+04	-1,69E+05	1,84E+05	9,02E+04	-6,04E+05	-1,71E+06	2,67E+06	3,01E+04	-5,01E+06
2,12E+05	2,12E+05	-1,79E+05	1,09E+06	-9,82E+04	-8,41E+06	7,89E+04	-1,68E+06	-8,82E+06	-7,49E+04	-2,04E+06
2,37E+05	2,37E+05	-2,87E+05	5,46E+04	1,04E+06	-9,35E+06	1,29E+05	-2,75E+06	-2,51E+06	-2,17E+06	-7,90E+05
2,65E+05	2,65E+05	1,42E+04	-2,91E+06	-1,67E+06	-2,42E+06	2,01E+06	-1,07E+06	1,38E+07	-5,10E+05	1,75E+06
2,96E+05	2,96E+05	3,47E+05	-6,85E+05	1,09E+06	-1,00E+06	6,15E+05	4,76E+06	4,62E+06	4,28E+06	8,40E+05
3,31E+05	3,31E+05	2,04E+04	-2,54E+06	-5,39E+06	8,20E+04	-4,59E+04	2,16E+06	1,51E+06	5,95E+05	1,38E+07
3,69E+05	3,69E+05	3,16E+05	-2,95E+05	-6,58E+05	-1,80E+06	1,09E+06	-1,95E+05	-8,91E+06	1,48E+05	1,06E+08
4,10E+05	4,10E+05	1,18E+05	-2,15E+05	4,51E+05	-1,25E+06	5,64E+05	5,04E+03	-1,20E+07	6,25E+05	1,96E+07
4,45E+05	4,45E+05	7,74E+05	1,22E+05	-5,43E+05	6,10E+05	-8,52E+05	-9,39E+05	-9,86E+05	2,26E+06	2,68E+06

4,64E+05	4,64E+05	2,22E+05	-1,91E+05	1,66E+03	-2,80E+07	-6,13E+05	-2,57E+05	3,73E+06	1,41E+05	6,48E+05
----------	----------	----------	-----------	----------	-----------	-----------	-----------	----------	----------	----------

E. 3- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=6 z=6

3.

1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05
1,69E+05	1,69E+05	1,08E+04	-4,72E+06	-2,50E+05	3,13E+05	-1,07E+05	1,94E+06	9,55E+04	-6,56E+05	2,87E+05
1,89E+05	1,89E+05	2,15E+05	-6,04E+05	1,56E+05	-6,30E+05	2,14E+05	-7,43E+04	8,71E+05	-8,45E+04	9,09E+05
2,12E+05	2,12E+05	-2,07E+05	9,91E+05	9,24E+04	-1,19E+06	2,13E+05	-2,28E+05	7,47E+05	3,03E+04	-1,49E+06
2,37E+05	2,37E+05	-6,80E+04	1,18E+06	3,84E+05	-1,89E+05	5,61E+05	-1,80E+05	6,74E+05	4,32E+04	-1,18E+06
2,65E+05	2,65E+05	-1,39E+05	6,97E+05	1,15E+05	2,01E+05	-1,26E+04	4,09E+06	3,31E+05	1,10E+05	-6,06E+05
2,96E+05	2,96E+05	1,31E+05	-1,40E+05	4,32E+05	1,61E+05	-1,79E+05	1,82E+04	-2,55E+06	6,75E+05	3,82E+04
3,31E+05	3,31E+05	-9,04E+04	1,03E+06	-1,14E+05	7,93E+05	1,36E+05	5,00E+06	1,04E+05	-1,33E+05	6,01E+05
3,69E+05	3,69E+05	-1,66E+05	7,64E+05	1,49E+05	2,78E+06	3,37E+05	4,82E+05	2,16E+05	1,36E+05	-8,62E+04
4,10E+05	4,10E+05	5,34E+05	3,19E+05	1,50E+05	-4,13E+04	1,75E+06	3,31E+05	1,85E+05	2,38E+05	9,43E+04
4,45E+05	4,45E+05	3,54E+05	3,48E+05	2,09E+05	1,78E+04	-2,74E+06	5,15E+05	2,27E+05	2,86E+05	1,77E+05
4,64E+05	4,64E+05	3,23E+05	2,53E+05	1,58E+05	-5,95E+04	1,40E+06	4,72E+05	3,31E+05	2,11E+05	4,07E+06

E. 4- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=11 z=3

4.

1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05
1,69E+05	1,69E+05	-2,45E+05	1,60E+05	-2,78E+05	2,11E+05	1,91E+06	5,82E+04	-9,21E+05	1,96E+05	-2,55E+05
1,89E+05	1,89E+05	-2,28E+05	2,21E+05	-1,83E+05	3,01E+05	1,09E+05	-4,48E+05	-2,06E+05	3,14E+05	-2,20E+05
2,12E+05	2,12E+05	-2,25E+05	2,26E+05	-1,75E+05	3,06E+05	-2,76E+04	1,86E+06	1,99E+05	-1,58E+05	-1,47E+05
2,37E+05	2,37E+05	8,44E+05	1,27E+05	-5,99E+05	-1,13E+07	-2,19E+04	2,25E+06	1,50E+05	-2,96E+05	4,29E+05
2,65E+05	2,65E+05	2,04E+05	-9,75E+04	5,05E+05	-2,15E+06	7,99E+04	-2,42E+04	2,30E+06	1,05E+05	-6,04E+05
2,96E+05	2,96E+05	5,61E+05	9,61E+04	-2,96E+05	7,99E+03	-6,08E+06	1,27E+05	-1,13E+05	5,54E+05	1,49E+05
3,31E+05	3,31E+05	1,36E+05	4,62E+05	-2,66E+04	2,41E+06	-3,67E+05	3,95E+05	1,81E+05	2,94E+05	2,02E+05
3,69E+05	3,69E+05	1,22E+05	-1,08E+05	1,23E+06	4,90E+05	-3,19E+05	3,82E+05	1,32E+05	-5,44E+05	3,65E+05
4,10E+05	4,10E+05	1,87E+05	9,44E+04	-2,63E+05	5,31E+05	1,21E+05	-1,55E+05	-2,11E+06	2,23E+05	4,80E+04
4,45E+05	4,45E+05	2,35E+05	1,48E+05	-4,87E+04	1,41E+06	2,98E+05	6,23E+05	1,04E+05	-8,03E+04	1,00E+06
4,64E+05	4,64E+05	2,94E+05	2,03E+05	6,67E+04	3,10E+04	-1,23E+06	5,22E+05	2,90E+05	1,72E+05	1,64E+05

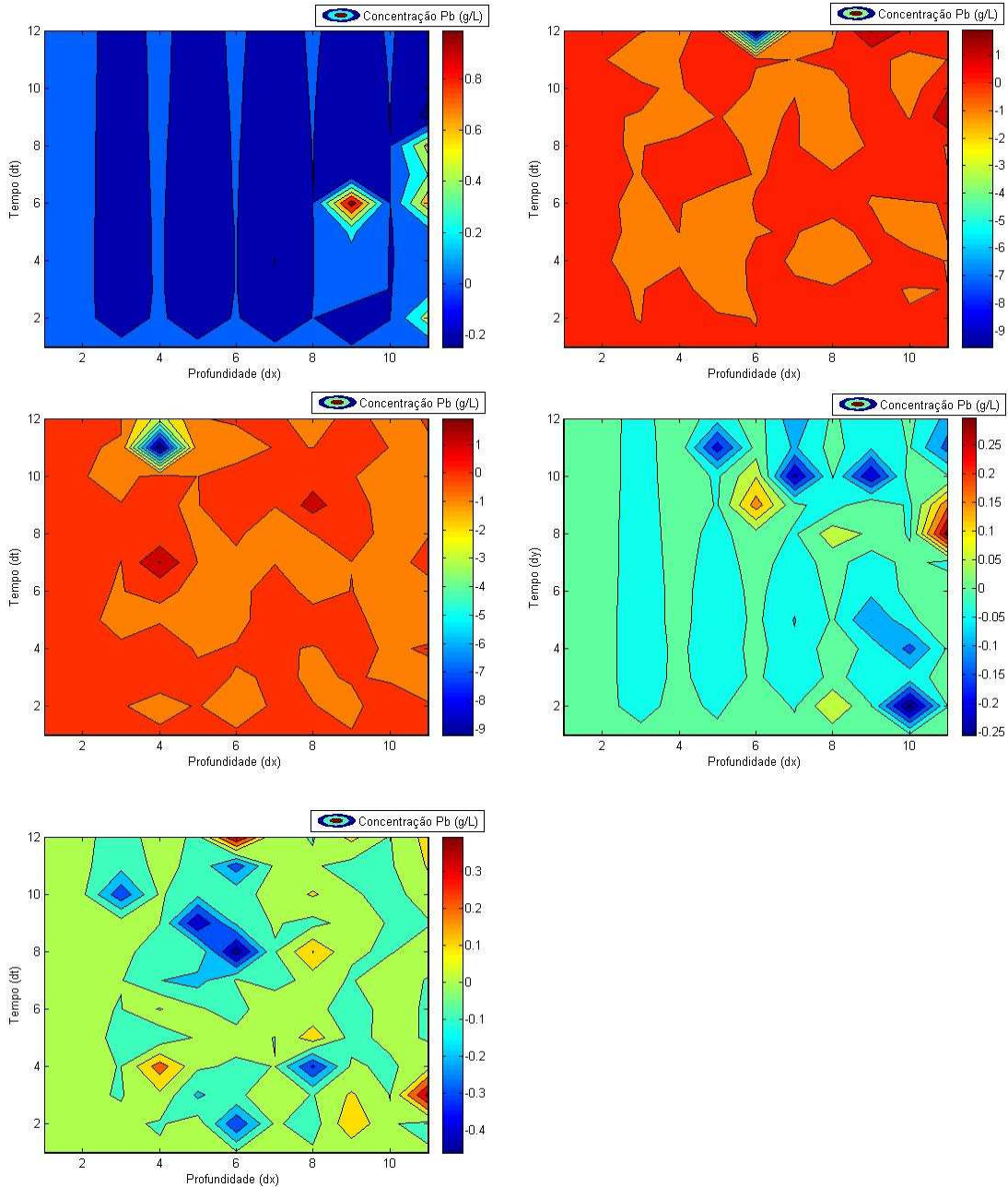
E. 5 - Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=3 z=11

5.

1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05	1,69E+05
1,69E+05	1,69E+05	7,97E+04	-4,65E+05	3,31E+05	-5,22E+05	6,83E+05	1,02E+05	-3,43E+05	6,50E+04	-8,59E+05
1,89E+05	1,89E+05	-1,17E+05	9,50E+05	-7,50E+03	5,81E+06	5,45E+05	5,59E+04	-8,75E+05	3,98E+05	-2,28E+06
2,12E+05	2,12E+05	-2,95E+05	4,87E+05	3,65E+06	1,13E+06	1,94E+05	-7,46E+06	4,61E+05	-1,09E+06	-8,83E+05
2,37E+05	2,37E+05	-8,43E+03	5,83E+06	7,15E+05	-5,21E+05	1,13E+06	-5,19E+04	5,68E+06	1,41E+06	-1,49E+06
2,65E+05	2,65E+05	2,61E+05	2,54E+05	2,03E+06	1,45E+06	-1,39E+07	3,94E+05	-2,13E+06	3,35E+06	-1,40E+06
2,96E+05	2,96E+05	-4,25E+05	3,10E+05	-1,84E+05	-1,43E+07	-5,19E+06	-4,64E+05	-1,25E+07	1,52E+06	-3,10E+05

3,31E+05	3,31E+05	-2,99E+04	1,59E+06	6,45E+05	-4,51E+06	-3,97E+06	1,55E+06	-5,14E+06	-8,41E+06	-5,67E+07
3,69E+05	3,69E+05	-1,14E+06	-1,01E+05	-2,76E+06	3,28E+04	-2,70E+06	-2,74E+06	2,03E+07	-3,83E+06	-9,15E+07
4,10E+05	4,10E+05	-5,91E+04	1,29E+06	-3,97E+05	-2,84E+06	-7,49E+05	-3,67E+06	1,51E+07	-5,76E+05	-8,18E+07
4,45E+05	4,45E+05	-8,32E+05	4,49E+05	-1,41E+06	-1,26E+04	3,37E+06	1,52E+04	-1,99E+06	-5,88E+06	-4,19E+07
4,64E+05	4,64E+05	1,45E+05	8,72E+04	-1,21E+05	5,56E+06	2,79E+05	-8,70E+05	-1,31E+06	-1,52E+06	-1,23E+07

E. 6- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para $y=11$ $z=11$



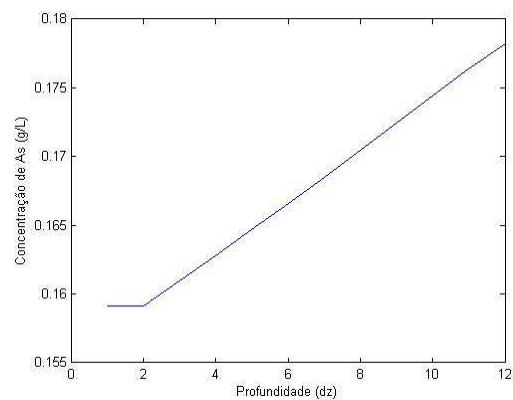
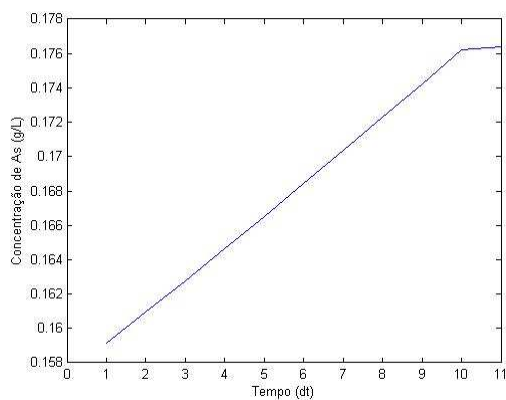
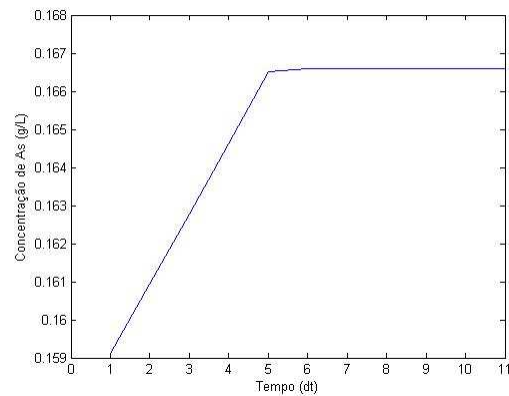
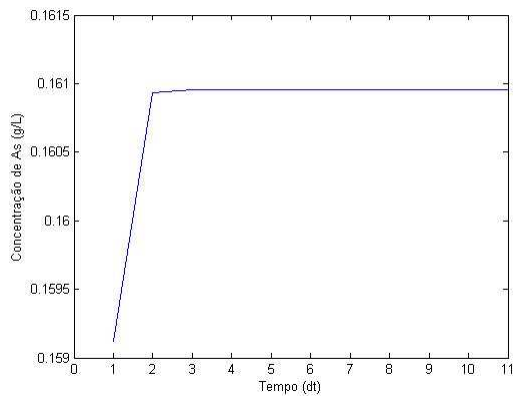
Anexo F

Arsénio:

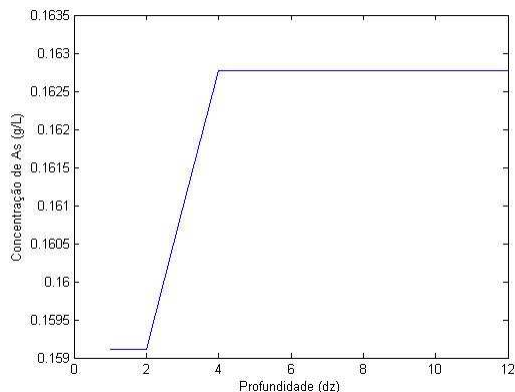
- 1D

1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06
1,59E+06	1,59E+06	1,61E+06	1,61E+06	1,61E+06	1,61E+06	1,61E+06	1,61E+06	1,61E+06	1,61E+06	1,61E+06
1,59E+06	1,59E+06	1,61E+06	1,63E+06	1,63E+06	1,63E+06	1,63E+06	1,63E+06	1,63E+06	1,63E+06	1,63E+06
1,59E+06	1,59E+06	1,61E+06	1,63E+06	1,65E+06	1,65E+06	1,65E+06	1,65E+06	1,65E+06	1,65E+06	1,65E+06
1,59E+06	1,59E+06	1,61E+06	1,63E+06	1,65E+06	1,67E+06	1,67E+06	1,67E+06	1,67E+06	1,67E+06	1,67E+06
1,59E+06	1,59E+06	1,61E+06	1,63E+06	1,65E+06	1,67E+06	1,69E+06	1,69E+06	1,69E+06	1,69E+06	1,69E+06
1,59E+06	1,59E+06	1,61E+06	1,63E+06	1,65E+06	1,67E+06	1,69E+06	1,71E+06	1,71E+06	1,71E+06	1,71E+06
1,59E+06	1,59E+06	1,61E+06	1,63E+06	1,65E+06	1,67E+06	1,69E+06	1,71E+06	1,73E+06	1,73E+06	1,73E+06
1,59E+06	1,59E+06	1,61E+06	1,63E+06	1,65E+06	1,67E+06	1,69E+06	1,71E+06	1,73E+06	1,75E+06	1,75E+06
1,59E+06	1,59E+06	1,61E+06	1,63E+06	1,65E+06	1,67E+06	1,69E+06	1,71E+06	1,73E+06	1,75E+06	1,77E+06
1,59E+06	1,59E+06	1,61E+06	1,63E+06	1,65E+06	1,67E+06	1,69E+06	1,71E+06	1,73E+06	1,75E+06	1,78E+06
1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06

F 1- Variação da concentração ao longo da escombreira



Modelação dinâmica do transporte e destino de metais pesados em depósitos de resíduos mineiros abandonados



• 3D

1.

1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06
1,59E+06	1,59E+06	1,87E+06	1,88E+06	1,88E+06	1,89E+06	1,89E+06	1,89E+06	1,89E+06	1,89E+06	1,89E+06
1,79E+06	1,79E+06	1,93E+06	1,93E+06	1,94E+06	1,94E+06	1,94E+06	1,94E+06	1,94E+06	1,94E+06	1,94E+06
2,00E+06	2,00E+06	2,16E+06	2,16E+06	2,17E+06	2,17E+06	2,17E+06	2,17E+06	2,17E+06	2,17E+06	2,17E+06
2,24E+06	2,24E+06	2,43E+06	2,44E+06	2,44E+06	2,44E+06	2,44E+06	2,44E+06	2,44E+06	2,44E+06	2,44E+06
2,51E+06	2,51E+06	2,73E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06	2,74E+06
2,81E+06	2,81E+06	3,07E+06	3,08E+06	3,08E+06	3,08E+06	3,08E+06	3,08E+06	3,08E+06	3,08E+06	3,08E+06
3,15E+06	3,15E+06	3,45E+06	3,45E+06	3,46E+06	3,46E+06	3,46E+06	3,46E+06	3,46E+06	3,46E+06	3,46E+06
3,53E+06	3,53E+06	3,87E+06	3,88E+06	3,88E+06	3,88E+06	3,88E+06	3,88E+06	3,88E+06	3,88E+06	3,88E+06
3,92E+06	3,92E+06	4,34E+06	4,34E+06	4,35E+06	4,35E+06	4,35E+06	4,35E+06	4,35E+06	4,35E+06	4,35E+06
4,27E+06	4,27E+06	4,82E+06	4,82E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06
4,47E+06	4,47E+06	5,24E+06	5,25E+06	5,26E+06	5,26E+06	5,26E+06	5,26E+06	5,26E+06	5,26E+06	5,26E+06

F 2- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=3 z=3

2.

1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06
1,59E+06	1,59E+06	1,91E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06
1,79E+06	1,79E+06	1,95E+06	2,30E+06	2,32E+06	2,34E+06	2,34E+06	2,34E+06	2,34E+06	2,34E+06	2,34E+06
2,00E+06	2,00E+06	2,18E+06	2,40E+06	2,72E+06	2,75E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06
2,24E+06	2,24E+06	2,45E+06	2,68E+06	2,91E+06	3,21E+06	3,24E+06	3,26E+06	3,26E+06	3,26E+06	3,26E+06
2,51E+06	2,51E+06	2,76E+06	3,02E+06	3,25E+06	3,49E+06	3,52E+06	3,54E+06	3,54E+06	3,54E+06	3,54E+06
2,81E+06	2,81E+06	3,10E+06	3,41E+06	3,66E+06	3,90E+06	3,93E+06	3,94E+06	3,95E+06	3,95E+06	3,95E+06
3,15E+06	3,15E+06	3,49E+06	3,84E+06	4,14E+06	4,41E+06	4,43E+06	4,45E+06	4,45E+06	4,45E+06	4,45E+06
3,53E+06	3,53E+06	3,91E+06	4,32E+06	4,66E+06	4,98E+06	5,01E+06	5,03E+06	5,03E+06	5,03E+06	5,03E+06
3,92E+06	3,92E+06	4,38E+06	4,85E+06	5,25E+06	5,61E+06	5,65E+06	5,67E+06	5,67E+06	5,67E+06	5,67E+06
4,27E+06	4,27E+06	4,88E+06	5,44E+06	5,90E+06	6,32E+06	6,36E+06	6,38E+06	6,39E+06	6,39E+06	6,39E+06
4,47E+06	4,47E+06	5,32E+06	6,06E+06	6,61E+06	7,09E+06	7,14E+06	7,17E+06	7,17E+06	7,17E+06	7,17E+06

F 3- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=6 z=6

3.

1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06
1,59E+06	1,59E+06	1,89E+06	1,89E+06	1,90E+06	1,90E+06	1,90E+06	1,90E+06	1,90E+06	1,90E+06	1,90E+06
1,79E+06	1,79E+06	1,94E+06	1,94E+06	1,94E+06	1,94E+06	1,94E+06	1,94E+06	1,94E+06	1,94E+06	1,94E+06
2,00E+06	2,00E+06	2,17E+06	2,17E+06	2,18E+06	2,18E+06	2,18E+06	2,18E+06	2,18E+06	2,18E+06	2,18E+06
2,24E+06	2,24E+06	2,44E+06	2,44E+06	2,45E+06	2,45E+06	2,45E+06	2,45E+06	2,45E+06	2,45E+06	2,45E+06
2,51E+06	2,51E+06	2,74E+06	2,75E+06	2,75E+06	2,75E+06	2,75E+06	2,75E+06	2,75E+06	2,75E+06	2,75E+06
2,81E+06	2,81E+06	3,08E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06	3,09E+06
3,15E+06	3,15E+06	3,46E+06	3,47E+06	3,47E+06	3,47E+06	3,47E+06	3,47E+06	3,47E+06	3,47E+06	3,47E+06
3,53E+06	3,53E+06	3,89E+06	3,89E+06	3,90E+06	3,90E+06	3,90E+06	3,90E+06	3,90E+06	3,90E+06	3,90E+06
3,92E+06	3,92E+06	4,35E+06	4,36E+06	4,36E+06	4,36E+06	4,36E+06	4,36E+06	4,36E+06	4,36E+06	4,36E+06
4,27E+06	4,27E+06	4,84E+06	4,84E+06	4,85E+06	4,85E+06	4,85E+06	4,85E+06	4,85E+06	4,85E+06	4,85E+06
4,47E+06	4,47E+06	5,27E+06	5,28E+06	5,29E+06	5,29E+06	5,29E+06	5,29E+06	5,29E+06	5,29E+06	5,29E+06

F 4- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=11 z=3

4.

1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06
1,59E+06	1,59E+06	1,89E+06	1,90E+06	1,91E+06	1,91E+06	1,91E+06	1,91E+06	1,91E+06	1,91E+06	1,91E+06
1,79E+06	1,79E+06	1,94E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06	1,95E+06
2,00E+06	2,00E+06	2,17E+06	2,18E+06	2,18E+06	2,18E+06	2,18E+06	2,18E+06	2,18E+06	2,18E+06	2,18E+06
2,24E+06	2,24E+06	2,45E+06	2,45E+06	2,45E+06	2,45E+06	2,45E+06	2,45E+06	2,45E+06	2,45E+06	2,45E+06
2,51E+06	2,51E+06	2,75E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06
2,81E+06	2,81E+06	3,09E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06
3,15E+06	3,15E+06	3,47E+06	3,48E+06	3,48E+06	3,48E+06	3,48E+06	3,48E+06	3,48E+06	3,48E+06	3,48E+06
3,53E+06	3,53E+06	3,90E+06	3,90E+06	3,91E+06	3,91E+06	3,91E+06	3,91E+06	3,91E+06	3,91E+06	3,91E+06
3,92E+06	3,92E+06	4,37E+06	4,37E+06	4,38E+06	4,38E+06	4,38E+06	4,38E+06	4,38E+06	4,38E+06	4,38E+06
4,27E+06	4,27E+06	4,86E+06	4,87E+06	4,87E+06	4,88E+06	4,88E+06	4,88E+06	4,88E+06	4,88E+06	4,88E+06
4,47E+06	4,47E+06	5,30E+06	5,30E+06	5,32E+06	5,32E+06	5,32E+06	5,32E+06	5,32E+06	5,32E+06	5,32E+06

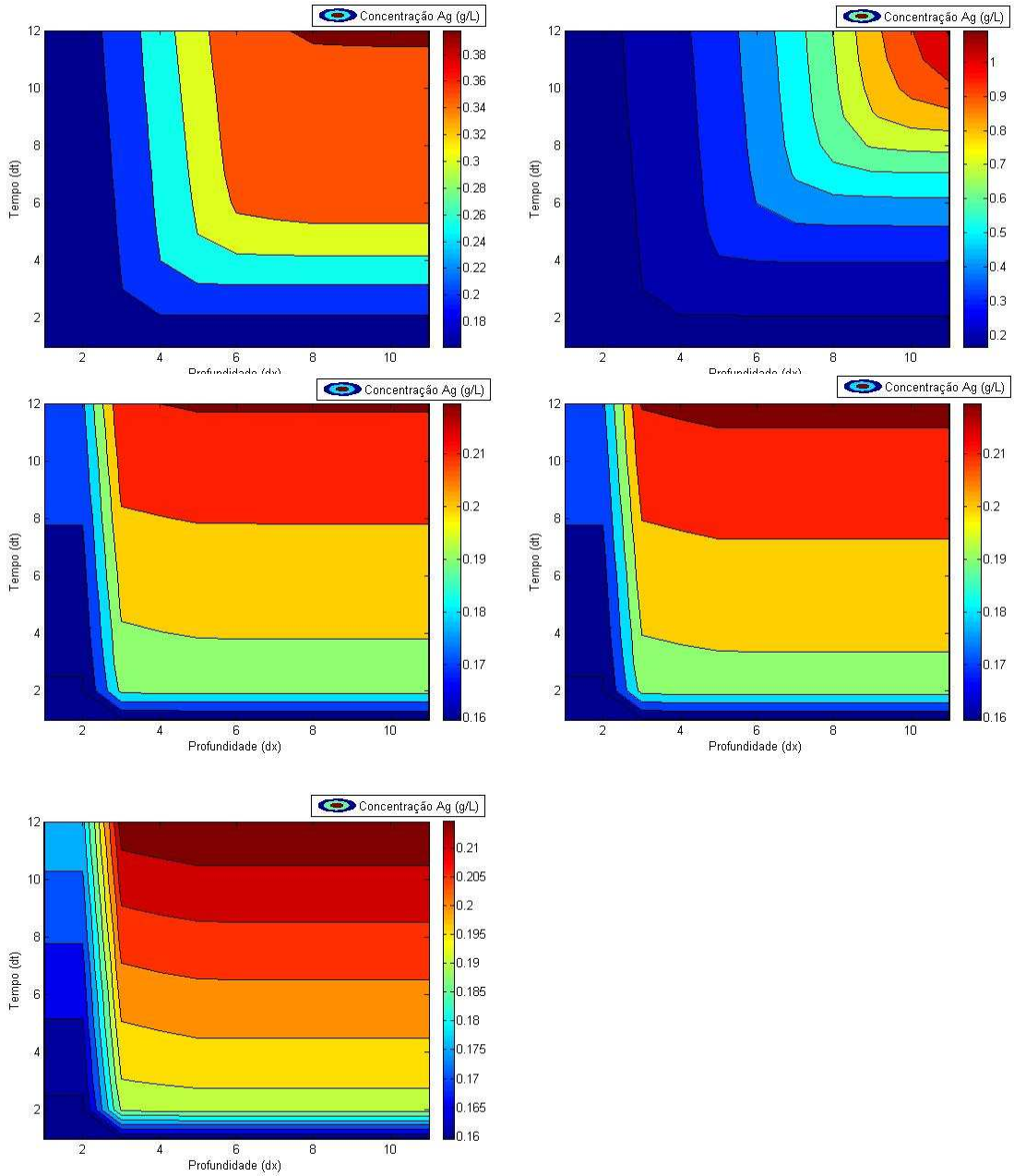
F 5- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=3 z=11

5.

1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,59E+06
1,59E+06	1,59E+06	1,91E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06
1,79E+06	1,79E+06	1,95E+06	2,31E+06	2,33E+06	2,34E+06	2,35E+06	2,35E+06	2,35E+06	2,35E+06	2,35E+06
2,00E+06	2,00E+06	2,18E+06	2,41E+06	2,82E+06	2,85E+06	2,88E+06	2,88E+06	2,88E+06	2,88E+06	2,88E+06
2,24E+06	2,24E+06	2,46E+06	2,69E+06	2,99E+06	3,46E+06	3,51E+06	3,54E+06	3,54E+06	3,54E+06	3,54E+06
2,51E+06	2,51E+06	2,76E+06	3,03E+06	3,33E+06	3,72E+06	4,25E+06	4,32E+06	4,37E+06	4,37E+06	4,37E+06
2,81E+06	2,81E+06	3,11E+06	3,42E+06	3,75E+06	4,13E+06	4,63E+06	5,20E+06	5,30E+06	5,35E+06	5,36E+06
3,15E+06	3,15E+06	3,49E+06	3,85E+06	4,24E+06	4,66E+06	5,14E+06	5,73E+06	6,35E+06	6,47E+06	6,53E+06
3,53E+06	3,53E+06	3,91E+06	4,33E+06	4,78E+06	5,27E+06	5,80E+06	6,37E+06	7,05E+06	7,51E+06	7,62E+06
3,92E+06	3,92E+06	4,39E+06	4,87E+06	5,39E+06	5,95E+06	6,56E+06	7,18E+06	7,85E+06	8,37E+06	8,77E+06
4,27E+06	4,27E+06	4,88E+06	5,46E+06	6,06E+06	6,71E+06	7,41E+06	8,12E+06	8,85E+06	9,36E+06	9,85E+06
4,47E+06	4,47E+06	5,33E+06	6,08E+06	6,80E+06	7,55E+06	8,36E+06	9,17E+06	1,00E+07	1,06E+07	1,11E+07

F 6 - Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=11 z=11

Modelação dinâmica do transporte e destino de metais pesados em depósitos de resíduos mineiros abandonados



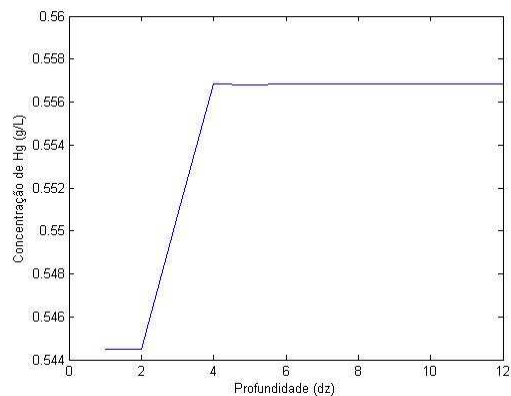
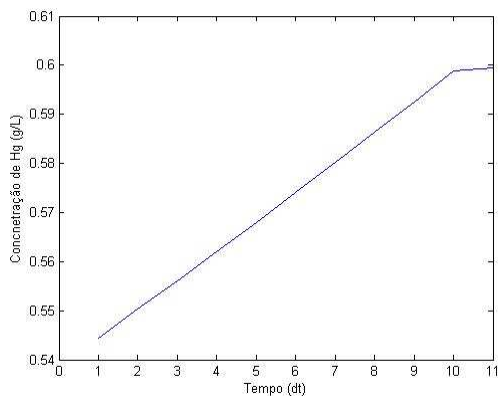
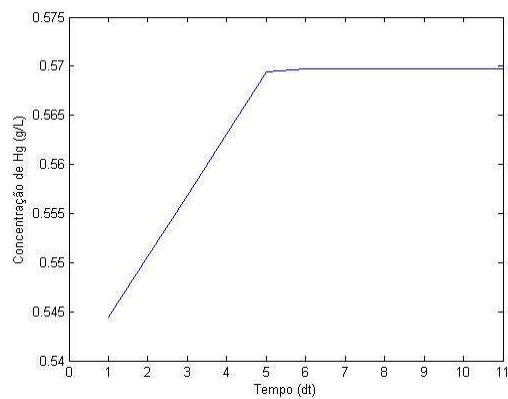
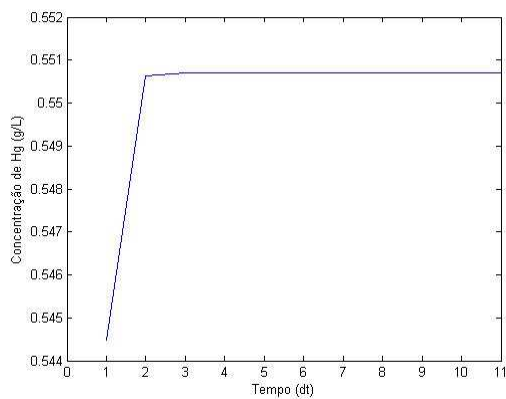
Anexo G

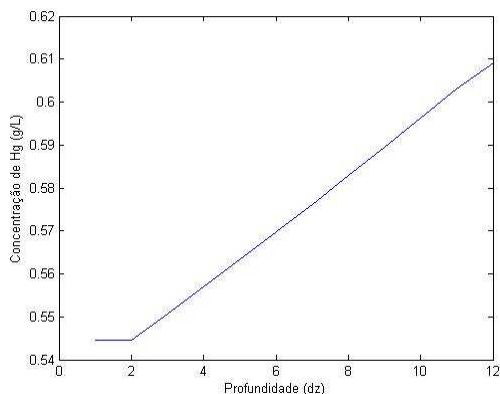
Mercúrio:

- 1D

5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06
5,44E+06	5,44E+06	5,51E+06	5,51E+06	5,51E+06	5,51E+06	5,51E+06	5,51E+06	5,51E+06	5,51E+06	5,51E+06	5,51E+06
5,44E+06	5,44E+06	5,51E+06	5,58E+06	5,58E+06	5,58E+06	5,58E+06	5,58E+06	5,58E+06	5,58E+06	5,58E+06	5,58E+06
5,44E+06	5,44E+06	5,51E+06	5,58E+06	5,64E+06	5,64E+06	5,64E+06	5,64E+06	5,64E+06	5,64E+06	5,64E+06	5,64E+06
5,44E+06	5,44E+06	5,51E+06	5,58E+06	5,64E+06	5,71E+06	5,71E+06	5,71E+06	5,71E+06	5,71E+06	5,71E+06	5,71E+06
5,44E+06	5,44E+06	5,51E+06	5,58E+06	5,64E+06	5,71E+06	5,78E+06	5,78E+06	5,78E+06	5,78E+06	5,78E+06	5,78E+06
5,44E+06	5,44E+06	5,51E+06	5,58E+06	5,64E+06	5,71E+06	5,78E+06	5,85E+06	5,85E+06	5,85E+06	5,85E+06	5,85E+06
5,44E+06	5,44E+06	5,51E+06	5,58E+06	5,64E+06	5,71E+06	5,78E+06	5,85E+06	5,92E+06	5,92E+06	5,92E+06	5,92E+06
5,44E+06	5,44E+06	5,51E+06	5,58E+06	5,64E+06	5,71E+06	5,78E+06	5,85E+06	5,92E+06	5,99E+06	5,99E+06	5,99E+06
5,44E+06	5,44E+06	5,51E+06	5,58E+06	5,64E+06	5,71E+06	5,78E+06	5,85E+06	5,92E+06	5,99E+06	6,06E+06	6,06E+06
5,44E+06	5,44E+06	5,51E+06	5,58E+06	5,64E+06	5,71E+06	5,78E+06	5,85E+06	5,92E+06	5,99E+06	6,07E+06	6,13E+06
5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06

G 1- Variação da concentração ao longo da escombreira





• 3D

1.

5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06
5,44E+06	5,44E+06	6,58E+06	6,59E+06	6,61E+06	6,61E+06	6,61E+06	6,61E+06	6,61E+06	6,61E+06	6,61E+06
6,10E+06	6,10E+06	6,77E+06	6,78E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06
6,82E+06	6,82E+06	7,53E+06	7,53E+06	7,54E+06	7,54E+06	7,54E+06	7,54E+06	7,54E+06	7,54E+06	7,54E+06
7,62E+06	7,62E+06	8,41E+06	8,42E+06	8,43E+06	8,43E+06	8,43E+06	8,43E+06	8,43E+06	8,43E+06	8,43E+06
8,52E+06	8,52E+06	9,41E+06	9,42E+06	9,43E+06	9,43E+06	9,43E+06	9,43E+06	9,43E+06	9,43E+06	9,43E+06
9,53E+06	9,53E+06	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07
1,07E+07	1,07E+07	1,18E+07	1,18E+07	1,18E+07	1,18E+07	1,18E+07	1,18E+07	1,18E+07	1,18E+07	1,18E+07
1,19E+07	1,19E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07
1,32E+07	1,32E+07	1,47E+07	1,47E+07	1,47E+07	1,47E+07	1,47E+07	1,47E+07	1,47E+07	1,47E+07	1,47E+07
1,43E+07	1,43E+07	1,63E+07	1,63E+07	1,63E+07	1,63E+07	1,63E+07	1,63E+07	1,63E+07	1,63E+07	1,63E+07
1,50E+07	1,50E+07	1,76E+07	1,77E+07	1,77E+07	1,77E+07	1,77E+07	1,77E+07	1,77E+07	1,77E+07	1,77E+07

G 2- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=3 z=3

2.

5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06
5,44E+06	5,44E+06	6,70E+06	6,71E+06	6,73E+06	6,73E+06	6,73E+06	6,73E+06	6,73E+06	6,73E+06	6,73E+06
6,10E+06	6,10E+06	6,85E+06	8,23E+06	8,27E+06	8,31E+06	8,31E+06	8,31E+06	8,31E+06	8,31E+06	8,31E+06
6,82E+06	6,82E+06	7,61E+06	8,58E+06	9,80E+06	9,86E+06	9,91E+06	9,91E+06	9,92E+06	9,92E+06	9,92E+06
7,62E+06	7,62E+06	8,50E+06	9,47E+06	1,04E+07	1,16E+07	1,17E+07	1,18E+07	1,18E+07	1,18E+07	1,18E+07
8,52E+06	8,52E+06	9,51E+06	1,06E+07	1,15E+07	1,26E+07	1,27E+07	1,27E+07	1,27E+07	1,27E+07	1,27E+07
9,53E+06	9,53E+06	1,06E+07	1,18E+07	1,29E+07	1,39E+07	1,40E+07	1,40E+07	1,40E+07	1,40E+07	1,40E+07
1,07E+07	1,07E+07	1,19E+07	1,32E+07	1,44E+07	1,55E+07	1,56E+07	1,57E+07	1,57E+07	1,57E+07	1,57E+07
1,19E+07	1,19E+07	1,33E+07	1,48E+07	1,61E+07	1,73E+07	1,74E+07	1,75E+07	1,75E+07	1,75E+07	1,75E+07
1,32E+07	1,32E+07	1,48E+07	1,66E+07	1,80E+07	1,94E+07	1,95E+07	1,96E+07	1,96E+07	1,96E+07	1,96E+07
1,43E+07	1,43E+07	1,65E+07	1,85E+07	2,01E+07	2,17E+07	2,18E+07	2,19E+07	2,19E+07	2,19E+07	2,19E+07
1,50E+07	1,50E+07	1,79E+07	2,05E+07	2,24E+07	2,42E+07	2,43E+07	2,44E+07	2,44E+07	2,44E+07	2,44E+07

G 3- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=6 z=6

3.

5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06
5,44E+06	5,44E+06	6,62E+06	6,63E+06	6,65E+06	6,65E+06	6,65E+06	6,65E+06	6,65E+06	6,65E+06	6,65E+06
6,10E+06	6,10E+06	6,80E+06	6,80E+06	6,81E+06	6,81E+06	6,81E+06	6,81E+06	6,81E+06	6,81E+06	6,81E+06
6,82E+06	6,82E+06	7,55E+06	7,56E+06	7,57E+06	7,57E+06	7,57E+06	7,57E+06	7,57E+06	7,57E+06	7,57E+06
7,62E+06	7,62E+06	8,44E+06	8,45E+06	8,46E+06	8,46E+06	8,46E+06	8,46E+06	8,46E+06	8,46E+06	8,46E+06
8,52E+06	8,52E+06	9,44E+06	9,45E+06	9,47E+06	9,47E+06	9,47E+06	9,47E+06	9,47E+06	9,47E+06	9,47E+06
9,53E+06	9,53E+06	1,06E+07	1,06E+07	1,06E+07	1,06E+07	1,06E+07	1,06E+07	1,06E+07	1,06E+07	1,06E+07
1,07E+07	1,07E+07	1,18E+07	1,18E+07	1,18E+07	1,18E+07	1,18E+07	1,18E+07	1,18E+07	1,18E+07	1,18E+07
1,19E+07	1,19E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07
1,32E+07	1,32E+07	1,47E+07	1,47E+07	1,48E+07	1,48E+07	1,48E+07	1,48E+07	1,48E+07	1,48E+07	1,48E+07
1,43E+07	1,43E+07	1,63E+07	1,63E+07	1,64E+07	1,64E+07	1,64E+07	1,64E+07	1,64E+07	1,64E+07	1,64E+07
1,50E+07	1,50E+07	1,77E+07	1,78E+07	1,78E+07	1,78E+07	1,78E+07	1,78E+07	1,78E+07	1,78E+07	1,78E+07

G 4- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para $y=11$ $z=3$

4.

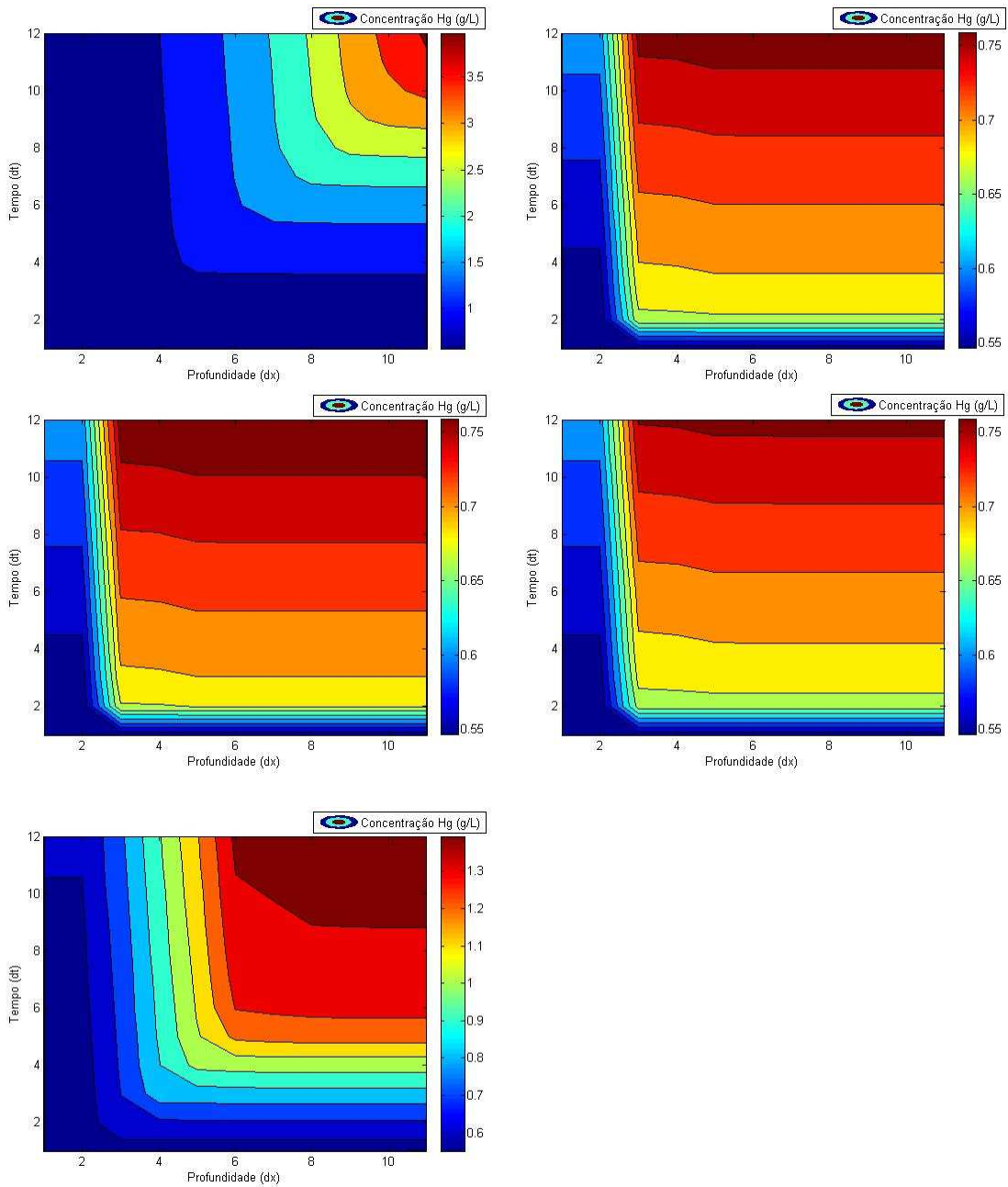
5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06
5,44E+06	5,44E+06	6,66E+06	6,67E+06	6,69E+06	6,69E+06	6,69E+06	6,69E+06	6,69E+06	6,69E+06	6,69E+06
6,10E+06	6,10E+06	6,82E+06	6,83E+06	6,84E+06	6,84E+06	6,84E+06	6,84E+06	6,84E+06	6,84E+06	6,84E+06
6,82E+06	6,82E+06	7,58E+06	7,59E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06
7,62E+06	7,62E+06	8,47E+06	8,48E+06	8,50E+06	8,50E+06	8,50E+06	8,50E+06	8,50E+06	8,50E+06	8,50E+06
8,52E+06	8,52E+06	9,48E+06	9,49E+06	9,50E+06	9,50E+06	9,50E+06	9,50E+06	9,50E+06	9,50E+06	9,50E+06
9,53E+06	9,53E+06	1,06E+07	1,06E+07	1,06E+07	1,06E+07	1,06E+07	1,06E+07	1,06E+07	1,06E+07	1,06E+07
1,07E+07	1,07E+07	1,19E+07	1,19E+07	1,19E+07	1,19E+07	1,19E+07	1,19E+07	1,19E+07	1,19E+07	1,19E+07
1,19E+07	1,19E+07	1,33E+07	1,33E+07	1,33E+07	1,33E+07	1,33E+07	1,33E+07	1,33E+07	1,33E+07	1,33E+07
1,32E+07	1,32E+07	1,48E+07	1,48E+07	1,48E+07	1,48E+07	1,48E+07	1,48E+07	1,48E+07	1,48E+07	1,48E+07
1,43E+07	1,43E+07	1,64E+07	1,64E+07	1,65E+07	1,65E+07	1,65E+07	1,65E+07	1,65E+07	1,65E+07	1,65E+07
1,50E+07	1,50E+07	1,78E+07	1,79E+07	1,79E+07	1,79E+07	1,79E+07	1,79E+07	1,79E+07	1,79E+07	1,79E+07

G 5- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para $y=3$ $z=11$

5.

5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06	5,44E+06
5,44E+06	5,44E+06	6,71E+06	6,72E+06	6,74E+06	6,74E+06	6,74E+06	6,74E+06	6,74E+06	6,74E+06	6,74E+06
6,10E+06	6,10E+06	6,85E+06	8,26E+06	8,30E+06	8,34E+06	8,34E+06	8,34E+06	8,34E+06	8,34E+06	8,34E+06
6,82E+06	6,82E+06	7,61E+06	8,60E+06	1,02E+07	1,03E+07	1,03E+07	1,03E+07	1,03E+07	1,03E+07	1,03E+07
7,62E+06	7,62E+06	8,51E+06	9,50E+06	1,08E+07	1,26E+07	1,27E+07	1,28E+07	1,28E+07	1,28E+07	1,28E+07
8,52E+06	8,52E+06	9,52E+06	1,06E+07	1,19E+07	1,35E+07	1,55E+07	1,57E+07	1,58E+07	1,58E+07	1,58E+07
9,53E+06	9,53E+06	1,06E+07	1,19E+07	1,32E+07	1,48E+07	1,68E+07	1,90E+07	1,92E+07	1,94E+07	1,95E+07
1,07E+07	1,07E+07	1,19E+07	1,33E+07	1,48E+07	1,65E+07	1,85E+07	2,08E+07	2,32E+07	2,35E+07	2,37E+07
1,19E+07	1,19E+07	1,33E+07	1,48E+07	1,65E+07	1,84E+07	2,06E+07	2,29E+07	2,57E+07	2,73E+07	2,77E+07
1,32E+07	1,32E+07	1,49E+07	1,66E+07	1,85E+07	2,06E+07	2,30E+07	2,55E+07	2,82E+07	3,02E+07	3,18E+07
1,43E+07	1,43E+07	1,65E+07	1,85E+07	2,07E+07	2,31E+07	2,57E+07	2,84E+07	3,14E+07	3,34E+07	3,54E+07
1,50E+07	1,50E+07	1,79E+07	2,06E+07	2,31E+07	2,58E+07	2,88E+07	3,18E+07	3,50E+07	3,72E+07	3,93E+07

G 6- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para $y=11$ $z=11$



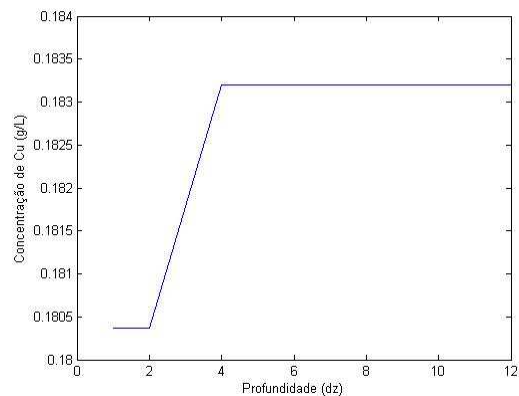
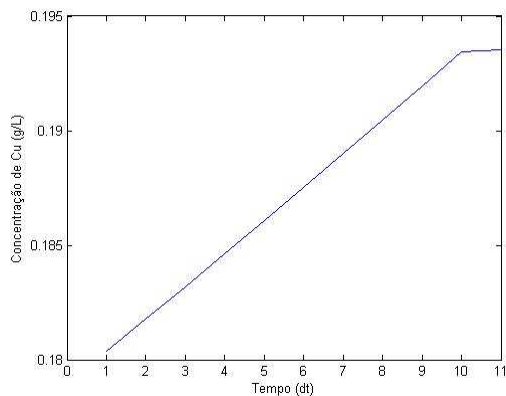
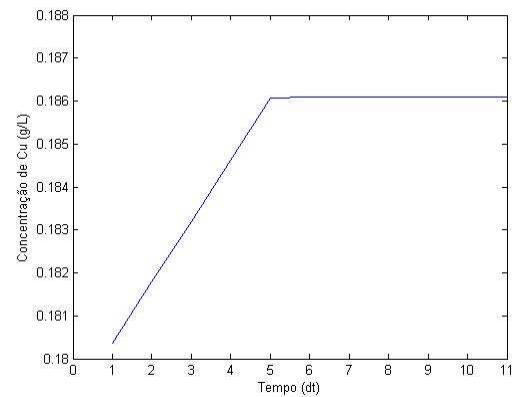
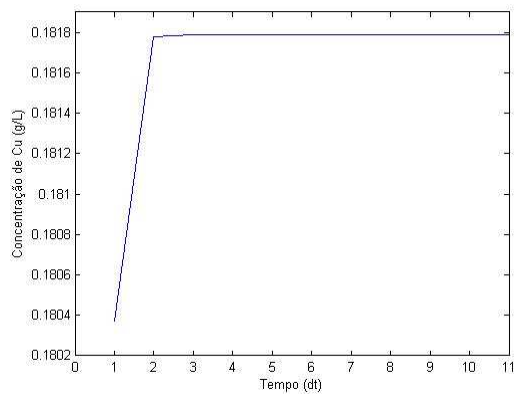
Anexo H

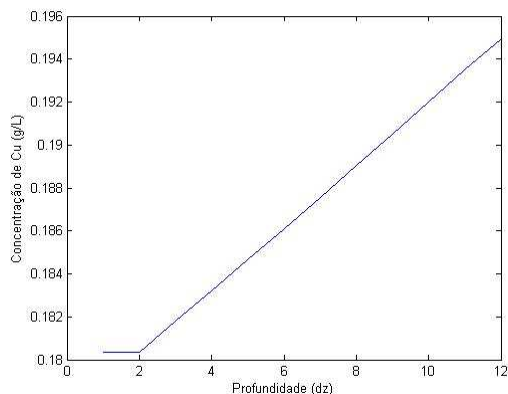
Cobre:

- 1D

1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06
1,80E+06	1,80E+06	1,82E+06	1,82E+06	1,82E+06	1,82E+06	1,82E+06	1,82E+06	1,82E+06	1,82E+06	1,82E+06
1,80E+06	1,80E+06	1,82E+06	1,84E+06	1,84E+06	1,84E+06	1,84E+06	1,84E+06	1,84E+06	1,84E+06	1,84E+06
1,80E+06	1,80E+06	1,82E+06	1,84E+06	1,85E+06	1,85E+06	1,85E+06	1,85E+06	1,85E+06	1,85E+06	1,85E+06
1,80E+06	1,80E+06	1,82E+06	1,84E+06	1,85E+06	1,87E+06	1,87E+06	1,87E+06	1,87E+06	1,87E+06	1,87E+06
1,80E+06	1,80E+06	1,82E+06	1,84E+06	1,85E+06	1,87E+06	1,88E+06	1,88E+06	1,88E+06	1,88E+06	1,88E+06
1,80E+06	1,80E+06	1,82E+06	1,84E+06	1,85E+06	1,87E+06	1,88E+06	1,90E+06	1,90E+06	1,90E+06	1,90E+06
1,80E+06	1,80E+06	1,82E+06	1,84E+06	1,85E+06	1,87E+06	1,88E+06	1,90E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06
1,80E+06	1,80E+06	1,82E+06	1,84E+06	1,85E+06	1,87E+06	1,88E+06	1,90E+06	1,92E+06	1,93E+06	1,93E+06
1,80E+06	1,80E+06	1,82E+06	1,84E+06	1,85E+06	1,87E+06	1,88E+06	1,90E+06	1,92E+06	1,93E+06	1,95E+06
1,80E+06	1,80E+06	1,82E+06	1,84E+06	1,85E+06	1,87E+06	1,88E+06	1,90E+06	1,92E+06	1,93E+06	1,95E+06
1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06

H. 1- Variação da concentração ao longo da escombreira





• 3D

1.

1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06
1,80E+06	1,80E+06	2,02E+06	2,02E+06	2,02E+06	2,02E+06	2,02E+06	2,02E+06	2,02E+06	2,02E+06	2,02E+06	2,02E+06
1,96E+06	1,96E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06
2,13E+06	2,13E+06	2,22E+06	2,22E+06	2,22E+06	2,22E+06	2,22E+06	2,22E+06	2,22E+06	2,22E+06	2,22E+06	2,22E+06
2,31E+06	2,31E+06	2,41E+06	2,41E+06	2,41E+06	2,41E+06	2,41E+06	2,41E+06	2,41E+06	2,41E+06	2,41E+06	2,41E+06
2,51E+06	2,51E+06	2,62E+06	2,62E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06
2,72E+06	2,72E+06	2,85E+06	2,85E+06	2,85E+06	2,85E+06	2,85E+06	2,85E+06	2,85E+06	2,85E+06	2,85E+06	2,85E+06
2,95E+06	2,95E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,10E+06
3,21E+06	3,21E+06	3,37E+06	3,37E+06	3,37E+06	3,37E+06	3,37E+06	3,37E+06	3,37E+06	3,37E+06	3,37E+06	3,37E+06
3,48E+06	3,48E+06	3,66E+06	3,66E+06	3,66E+06	3,66E+06	3,66E+06	3,66E+06	3,66E+06	3,66E+06	3,66E+06	3,66E+06
3,74E+06	3,74E+06	3,97E+06	3,97E+06	3,97E+06	3,97E+06	3,97E+06	3,97E+06	3,97E+06	3,97E+06	3,97E+06	3,97E+06
3,94E+06	3,94E+06	4,26E+06	4,27E+06	4,27E+06	4,27E+06	4,27E+06	4,27E+06	4,27E+06	4,27E+06	4,27E+06	4,27E+06

H. 2- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=3 z=3

2.

1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06
1,80E+06	1,80E+06	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06
1,96E+06	1,96E+06	2,05E+06	2,30E+06	2,31E+06	2,32E+06	2,32E+06	2,32E+06	2,32E+06	2,32E+06	2,32E+06	2,32E+06
2,13E+06	2,13E+06	2,23E+06	2,34E+06	2,58E+06	2,59E+06	2,60E+06	2,60E+06	2,60E+06	2,60E+06	2,60E+06	2,60E+06
2,31E+06	2,31E+06	2,42E+06	2,53E+06	2,66E+06	2,88E+06	2,90E+06	2,90E+06	2,90E+06	2,90E+06	2,90E+06	2,90E+06
2,51E+06	2,51E+06	2,63E+06	2,76E+06	2,87E+06	3,00E+06	3,01E+06	3,02E+06	3,02E+06	3,02E+06	3,02E+06	3,02E+06
2,72E+06	2,72E+06	2,86E+06	3,00E+06	3,13E+06	3,25E+06	3,26E+06	3,26E+06	3,26E+06	3,26E+06	3,26E+06	3,26E+06
2,95E+06	2,95E+06	3,11E+06	3,27E+06	3,41E+06	3,54E+06	3,55E+06	3,55E+06	3,55E+06	3,55E+06	3,55E+06	3,55E+06
3,21E+06	3,21E+06	3,38E+06	3,55E+06	3,71E+06	3,85E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06	3,87E+06
3,48E+06	3,48E+06	3,67E+06	3,86E+06	4,04E+06	4,20E+06	4,21E+06	4,22E+06	4,22E+06	4,22E+06	4,22E+06	4,22E+06
3,74E+06	3,74E+06	3,98E+06	4,20E+06	4,39E+06	4,57E+06	4,58E+06	4,59E+06	4,59E+06	4,59E+06	4,59E+06	4,59E+06
3,94E+06	3,94E+06	4,29E+06	4,56E+06	4,78E+06	4,97E+06	4,99E+06	4,99E+06	4,99E+06	4,99E+06	5,00E+06	5,00E+06

H. 3- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=6 z=6

3.

1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06
1,80E+06	1,80E+06	2,03E+06	2,03E+06	2,03E+06	2,03E+06	2,03E+06	2,03E+06	2,03E+06	2,03E+06	2,03E+06
1,96E+06	1,96E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06
2,13E+06	2,13E+06	2,22E+06	2,22E+06	2,22E+06	2,22E+06	2,22E+06	2,22E+06	2,22E+06	2,22E+06	2,22E+06
2,31E+06	2,31E+06	2,42E+06	2,42E+06	2,42E+06	2,42E+06	2,42E+06	2,42E+06	2,42E+06	2,42E+06	2,42E+06
2,51E+06	2,51E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06
2,72E+06	2,72E+06	2,85E+06	2,86E+06	2,86E+06	2,86E+06	2,86E+06	2,86E+06	2,86E+06	2,86E+06	2,86E+06
2,95E+06	2,95E+06	3,10E+06	3,10E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06
3,21E+06	3,21E+06	3,37E+06	3,37E+06	3,37E+06	3,37E+06	3,37E+06	3,37E+06	3,37E+06	3,37E+06	3,37E+06
3,48E+06	3,48E+06	3,66E+06	3,66E+06	3,67E+06	3,67E+06	3,67E+06	3,67E+06	3,67E+06	3,67E+06	3,67E+06
3,74E+06	3,74E+06	3,97E+06	3,97E+06	3,98E+06	3,98E+06	3,98E+06	3,98E+06	3,98E+06	3,98E+06	3,98E+06
3,94E+06	3,94E+06	4,27E+06	4,28E+06	4,28E+06	4,28E+06	4,28E+06	4,28E+06	4,28E+06	4,28E+06	4,28E+06

H. 4- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=11 z=3

4.

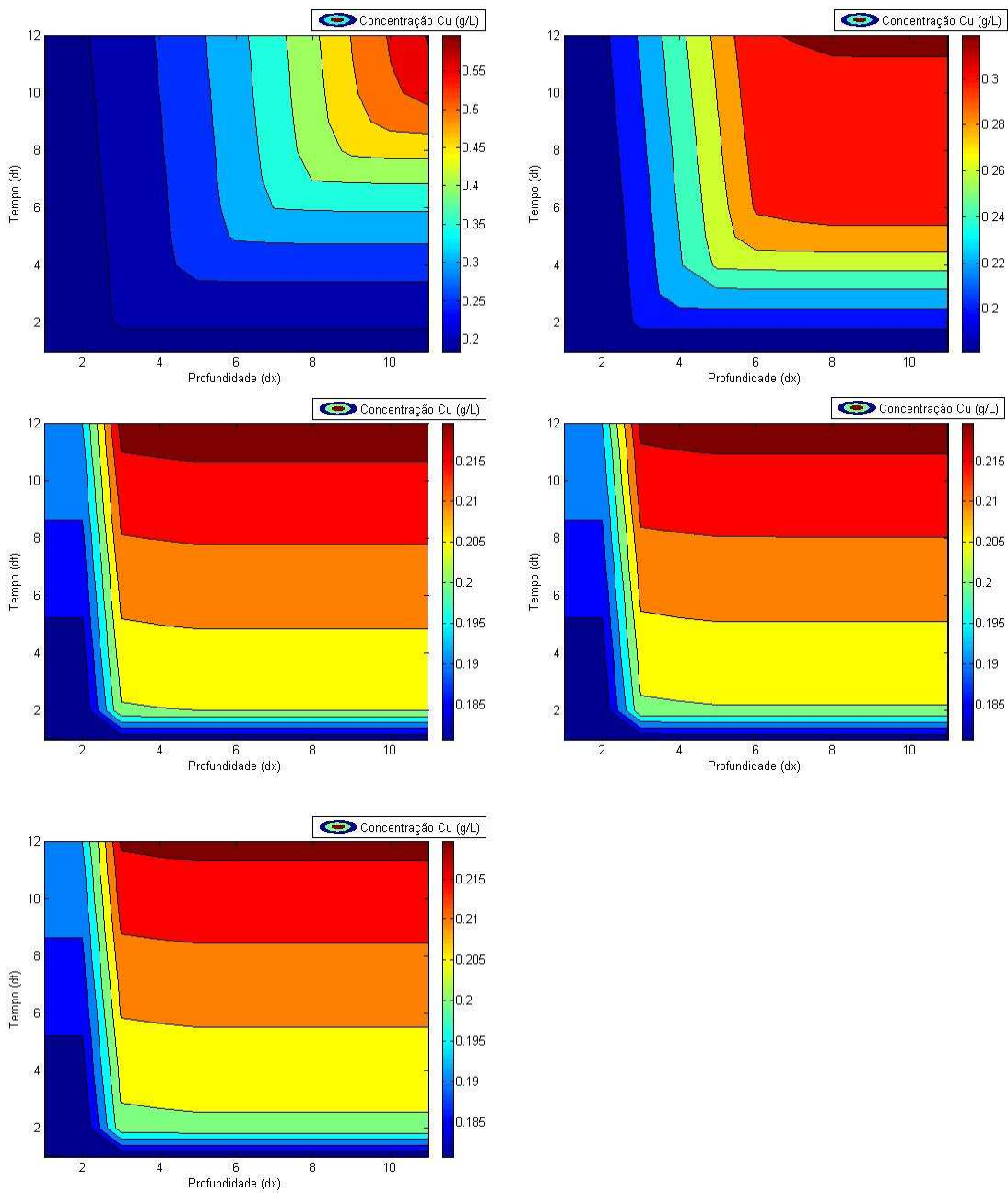
1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06
1,80E+06	1,80E+06	2,03E+06	2,03E+06	2,03E+06	2,03E+06	2,03E+06	2,03E+06	2,03E+06	2,03E+06	2,03E+06
1,96E+06	1,96E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06	2,05E+06
2,13E+06	2,13E+06	2,22E+06	2,22E+06	2,23E+06	2,23E+06	2,23E+06	2,23E+06	2,23E+06	2,23E+06	2,23E+06
2,31E+06	2,31E+06	2,42E+06	2,42E+06	2,42E+06	2,42E+06	2,42E+06	2,42E+06	2,42E+06	2,42E+06	2,42E+06
2,51E+06	2,51E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,63E+06
2,72E+06	2,72E+06	2,86E+06	2,86E+06	2,86E+06	2,86E+06	2,86E+06	2,86E+06	2,86E+06	2,86E+06	2,86E+06
2,95E+06	2,95E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06
3,21E+06	3,21E+06	3,37E+06	3,38E+06	3,38E+06	3,38E+06	3,38E+06	3,38E+06	3,38E+06	3,38E+06	3,38E+06
3,48E+06	3,48E+06	3,66E+06	3,67E+06	3,67E+06	3,67E+06	3,67E+06	3,67E+06	3,67E+06	3,67E+06	3,67E+06
3,74E+06	3,74E+06	3,98E+06	3,98E+06	3,98E+06	3,98E+06	3,98E+06	3,98E+06	3,98E+06	3,98E+06	3,98E+06
3,94E+06	3,94E+06	4,28E+06	4,28E+06	4,29E+06	4,29E+06	4,29E+06	4,29E+06	4,29E+06	4,29E+06	4,29E+06

H. 5- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=3 z=11

5.

1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06
1,80E+06	1,80E+06	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06	2,04E+06
1,96E+06	1,96E+06	2,05E+06	2,30E+06	2,31E+06	2,32E+06	2,32E+06	2,32E+06	2,32E+06	2,32E+06	2,32E+06
2,13E+06	2,13E+06	2,23E+06	2,34E+06	2,62E+06	2,63E+06	2,64E+06	2,64E+06	2,64E+06	2,64E+06	2,64E+06
2,31E+06	2,31E+06	2,42E+06	2,53E+06	2,68E+06	2,97E+06	3,00E+06	3,01E+06	3,01E+06	3,01E+06	3,01E+06
2,51E+06	2,51E+06	2,63E+06	2,76E+06	2,89E+06	3,07E+06	3,39E+06	3,42E+06	3,43E+06	3,43E+06	3,43E+06
2,72E+06	2,72E+06	2,86E+06	3,00E+06	3,15E+06	3,31E+06	3,51E+06	3,86E+06	3,89E+06	3,91E+06	3,91E+06
2,95E+06	2,95E+06	3,11E+06	3,27E+06	3,43E+06	3,60E+06	3,79E+06	4,02E+06	4,39E+06	4,43E+06	4,45E+06
3,21E+06	3,21E+06	3,38E+06	3,56E+06	3,74E+06	3,93E+06	4,12E+06	4,33E+06	4,60E+06	4,89E+06	4,94E+06
3,48E+06	3,48E+06	3,67E+06	3,87E+06	4,07E+06	4,28E+06	4,50E+06	4,72E+06	4,95E+06	5,18E+06	5,44E+06
3,74E+06	3,74E+06	3,98E+06	4,20E+06	4,43E+06	4,66E+06	4,90E+06	5,15E+06	5,40E+06	5,60E+06	5,81E+06
3,94E+06	3,94E+06	4,29E+06	4,56E+06	4,81E+06	5,07E+06	5,34E+06	5,62E+06	5,89E+06	6,10E+06	6,28E+06

H. 6- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para $y=11$ $z=11$



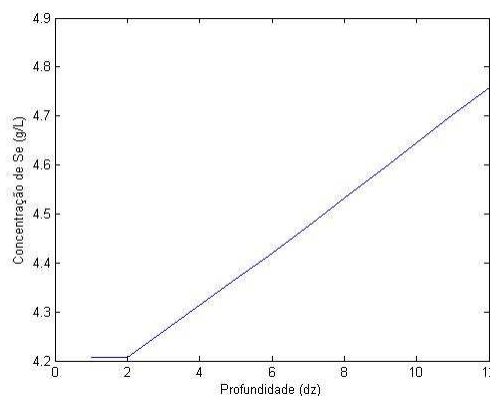
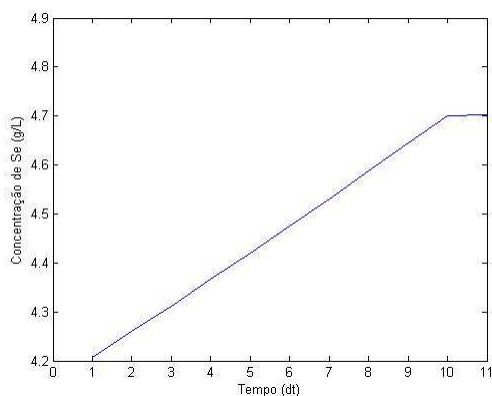
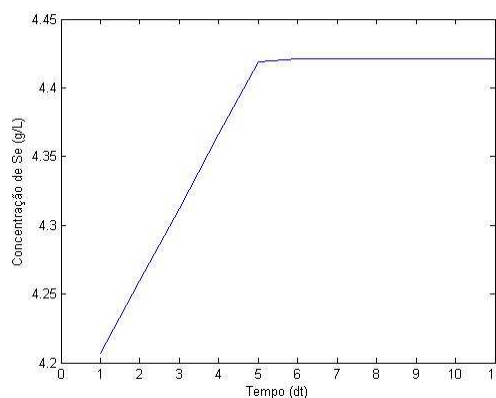
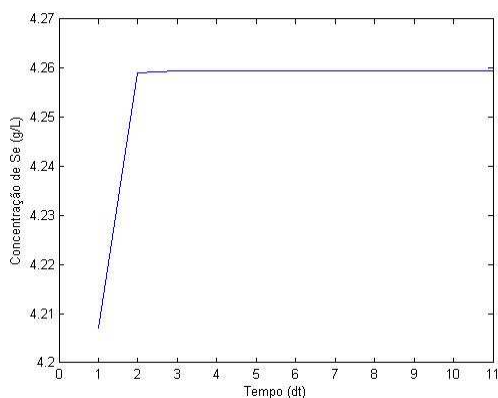
Anexo I

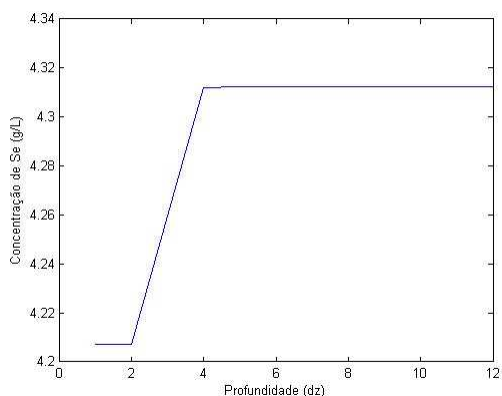
Selénio:

- 1D

4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07
4,21E+07	4,21E+07	4,27E+07	4,27E+07	4,27E+07	4,27E+07	4,27E+07	4,27E+07	4,27E+07	4,27E+07	4,27E+07	4,27E+07
4,21E+07	4,21E+07	4,27E+07	4,33E+07	4,33E+07	4,33E+07	4,33E+07	4,33E+07	4,33E+07	4,33E+07	4,33E+07	4,33E+07
4,21E+07	4,21E+07	4,27E+07	4,33E+07	4,40E+07	4,40E+07	4,40E+07	4,40E+07	4,40E+07	4,40E+07	4,40E+07	4,40E+07
4,21E+07	4,21E+07	4,27E+07	4,33E+07	4,40E+07	4,46E+07	4,47E+07	4,47E+07	4,47E+07	4,47E+07	4,47E+07	4,47E+07
4,21E+07	4,21E+07	4,27E+07	4,33E+07	4,40E+07	4,47E+07	4,53E+07	4,53E+07	4,53E+07	4,53E+07	4,53E+07	4,53E+07
4,21E+07	4,21E+07	4,27E+07	4,33E+07	4,40E+07	4,47E+07	4,53E+07	4,60E+07	4,60E+07	4,60E+07	4,60E+07	4,60E+07
4,21E+07	4,21E+07	4,27E+07	4,33E+07	4,40E+07	4,47E+07	4,53E+07	4,60E+07	4,67E+07	4,67E+07	4,67E+07	4,67E+07
4,21E+07	4,21E+07	4,27E+07	4,33E+07	4,40E+07	4,47E+07	4,53E+07	4,60E+07	4,67E+07	4,74E+07	4,74E+07	4,74E+07
4,21E+07	4,21E+07	4,27E+07	4,33E+07	4,40E+07	4,47E+07	4,53E+07	4,60E+07	4,67E+07	4,74E+07	4,81E+07	4,81E+07
4,21E+07	4,21E+07	4,27E+07	4,33E+07	4,40E+07	4,47E+07	4,53E+07	4,60E+07	4,67E+07	4,74E+07	4,81E+07	4,88E+07
4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07

I. 1- Variação da concentração ao longo da escombreira





• 3D

1.

4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07
4,21E+07	4,21E+07	5,07E+07	5,09E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07
4,80E+07	4,80E+07	5,14E+07	6,11E+07	6,16E+07	6,18E+07	6,18E+07	6,18E+07	6,18E+07	6,18E+07	6,18E+07	6,18E+07
5,47E+07	5,47E+07	5,83E+07	6,28E+07	7,36E+07	7,45E+07	7,49E+07	7,49E+07	7,49E+07	7,49E+07	7,49E+07	7,49E+07
6,23E+07	6,23E+07	6,64E+07	7,07E+07	7,65E+07	8,88E+07	9,02E+07	9,07E+07	9,08E+07	9,08E+07	9,08E+07	9,08E+07
7,10E+07	7,10E+07	7,56E+07	8,05E+07	8,59E+07	9,32E+07	1,07E+08	1,09E+08	1,10E+08	1,10E+08	1,10E+08	1,10E+08
8,09E+07	8,09E+07	8,62E+07	9,17E+07	9,77E+07	1,04E+08	1,13E+08	1,29E+08	1,31E+08	1,32E+08	1,33E+08	1,33E+08
9,22E+07	9,22E+07	9,82E+07	1,05E+08	1,11E+08	1,18E+08	1,27E+08	1,38E+08	1,54E+08	1,57E+08	1,59E+08	1,59E+08
1,05E+08	1,05E+08	1,12E+08	1,19E+08	1,27E+08	1,35E+08	1,44E+08	1,53E+08	1,66E+08	1,80E+08	1,83E+08	1,83E+08
1,19E+08	1,19E+08	1,27E+08	1,36E+08	1,44E+08	1,54E+08	1,64E+08	1,74E+08	1,85E+08	1,97E+08	2,07E+08	2,07E+08
1,35E+08	1,35E+08	1,45E+08	1,55E+08	1,65E+08	1,75E+08	1,86E+08	1,98E+08	2,10E+08	2,20E+08	2,29E+08	2,29E+08
1,48E+08	1,48E+08	1,63E+08	1,76E+08	1,87E+08	2,00E+08	2,12E+08	2,26E+08	2,39E+08	2,50E+08	2,58E+08	2,58E+08

1. 2- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=3 z=3

2.

4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07
4,21E+07	4,21E+07	5,07E+07	5,09E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07
4,80E+07	4,80E+07	5,14E+07	6,09E+07	6,15E+07	6,17E+07	6,17E+07	6,17E+07	6,17E+07	6,17E+07	6,17E+07	6,17E+07
5,47E+07	5,47E+07	5,83E+07	6,27E+07	7,19E+07	7,27E+07	7,29E+07	7,30E+07	7,30E+07	7,30E+07	7,30E+07	7,30E+07
6,23E+07	6,23E+07	6,64E+07	7,07E+07	7,55E+07	8,38E+07	8,47E+07	8,50E+07	8,50E+07	8,50E+07	8,50E+07	8,50E+07
7,10E+07	7,10E+07	7,56E+07	8,04E+07	8,49E+07	8,98E+07	9,04E+07	9,06E+07	9,06E+07	9,06E+07	9,06E+07	9,06E+07
8,09E+07	8,09E+07	8,61E+07	9,16E+07	9,67E+07	1,01E+08	1,02E+08	1,02E+08	1,02E+08	1,02E+08	1,02E+08	1,02E+08
9,22E+07	9,22E+07	9,82E+07	1,04E+08	1,10E+08	1,15E+08	1,16E+08	1,16E+08	1,16E+08	1,16E+08	1,16E+08	1,16E+08
1,05E+08	1,05E+08	1,12E+08	1,19E+08	1,25E+08	1,31E+08	1,32E+08	1,32E+08	1,32E+08	1,32E+08	1,32E+08	1,32E+08
1,19E+08	1,19E+08	1,27E+08	1,36E+08	1,43E+08	1,49E+08	1,50E+08	1,50E+08	1,50E+08	1,50E+08	1,50E+08	1,50E+08
1,35E+08	1,35E+08	1,45E+08	1,54E+08	1,63E+08	1,70E+08	1,71E+08	1,71E+08	1,71E+08	1,71E+08	1,71E+08	1,71E+08
1,48E+08	1,48E+08	1,63E+08	1,75E+08	1,85E+08	1,94E+08	1,95E+08	1,95E+08	1,95E+08	1,95E+08	1,95E+08	1,95E+08

1. 3- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=6 z=6

3.

4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07
4,21E+07	4,21E+07	5,02E+07	5,04E+07	5,04E+07	5,04E+07	5,04E+07	5,04E+07	5,04E+07	5,04E+07	5,04E+07
4,80E+07	4,80E+07	5,12E+07	5,13E+07	5,13E+07	5,13E+07	5,13E+07	5,13E+07	5,13E+07	5,13E+07	5,13E+07
5,47E+07	5,47E+07	5,80E+07	5,81E+07	5,82E+07	5,82E+07	5,82E+07	5,82E+07	5,82E+07	5,82E+07	5,82E+07
6,23E+07	6,23E+07	6,61E+07	6,62E+07	6,62E+07	6,62E+07	6,62E+07	6,62E+07	6,62E+07	6,62E+07	6,62E+07
7,10E+07	7,10E+07	7,53E+07	7,54E+07	7,55E+07	7,55E+07	7,55E+07	7,55E+07	7,55E+07	7,55E+07	7,55E+07
8,09E+07	8,09E+07	8,58E+07	8,60E+07	8,60E+07	8,60E+07	8,60E+07	8,60E+07	8,60E+07	8,60E+07	8,60E+07
9,22E+07	9,22E+07	9,78E+07	9,79E+07	9,80E+07	9,80E+07	9,80E+07	9,80E+07	9,80E+07	9,80E+07	9,80E+07
1,05E+08	1,05E+08	1,11E+08	1,12E+08	1,12E+08	1,12E+08	1,12E+08	1,12E+08	1,12E+08	1,12E+08	1,12E+08
1,19E+08	1,19E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08
1,35E+08	1,35E+08	1,44E+08	1,44E+08	1,45E+08	1,45E+08	1,45E+08	1,45E+08	1,45E+08	1,45E+08	1,45E+08
1,48E+08	1,48E+08	1,62E+08	1,63E+08	1,63E+08	1,63E+08	1,63E+08	1,63E+08	1,63E+08	1,63E+08	1,63E+08

I. 4- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para $y=11$ $z=3$

4.

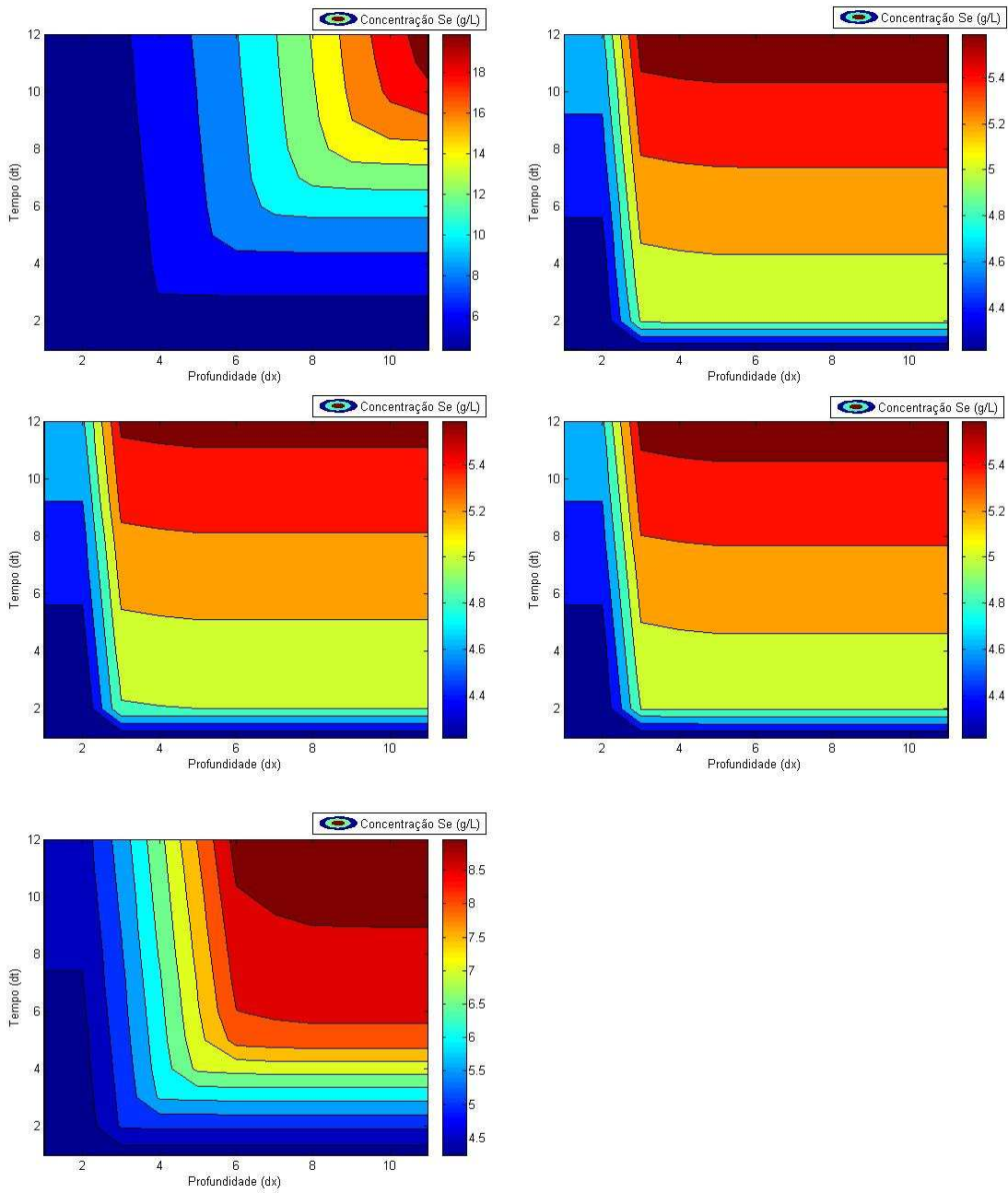
4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07
4,21E+07	4,21E+07	5,03E+07	5,05E+07	5,06E+07	5,06E+07	5,06E+07	5,06E+07	5,06E+07	5,06E+07	5,06E+07
4,80E+07	4,80E+07	5,13E+07	5,14E+07	5,14E+07	5,14E+07	5,14E+07	5,14E+07	5,14E+07	5,14E+07	5,14E+07
5,47E+07	5,47E+07	5,81E+07	5,82E+07	5,82E+07	5,82E+07	5,82E+07	5,82E+07	5,82E+07	5,82E+07	5,82E+07
6,23E+07	6,23E+07	6,62E+07	6,63E+07	6,63E+07	6,63E+07	6,63E+07	6,63E+07	6,63E+07	6,63E+07	6,63E+07
7,10E+07	7,10E+07	7,54E+07	7,55E+07	7,56E+07	7,56E+07	7,56E+07	7,56E+07	7,56E+07	7,56E+07	7,56E+07
8,09E+07	8,09E+07	8,59E+07	8,61E+07	8,61E+07	8,61E+07	8,61E+07	8,61E+07	8,61E+07	8,61E+07	8,61E+07
9,22E+07	9,22E+07	9,79E+07	9,81E+07	9,81E+07	9,81E+07	9,81E+07	9,81E+07	9,81E+07	9,81E+07	9,81E+07
1,05E+08	1,05E+08	1,12E+08	1,12E+08	1,12E+08	1,12E+08	1,12E+08	1,12E+08	1,12E+08	1,12E+08	1,12E+08
1,19E+08	1,19E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08
1,35E+08	1,35E+08	1,44E+08	1,45E+08	1,45E+08	1,45E+08	1,45E+08	1,45E+08	1,45E+08	1,45E+08	1,45E+08
1,48E+08	1,48E+08	1,63E+08	1,63E+08	1,63E+08	1,63E+08	1,63E+08	1,63E+08	1,63E+08	1,63E+08	1,63E+08

I. 5- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para $y=3$ $z=11$

5.

4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07	4,21E+07
4,21E+07	4,21E+07	5,07E+07	5,09E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07	5,10E+07
4,80E+07	4,80E+07	5,14E+07	6,11E+07	6,16E+07	6,18E+07	6,18E+07	6,18E+07	6,18E+07	6,18E+07	6,18E+07
5,47E+07	5,47E+07	5,83E+07	6,28E+07	7,36E+07	7,45E+07	7,49E+07	7,49E+07	7,49E+07	7,49E+07	7,49E+07
6,23E+07	6,23E+07	6,64E+07	7,07E+07	7,65E+07	8,88E+07	9,02E+07	9,07E+07	9,08E+07	9,08E+07	9,08E+07
7,10E+07	7,10E+07	7,56E+07	8,05E+07	8,59E+07	9,32E+07	1,07E+08	1,09E+08	1,10E+08	1,10E+08	1,10E+08
8,09E+07	8,09E+07	8,62E+07	9,17E+07	9,77E+07	1,04E+08	1,13E+08	1,29E+08	1,31E+08	1,32E+08	1,33E+08
9,22E+07	9,22E+07	9,82E+07	1,05E+08	1,11E+08	1,18E+08	1,27E+08	1,38E+08	1,54E+08	1,57E+08	1,59E+08
1,05E+08	1,05E+08	1,12E+08	1,19E+08	1,27E+08	1,35E+08	1,44E+08	1,53E+08	1,66E+08	1,80E+08	1,83E+08
1,19E+08	1,19E+08	1,27E+08	1,36E+08	1,44E+08	1,54E+08	1,64E+08	1,74E+08	1,85E+08	1,97E+08	2,07E+08
1,35E+08	1,35E+08	1,45E+08	1,55E+08	1,65E+08	1,75E+08	1,86E+08	1,98E+08	2,10E+08	2,20E+08	2,29E+08
1,48E+08	1,48E+08	1,63E+08	1,76E+08	1,87E+08	2,00E+08	2,12E+08	2,26E+08	2,39E+08	2,50E+08	2,58E+08

I. 6- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para $y=11$ $z=11$



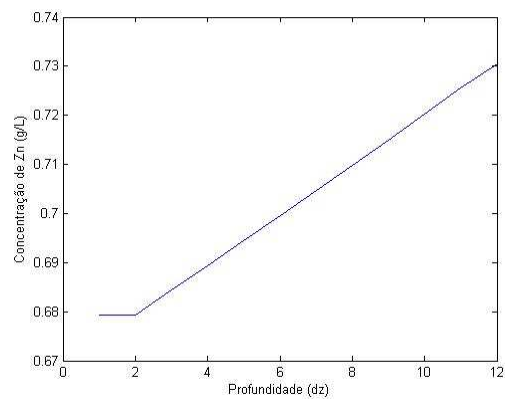
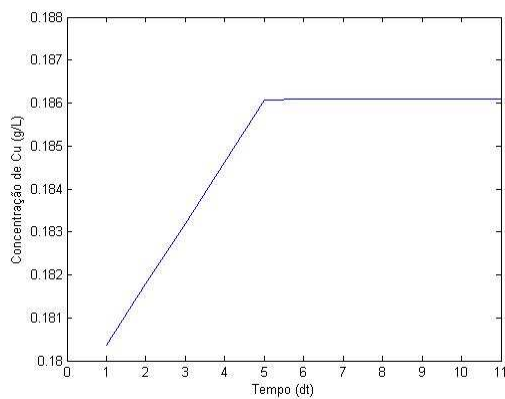
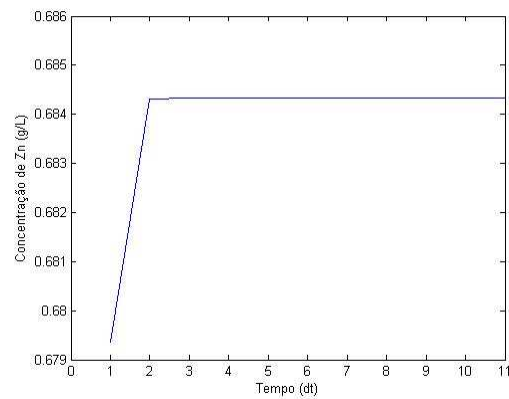
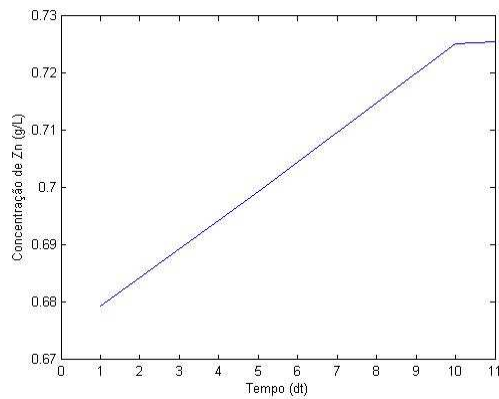
Anexo J

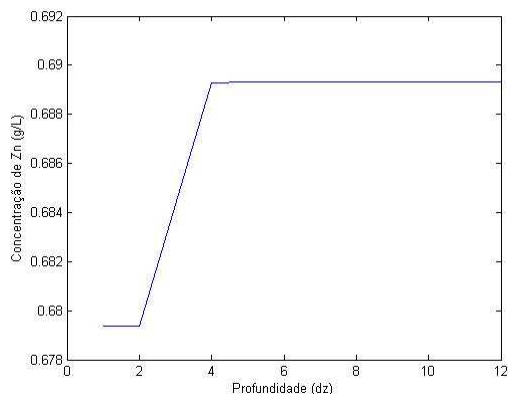
Zinco:

- 1D

6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06
6,79E+06	6,79E+06	6,85E+06	6,85E+06	6,85E+06	6,85E+06	6,85E+06	6,85E+06	6,85E+06	6,85E+06	6,85E+06	6,85E+06
6,79E+06	6,79E+06	6,85E+06	6,90E+06	6,90E+06	6,90E+06	6,90E+06	6,90E+06	6,90E+06	6,90E+06	6,90E+06	6,90E+06
6,79E+06	6,79E+06	6,85E+06	6,91E+06	6,96E+06	6,96E+06	6,96E+06	6,96E+06	6,96E+06	6,96E+06	6,96E+06	6,96E+06
6,79E+06	6,79E+06	6,85E+06	6,91E+06	6,96E+06	7,02E+06	7,02E+06	7,02E+06	7,02E+06	7,02E+06	7,02E+06	7,02E+06
6,79E+06	6,79E+06	6,85E+06	6,91E+06	6,96E+06	7,02E+06	7,07E+06	7,07E+06	7,07E+06	7,07E+06	7,07E+06	7,07E+06
6,79E+06	6,79E+06	6,85E+06	6,91E+06	6,96E+06	7,02E+06	7,08E+06	7,13E+06	7,13E+06	7,13E+06	7,13E+06	7,13E+06
6,79E+06	6,79E+06	6,85E+06	6,91E+06	6,96E+06	7,02E+06	7,08E+06	7,13E+06	7,19E+06	7,19E+06	7,19E+06	7,19E+06
6,79E+06	6,79E+06	6,85E+06	6,91E+06	6,96E+06	7,02E+06	7,08E+06	7,13E+06	7,19E+06	7,25E+06	7,25E+06	7,25E+06
6,79E+06	6,79E+06	6,85E+06	6,91E+06	6,96E+06	7,02E+06	7,08E+06	7,13E+06	7,19E+06	7,25E+06	7,31E+06	7,31E+06
6,79E+06	6,79E+06	6,85E+06	6,91E+06	6,96E+06	7,02E+06	7,08E+06	7,13E+06	7,19E+06	7,25E+06	7,31E+06	7,37E+06
6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06

J. 1- Variação da concentração ao longo da escombreira





• 3D

1.

6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06
6,79E+06	6,79E+06	7,66E+06	7,66E+06	7,67E+06	7,67E+06	7,67E+06	7,67E+06	7,67E+06	7,67E+06	7,67E+06
7,34E+06	7,34E+06	7,74E+06	7,75E+06	7,75E+06	7,75E+06	7,75E+06	7,75E+06	7,75E+06	7,75E+06	7,75E+06
7,93E+06	7,93E+06	8,34E+06	8,34E+06	8,35E+06	8,35E+06	8,35E+06	8,35E+06	8,35E+06	8,35E+06	8,35E+06
8,56E+06	8,56E+06	9,00E+06	9,01E+06	9,01E+06	9,01E+06	9,01E+06	9,01E+06	9,01E+06	9,01E+06	9,01E+06
9,24E+06	9,24E+06	9,72E+06	9,73E+06	9,73E+06	9,73E+06	9,73E+06	9,73E+06	9,73E+06	9,73E+06	9,73E+06
9,98E+06	9,98E+06	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07
1,08E+07	1,08E+07	1,13E+07	1,13E+07	1,13E+07	1,13E+07	1,13E+07	1,13E+07	1,13E+07	1,13E+07	1,13E+07
1,16E+07	1,16E+07	1,22E+07	1,22E+07	1,22E+07	1,22E+07	1,22E+07	1,22E+07	1,22E+07	1,22E+07	1,22E+07
1,25E+07	1,25E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07
1,34E+07	1,34E+07	1,42E+07	1,42E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07
1,41E+07	1,41E+07	1,52E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07

J. 2- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=3 z=3

2.

6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06
6,79E+06	6,79E+06	7,71E+06	7,72E+06	7,73E+06	7,73E+06	7,73E+06	7,73E+06	7,73E+06	7,73E+06	7,73E+06
7,34E+06	7,34E+06	7,77E+06	8,75E+06	8,77E+06	8,78E+06	8,79E+06	8,79E+06	8,79E+06	8,79E+06	8,79E+06
7,93E+06	7,93E+06	8,37E+06	8,88E+06	9,80E+06	9,83E+06	9,85E+06	9,85E+06	9,85E+06	9,85E+06	9,85E+06
8,56E+06	8,56E+06	9,03E+06	9,53E+06	1,01E+07	1,09E+07	1,10E+07	1,10E+07	1,10E+07	1,10E+07	1,10E+07
9,24E+06	9,24E+06	9,75E+06	1,03E+07	1,08E+07	1,13E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07
9,98E+06	9,98E+06	1,05E+07	1,11E+07	1,16E+07	1,22E+07	1,22E+07	1,22E+07	1,22E+07	1,22E+07	1,22E+07
1,08E+07	1,08E+07	1,14E+07	1,20E+07	1,26E+07	1,31E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07
1,16E+07	1,16E+07	1,23E+07	1,30E+07	1,36E+07	1,42E+07	1,42E+07	1,42E+07	1,42E+07	1,42E+07	1,42E+07
1,25E+07	1,25E+07	1,33E+07	1,40E+07	1,47E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,54E+07	1,54E+07	1,54E+07	1,54E+07
1,34E+07	1,34E+07	1,43E+07	1,51E+07	1,58E+07	1,65E+07	1,66E+07	1,66E+07	1,66E+07	1,66E+07	1,66E+07
1,41E+07	1,41E+07	1,53E+07	1,63E+07	1,71E+07	1,78E+07	1,79E+07	1,79E+07	1,79E+07	1,79E+07	1,79E+07

J. 3- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=6 z=6

3.

6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06
6,79E+06	6,79E+06	7,67E+06	7,68E+06	7,69E+06	7,69E+06	7,69E+06	7,69E+06	7,69E+06	7,69E+06	7,69E+06
7,34E+06	7,34E+06	7,75E+06	7,76E+06	7,76E+06	7,76E+06	7,76E+06	7,76E+06	7,76E+06	7,76E+06	7,76E+06
7,93E+06	7,93E+06	8,35E+06	8,35E+06	8,36E+06	8,36E+06	8,36E+06	8,36E+06	8,36E+06	8,36E+06	8,36E+06
8,56E+06	8,56E+06	9,01E+06	9,02E+06	9,02E+06	9,02E+06	9,02E+06	9,02E+06	9,02E+06	9,02E+06	9,02E+06
9,24E+06	9,24E+06	9,73E+06	9,74E+06	9,74E+06	9,74E+06	9,74E+06	9,74E+06	9,74E+06	9,74E+06	9,74E+06
9,98E+06	9,98E+06	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07
1,08E+07	1,08E+07	1,13E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07
1,16E+07	1,16E+07	1,23E+07	1,23E+07	1,23E+07	1,23E+07	1,23E+07	1,23E+07	1,23E+07	1,23E+07	1,23E+07
1,25E+07	1,25E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,32E+07
1,34E+07	1,34E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07
1,41E+07	1,41E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07

J. 4- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=11 z=3

4.

6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06
6,79E+06	6,79E+06	7,69E+06	7,70E+06	7,71E+06	7,71E+06	7,71E+06	7,71E+06	7,71E+06	7,71E+06	7,71E+06
7,34E+06	7,34E+06	7,76E+06	7,76E+06	7,77E+06	7,77E+06	7,77E+06	7,77E+06	7,77E+06	7,77E+06	7,77E+06
7,93E+06	7,93E+06	8,36E+06	8,36E+06	8,36E+06	8,36E+06	8,36E+06	8,36E+06	8,36E+06	8,36E+06	8,36E+06
8,56E+06	8,56E+06	9,02E+06	9,03E+06	9,03E+06	9,03E+06	9,03E+06	9,03E+06	9,03E+06	9,03E+06	9,03E+06
9,24E+06	9,24E+06	9,74E+06	9,75E+06	9,75E+06	9,75E+06	9,75E+06	9,75E+06	9,75E+06	9,75E+06	9,75E+06
9,98E+06	9,98E+06	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07
1,08E+07	1,08E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07
1,16E+07	1,16E+07	1,23E+07	1,23E+07	1,23E+07	1,23E+07	1,23E+07	1,23E+07	1,23E+07	1,23E+07	1,23E+07
1,25E+07	1,25E+07	1,32E+07	1,32E+07	1,33E+07	1,33E+07	1,33E+07	1,33E+07	1,33E+07	1,33E+07	1,33E+07
1,34E+07	1,34E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07	1,43E+07
1,41E+07	1,41E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07	1,53E+07

J. 5- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para y=3 z=11

5.

6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06	6,79E+06
6,79E+06	6,79E+06	7,71E+06	7,72E+06	7,73E+06	7,73E+06	7,73E+06	7,73E+06	7,73E+06	7,73E+06	7,73E+06
7,34E+06	7,34E+06	7,77E+06	8,75E+06	8,78E+06	8,79E+06	8,79E+06	8,79E+06	8,79E+06	8,79E+06	8,79E+06
7,93E+06	7,93E+06	8,37E+06	8,88E+06	9,94E+06	9,98E+06	1,00E+07	1,00E+07	1,00E+07	1,00E+07	1,00E+07
8,56E+06	8,56E+06	9,03E+06	9,54E+06	1,02E+07	1,13E+07	1,13E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07	1,14E+07
9,24E+06	9,24E+06	9,75E+06	1,03E+07	1,09E+07	1,16E+07	1,28E+07	1,29E+07	1,30E+07	1,30E+07	1,30E+07
9,98E+06	9,98E+06	1,05E+07	1,11E+07	1,17E+07	1,24E+07	1,33E+07	1,45E+07	1,46E+07	1,47E+07	1,47E+07
1,08E+07	1,08E+07	1,14E+07	1,20E+07	1,27E+07	1,34E+07	1,41E+07	1,51E+07	1,65E+07	1,66E+07	1,67E+07
1,16E+07	1,16E+07	1,23E+07	1,30E+07	1,37E+07	1,44E+07	1,52E+07	1,61E+07	1,72E+07	1,83E+07	1,84E+07
1,25E+07	1,25E+07	1,33E+07	1,40E+07	1,48E+07	1,56E+07	1,65E+07	1,74E+07	1,83E+07	1,92E+07	2,02E+07
1,34E+07	1,34E+07	1,43E+07	1,51E+07	1,60E+07	1,68E+07	1,78E+07	1,87E+07	1,97E+07	2,06E+07	2,14E+07
1,41E+07	1,41E+07	1,53E+07	1,63E+07	1,72E+07	1,82E+07	1,92E+07	2,02E+07	2,13E+07	2,21E+07	2,29E+07

J. 6- Variação da concentração ao longo da unidade geológica para $y=11$ $z=11$

