



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SEMIÁRIDO
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA DE BIOTECNOLOGIA E BIOPROCESSOS
CURSO DE ENGENHARIA DE BIOTECNOLOGIA E BIOPROCESSOS**

ANA CARLA DA FONSECA FERREIRA

**ESTUDO NUMÉRICO DO COMPORTAMENTO DA PLUMA DE CONTAMINANTES
EM SOLO A PARTIR DE VAZAMENTO EM LAGOA DE TRATAMENTO DE
ESGOTO**

**SUMÉ – PB
2017**

ANA CARLA DA FONSECA FERREIRA

**ESTUDO NUMÉRICO DO COMPORTAMENTO DA PLUMA DE CONTAMINANTES
EM SOLO A PARTIR DE VAZAMENTO EM LAGOA DE TRATAMENTO DE
ESGOTO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

Orientadora: Prof. Dra. Fabiana Pimentel Macêdo Farias

F776e Ferreira, Ana Carla da Fonseca.
Estudo numérico do comportamento da pluma de contaminantes em solo a partir de vazamento em lagoa de tratamento de esgoto. / Ana Carla da Fonseca Ferreira. Sumé - PB: [s.n], 2017.

48 f. : il.

Orientadora: Professora Dra. Fabiana Pimentel Macêdo Farias.

Monografia - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido; Curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

1. Contaminação do solo. 2. Pluma de contaminantes. 3. Lagoa de tratamento de esgotos. 4. Metais pesados no solo – cobre. 5. Fluidodinâmica computacional. I. Título.

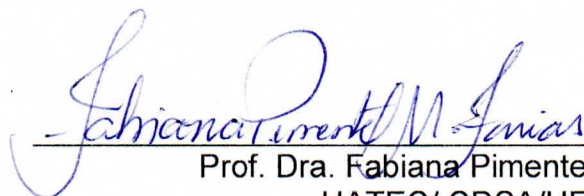
CDU: 628.32:631.4(043.1)

ANA CARLA DA FONSECA FERREIRA

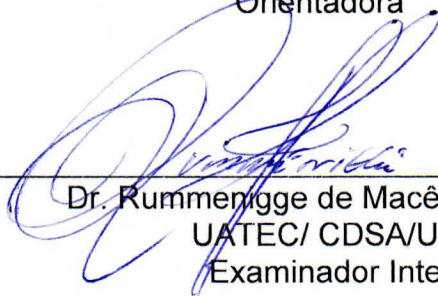
**ESTUDO NUMÉRICO DO COMPORTAMENTO DA PLUMA DE CONTAMINANTES
EM SOLO A PARTIR DE VAZAMENTO EM LAGOA DE TRATAMENTO DE
ESGOTO**

Aprovado em: 19/09/2014.

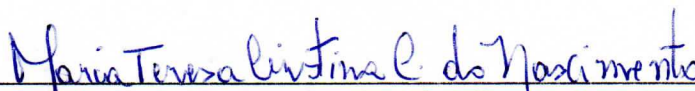
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Fabiana Pimentel Macêdo Farias
UATEC/ CDSA/UFCEG
Orientadora



Dr. Rummenigge de Macêdo Rodrigues
UATEC/ CDSA/UFCEG
Examinador Interno



MSc. Maria Teresa Cristina Coelho do Nascimento
Pesquisadora
Examinadora Externa

Ao meu primo Saulo Gustavo (*in memoriam*) e meu avô Expedito Fonseca (*in memoriam*). Pelas boas lembranças e saudades que deixaram. Nunca os esquecerei. *DEDICO*.

AGRADECIMENTOS

É difícil agradecer a todas as pessoas que de algum modo, nos momentos serenos e/ou apreensivos, à distância ou fisicamente, fizeram parte deste ciclo, marcado de muito aprendizado, descobertas, medos e superação. Por isso, aos que eu não citar, sintam-se queridos também.

A quem esteve comigo todas horas, meu amigo e mestre, Deus. Gratidão por nunca desistir de mim, Senhor!

Aos meus pais Edna Maria e Antônio Romualdo, por serem tão maravilhosos comigo. Obrigada por todo amor, dedicação, paciência e por sempre acreditarem em mim. Vocês são os responsáveis por essa conquista. Amo vocês!

Ao meu irmão Ericson (Tim), por toda paciência, por me orientar nas escolhas que devo fazer e por sempre se fazer presente, mesmo na distância.

A minha avó Maria Moura (Branquinha), símbolo de amor e alegria na minha casa, dona do melhor abraço. Te amo, vó!

A família que ganhei de presente Neide, Luan, sr. Carlinhos e Ciene, “painha”, dona Margarida e tantas outras pessoas especiais, que me receberam de braços abertos na chegada a Sumé.

A minha orientadora Prof. Dra. Fabiana Pimentel Macêdo Farias, pela amizade ao longo dessa jornada, dedicada orientação, por toda contribuição e apoio, para que fosse possível a concretização deste trabalho. Obrigada por tudo!

Ao Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto, por todos os conhecimentos repassados e sugestões feitas visando o enriquecimento deste trabalho.

Aos professores do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, que me acompanharam durante esses cinco anos de graduação, sou e *serei sempre* muito grata por tudo.

A turma de Eng. Biotecnologia e Bioprocessos 2012.1, Jéssica Moreira, Magna Lima, Eliélson Barros, Mayk Bezerra, Jean Carlos, Darlyson Guimarães, André Gonçalves, Jaqueline Siqueira, Rodolfo Inácio, Renato França, Aparecida Yasmim, Aisla Rayanny, Éder Nascimento, Neto Lino, Maysa Bernardino, Semyres

Souza, Suelen Lins, por todos os momentos compartilhados, sou grata por cada um deles.

A minha amiga Jéssica Renaly, obrigada pela amizade compartilhada ao longo desses anos, pela companhia nas horas de estudo, por todo apoio e pelo “vai dar tudo certo”. No fim, víamos que sempre dava.

A Jéssica Moreira, *gracias* por me ouvir sempre que precisava, pelos abraços acalentadores e pelas tantas conversas que tivemos.

Ao meu amigo Adriano Matos, pela amizade que começou nos anos iniciais e perdura até hoje, grata por todo apoio, confiança e pelas conversas.

A meu conterrâneo, Alandson Lacerda, por todo apoio. Aos seus pais, sr. Aurino Tavares e sra. Nuncia Lacerda, pelo carinho destinado a mim e a minha família, pelas caronas até Sumé e por toda consideração. Muito Obrigada!

A Mayk Bezerra, pela amizade, conversas, estudos e **muito café**, compartilhados.

A Jéssica Sabrina, Jéssica Moreira, Jéssica Renaly, Monalisa Farias e Iracema Paiva. Obrigada pela convivência!

A Luana Braz, Liliane Braz e Karla Menezes, por terem me acolhido durante esses 4 meses na cidade de Campina Grande e pela companhia diária. Obrigada!

A Ismael Lacerda, pela companhia em momentos difíceis, pela amizade oferecida e por todo carinho.

A todos que contribuíram, direto ou indiretamente, para realização deste trabalho.

Quando nada parece dar certo, vou ver o cortador de pedras martelando sua rocha talvez cem vezes, sem que uma única rachadura apareça. Mas na centésima primeira martelada a pedra se abre em duas, e eu sei que não foi aquela que conseguiu isto, mas todas as que vieram antes”

Jacob Riis

*Tua Palavra é lâmpada que ilumina os meus passos
e luz que clareia o meu caminho!*

SL (119:105)

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo avaliar o comportamento de uma pluma de contaminante, especificamente o cobre (Cu), com origem em uma lagoa de tratamento de esgoto, por meio do emprego da Fluidodinâmica Computacional. As equações de conservação de massa, momento linear e transferência de matéria foram resolvidas simultaneamente através do modelo de escoamento monofásico e multicomponente disponível no ANSYS CFX[®] 15, considerando um domínio poroso bidimensional, com propriedades constantes e distribuídas uniformemente. Os resultados numéricos indicam que o comportamento da pluma do contaminante é influenciado pela velocidade da água escoando horizontalmente no meio poroso, pela velocidade do vazamento de contaminante na base da lagoa e pela permeabilidade do meio poroso.

Palavras-chave: Meio poroso. Fluidodinâmica computacional. Metal pesado.

ABSTRACT

The objective of this paper is to assess the behavior of a plume of contaminants, specifically copper (Cu), that originates from a sewage treatment lagoon by the application of Computational Fluid Dynamics. Mass conservation, linear momentum and transfer of matter equations were simultaneously solved by adoption of monophasic and multi-component outflow, using the software ANSYS CFX® 15, considering a two-dimensional porous medium and with constant and uniformly distributed properties. Numerical results indicate that the behavior of the plume of contaminant is influenced by the speed of the water horizontally outflowing in a porous medium, the speed of the leakage of contaminant on the bottom of the lagoon and the permeability of the porous medium.

Keywords: Porous medium. Computational Fluid Dynamics. Heavy metal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Zona não-saturada e saturada do subsolo _____	17
Figura 2 – Principais fontes de contaminação do solo e águas subterrâneas _____	23
Figura 3 – Dinâmica dos metais pesados no solo _____	26
Figura 4 – Geometria final do domínio computacional estudado _____	29
Figura 5 – Malha numérica de simulação: (a) visão geral e (b) detalhe da região da lagoa de tratamento de esgoto _____	30
Figura 6 – Condições de contorno _____	32
Figura 7 – Dispersão do contaminante (Cu) em função do tempo (caso 3) _____	35
Figura 8 – Dispersão da pluma cobre (Cu) em função do tempo (Caso 6) _____	37
Figura 9 – Dispersão da pluma cobre (Cu) em função do tempo (Caso 4) _____	37
Figura 10 – Dispersão da pluma cobre (Cu) em função do tempo (Caso 5) _____	38
Figura 11 – Campo vetorial da corrente de água no solo. _____	38
Figura 12 – Dispersão do contaminante cobre (Cu) em função do tempo (Caso 1) _____	39
Figura 13 – Dispersão do contaminante cobre (Cu) em função do tempo (Caso 2) _____	40
Figura 14 – Dispersão do contaminante cobre (Cu) em 100h para diferentes permeabilidades. (a) Caso 6; (b) Caso 7; (c) Caso 8 _____	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas da água 25°C e 1 atm	33
Tabela 2 - Propriedades físico-químicas do cobre 25°C e 1 atm	33

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de alguns elementos químicos de acordo com sua toxicidade para a fauna e flora	25
Quadro 2 - Casos estudados	34

ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional das Águas
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LCTF	Laboratório Computacional em Térmica e Fluidos
LPFI	Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem
SNIS	Sistema Nacional de Informações do Saneamento

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

k	Permeabilidade absoluta	[m ²]
K	Tensor permeabilidade	[-]
P	Pressão	[Pa]
D	Coeficiente de difusão	[cm ² s ⁻¹]
S_M	Fonte de momento	[kg m ⁻² s ⁻²]
x_i	Distância longitudinal na direção i	[m]
J_i	Fluxo difusivo de massa na direção i	[kg m ⁻² s ⁻¹]
v_i	Velocidade intersticial do fluido	[m s ⁻¹]
C	Concentração	[kg m ⁻³]
\vec{V}	Vetor velocidade	[m s ⁻¹]

Letras Gregas

v	Velocidade de Darcy	[m.s ⁻¹]
Φ	Porosidade	[-]
ρ	Massa específica	[kg.m ⁻³]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	[Pa.s]
μ_e	Viscosidade efetiva	[Pa.s]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVO GERAL	16
1.1.1 Objetivos Específicos	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 SOLO: ASPECTOS GERAIS	17
2.1.1 Mecanismos de Transporte de Contaminantes no Meio Poroso	18
2.2 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	21
2.3 CONTAMINAÇÃO DOS SOLOS E DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	22
2.3.1 Lagoa de Tratamento de Esgoto	24
2.3.1.1 Metais pesados	24
2.3.1.1.1 <i>Cobre</i>	25
2.4 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	27
3 MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	29
3.1.1 Malha Computacional	30
3.2 MODELAGEM MATEMÁTICA	31
3.2.1 Condições Iniciais e de Contorno	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ENTRADA DE ÁGUA	36
4.2 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE VAZAMENTO	39
4.3 INFLUÊNCIA DA PERMEABILIDADE DO SOLO	40
5 CONCLUSÃO	43
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	43
REFERÊNCIAS	444

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a sociedade vem se defrontando com uma série de problemas globais, sobretudo ambientais, econômicos, sociais e de mercado. Neste quadro, as preocupações com o meio ambiente e com a água, em particular, adquirem especial importância, pois as demandas estão se tornando cada vez maiores, sob o impacto do crescimento acelerado da população e do maior uso da água, imposto pelos padrões de conforto e bem-estar da vida moderna. Entretanto, a qualidade das águas, dos ecossistemas e da vida, em geral, vem sendo degradada de uma maneira alarmante, e esse processo logo pode ser irreversível (REBOUÇAS; BRAGA; TUNDISI, 2002).

Com a crescente contaminação das águas superficiais, as reservas subterrâneas passaram a exercer um importante papel como fonte de abastecimento, em virtude da abundância e qualidade de água doce. Apesar da extrema importância dos aquíferos, estes estão sendo contaminados com o uso abusivo de agrotóxicos e fertilizantes (provenientes da agricultura), fossas sépticas, aterros sanitários, depósitos subterrâneos de produtos químicos e combustíveis, bem como lagoas de tratamento de esgotos (KULKAMP; CORSEUIL; Jr. AMORIM, 2002).

Uma das principais causas de contaminação destas águas decorre de vazamentos em lagoas de tratamento de esgoto. Estas, por sua vez, são unidades construídas com a finalidade de tratar efluentes domésticos e/ou industriais, por meio da ação de microrganismos naturalmente presentes no meio, estando o solo devidamente compactado para evitar a infiltração de contaminantes e conseqüentemente, a contaminação das águas subterrâneas (HAANDEL; MARAIS, 1999).

Em geral, nos efluentes domésticos e industriais podem ser encontrados inúmeros compostos orgânicos e inorgânicos, nutrientes e microrganismos, alguns de difícil remoção, como os metais pesados. Estes, por sua vez, constituem uma ameaça à saúde humana devido aos seus impactos na qualidade da água, dos alimentos e dos ecossistemas.

O conhecimento de como ocorre o avanço dos contaminantes no solo, se estes atingirão ou não o lençol freático, em quanto tempo e em que concentração, além do entendimento de como as características do solo (porosidade e permeabilidade) influenciam nesse avanço, são de extrema importância para se conhecer a extensão do dano ambiental e, assim, adotar medidas de remediação mais adequadas para minimizar o problema.

Neste sentido, a fluidodinâmica computacional aliada ao conhecimento dos mecanismos de transporte dos contaminantes no solo (difusão, advecção e dispersão) e ao grau de saturação, passa a ser uma ferramenta importantíssima para fornecer informações que poderão auxiliar numa estimativa do prejuízo ambiental causado pelo vazamento da lagoa de tratamento de esgoto.

1.1 OBJETIVO GERAL

Estudar numericamente o comportamento fluidodinâmico da pluma de contaminante, proveniente de um vazamento em lagoa de tratamento de esgoto no solo saturado.

1.1.1. Objetivos Específicos

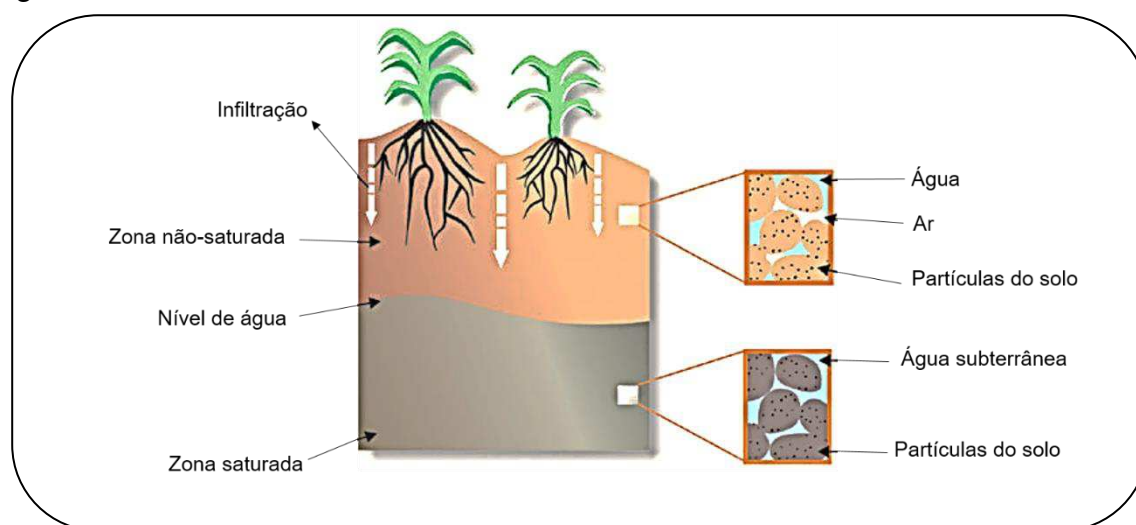
- Definir um modelo matemático para prever o processo de dispersão de poluentes no solo proveniente do vazamento de lagoas de tratamento de esgotos;
- Avaliar o efeito das velocidades de vazamento e da água sobre o comportamento da pluma;
- Avaliar a influência da permeabilidade do solo sobre o comportamento da pluma de contaminante.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SOLO: ASPECTOS GERAIS

O solo é um meio complexo e heterogêneo, resultado da constante redistribuição e organização de seu material de origem (natureza mineral ou orgânica), em consequência dos processos de formação como transformações, translocações, adições e remoções. Este meio é constituído por uma sucessão de camadas horizontais chamado de perfil do solo, possuindo quantidades variáveis de minerais, matéria orgânica, água, ar e microrganismos, como minhocas, bactérias e fungos (LIMA, V; LIMA, M; MELO, 2007). Com relação a presença de água e ar nas suas camadas, a Figura 1 apresenta as duas denominações existentes, chamada de zona saturada e não-saturada.

Figura 1 - Zona não-saturada e saturada do subsolo



Fonte: (LNEG, 2001).

As propriedades físicas, químicas e biológicas do solo são bastante variáveis e determinadas especialmente pelo processo geológico de formação e sua evolução ao longo dos anos, como resultado da interação do seu material de origem com o clima, a biota (vegetação nativa, organismos vivos, animais e cada vez mais os

seres humanos), o relevo local e o tempo (BRADY; WEIL; 2012). A seguir, segue uma abordagem geral destas propriedades.

As propriedades físicas do solo, como textura, estrutura, densidade, porosidade e permeabilidade, são responsáveis pelos mecanismos de atenuação física de poluentes, como infiltração e lixiviação, tendo influência ainda sobre os processos de atenuação química e biológica (CETESB, 2013; TELHADO et al, 2010).

A permeabilidade pode ser definida como a maior ou menor facilidade com que a água atravessa através dos seus vazios (ABNT NBR 6502/1995). Segundo Elhakim (2016), a permeabilidade do solo é afetada por vários fatores, incluindo taxa de vazios, distribuição de poros e grau de saturação.

As propriedades químicas dos solos, assim como a atividade biológica, são responsáveis pelos principais mecanismos de atenuação de poluentes através dos processos de adsorção, fixação química, precipitação, oxidação, troca e neutralização que continuamente ocorrem no solo, podendo ser incrementados através do manejo de suas propriedades. O potencial hidrogeniônico (pH), teor de nutrientes, capacidade de troca iônica, condutividade elétrica e teor de matéria orgânica são as principais características responsáveis pela ocorrência desses processos (CETESB, 2013).

2.1.1. Mecanismos de Transporte de Contaminantes no Meio Poroso

Para o entendimento de como ocorre o transporte do fluido em meio poroso, é necessário a abordagem das equações diferenciais parciais que descrevem as relações cinéticas e dinâmicas entre o fluido, o meio poroso e o parâmetro de escoamento no ponto dentro do domínio considerado (BEAR, 1972).

O transporte de contaminantes no solo ocorre através dos meios fluidos (ar e água), tratando-se de um processo de elevada complexidade, pois engloba vários fenômenos, como advecção, dispersão hidrodinâmica (ambos constituem como processos físicos), bem como reações químicas, que ocorrem no próprio soluto e/ou entre o soluto e o solo (FETTER, 1993; SILVA, 2015).

A velocidade é, na mecânica dos corpos rígidos, a taxa temporal de mudança na posição da partícula do fluido. Considerando que o mesmo sofra deformação contínua ao longo do seu movimento, é essencial determinar a velocidade em seus diversos pontos. Quando se fala em velocidade, é possível associá-la com o fenômeno de advecção, que relaciona o movimento dos contaminantes com o escoamento do fluido (água e ar), uma vez que o carrega consigo, pelo ponto de vista macroscópico. A velocidade de transporte em meio poroso é regida pela generalização da lei de Darcy e pode ser representada pela Equação 2.1 (BEAR, 1972).

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial X_i} \quad (2.1)$$

Onde: v é velocidade de Darcy ou velocidade superficial, k é a permeabilidade absoluta, μ é a viscosidade dinâmica do fluido, P é a pressão e X_i é a distância longitudinal nesta direção.

Por definição, um meio poroso é uma fase sólida contínua que contém muitos espaços vazios (poros) em seu interior. A porosidade é normalmente uma propriedade isotrópica, logo a velocidade intersticial (V_i) está relacionada com a velocidade de Darcy (v) através da Equação 2.2.

$$V_i = -\frac{k}{\phi \mu} \frac{\partial P}{\partial X_i} \quad (2.2)$$

Ou ainda:

$$V_i = \frac{v}{\phi} \quad (2.3)$$

Onde ϕ corresponde a porosidade efetiva.

Cada partícula do fluido tem sua própria trajetória e velocidade no domínio de fluxo, seja em relação às propriedades do sistema-fluido como um todo ou em relação as propriedades de espécies individuais em um fluido multicomponente, considerando válida as leis de conservação. Levando em consideração esses conceitos, têm-se a ocorrência do fenômeno de dispersão (BEAR, 1972).

A dispersão é o mecanismo responsável pelo espalhamento do poluente no meio poroso. O resultado deste espalhamento faz com que o contaminante ocupe um volume maior do que se ocorresse apenas advecção. Com isso o pico de concentração decresce, enquanto a frente de contaminação se move mais rápido (DEMUELENAERE, 2004). Este espalhamento envolve dois fenômenos, a dispersão mecânica e a difusão.

Em relação ao fenômeno de dispersão mecânica, este é responsável por causar espalhamento do poluente devido às variações de velocidade do fluido dentro do meio poroso (NOBRE, 1987). Já a difusão é um processo de transporte molecular de massa no qual o soluto move-se de regiões de maior concentração para regiões de menor concentração. O transporte no subsolo devido à difusão, pode ser descrito pela primeira Lei de Fick da difusão, dada pela Equação 2.4 (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT; 2003):

$$J_i = -D \frac{\partial C}{\partial X_i} \quad (2.4)$$

Onde: J_i é o fluxo difusivo de massa na direção i , D é o coeficiente de difusão e $\partial C/\partial X_i$ é o gradiente de concentração do poluente na direção i .

Os trabalhos de Moreira e Braga (2009) mostram que a pluma de contaminantes de derivados do petróleo, oriunda de indústrias químicas do município de Araras-SP, cujo solo caracteriza-se por ser silte-argiloso, não se limita apenas à região de ocorrência da contaminação (poço de injeção), comprometendo a qualidade do aquífero. Observou-se ainda que, em um período de quatro anos, foram detectadas alterações químicas em poços de abastecimento próximo a área de infiltração.

Acerbi (2010) estudou o fluxo de líquido contaminante proveniente de lagoas de tratamento de esgoto, através de duas vias, a numérica e a experimental. Este percebeu que o procedimento matemático adotado modelou com bastante precisão o movimento da água no solo, apresentando boa concordância entre os dados experimentais e os calculados. Foi observado também que, a longo prazo, toda a recarga de contaminação atingirá o lençol freático, contaminando a água que abastece os rios e córregos locais.

Nos estudos de Favero, Muniz e Santos (2007), foi desenvolvido um código computacional para resolver o modelo matemático de transporte de poluentes em meios porosos, baseado nas equações de conservação de massa, transferência de matéria e momento linear. Para validar o modelo e o código computacional, foram realizados estudos experimentais e numéricos, utilizando como poluente a gasolina. Foi verificado uma boa concordância entre os resultados obtidos, de modo que o código computacional foi capaz de prever a extensão da área afetada, assim como os níveis de concentração do poluente.

Santos (2015) estudou numericamente o comportamento da pluma de contaminante de cobre e cádmio proveniente de um vazamento em lagoa de tratamento de esgoto, através do emprego do software ANSYS CFX 12.1. Segundo o autor, foi possível observar numericamente que a pluma de contaminante de cobre e cádmio, a longo prazo, atingirá o lençol freático.

Wiesinieski (2009) estudou os resíduos de um conjunto de lagoas de decantação que recebem o chorume proveniente do aterro controlado de Botuquara, na Bahia, bem como o solo próximo a lagoa que o libera para o meio ambiente, com o intuito de avaliar o processo completo de retenção de metais pesados. Este estudo envolveu a realização de análises químicas (como matéria orgânica, argila, areia, silte, pH, etc.) e texturais dos resíduos. Além disso, foram determinadas diversas espécies metálicas no sedimento tais como cromo, prata, níquel, chumbo, zinco e cobre. A autora concluiu que, as lagoas de tratamento não estão sendo eficientes para a retenção total de metais presentes no percolado do aterro. Desta forma, o seu lançamento em corpos d'água pode interferir na qualidade destas águas e de todo o ecossistema.

2.2 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A quantidade de água existente no planeta Terra é considerada constante desde 500 milhões de anos, porém a maior parte dela que corresponde à 97,5% está contida nos mares e oceanos e, portanto, é imprópria para o consumo humano, devido ao alto teor de sais. Excluindo a água congelada dos polos, a água doce

representa apenas 0,6% do total. Destes, 98% estão contidas nos aquíferos (águas subterrâneas) e apenas 2% nos rios e lagos, na forma de água superficial, e dessa forma, de extração mais fácil (CETESB, 2013).

Entende-se por água subterrânea como sendo toda a água que ocorre abaixo da superfície da terra, preenchendo os poros ou vazios intergranulares das rochas sedimentares, ou as fraturas, falhas e fissuras das rochas compactas, e que sendo submetida a duas forças (de adesão e de gravidade) desempenha um papel essencial na manutenção da umidade do solo, do fluxo dos rios, lagos e brejos (BORGHETTI, N; BORGHETTI, J; ROSA FILHO, 2004).

Um aquífero é um reservatório subterrâneo de água, caracterizado por camadas ou formações geológicas suficientemente permeáveis, capazes de armazenar e transmitir água em quantidades que possam ser aproveitadas como fonte de abastecimento para diferentes usos (IRITANI; EZAKI, 2009).

Devido às baixas velocidades de infiltração e aos processos biológicos, físicos e químicos que ocorrem no solo e na zona não saturada, os aquíferos são naturalmente mais protegidos da poluição. Porém, ao contrário das águas superficiais, uma vez ocorrida a poluição, as baixas velocidades de fluxo tendem a promover uma recuperação muito lenta da qualidade destes mananciais subterrâneos. Dependendo do tipo de contaminante, essa recuperação pode levar anos, com custos muito elevados, não raro, proibitivos (MMA, 2007).

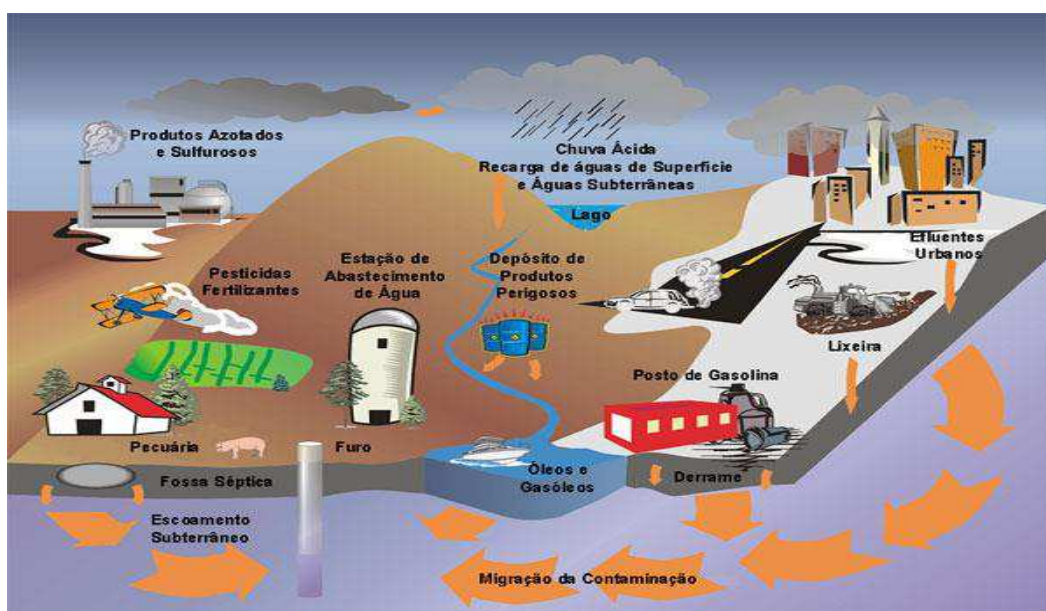
Do total de municípios brasileiros, 47% são abastecidos exclusivamente por mananciais superficiais, 39% por águas subterrâneas e 14% pelos dois tipos de mananciais (abastecimento misto) de acordo com a Agência Nacional das Águas (ANA, 2010).

2.3. CONTAMINAÇÃO DOS SOLOS E DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O aumento populacional aliado a intensa e crescente atividade humana vem provocando impactos negativos sobre o meio ambiente, facilmente perceptível sob a forma de inundações, efeito estufa, esgotamento dos recursos naturais e contaminação do solo e das águas subterrâneas (ABIKO; MORAES, 2009).

Estes impactos são resultados de uma série de atividades humanas, como o uso de agrotóxicos, geração de efluentes domésticos e industriais (encaminhados à lagoas de tratamento de esgoto), disposição inadequada de grandes quantidades de lixo, vazamentos em postos de gasolina, intensa atividade de indústrias químicas, têxteis, metalúrgicas e de mineração, que contribuem para geração de efluentes líquidos com quantidade elevada de compostos tóxicos e geração de gases, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Principais fontes de contaminação do solo e águas subterrâneas



Fonte: Disponível em http://www.Ineg.pt/CienciaParaTodos/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/texto. Acesso em 06 jun. 2017 às 23:30:00

Frente a estas fontes de contaminação apresentadas, têm-se a Resolução proposta pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA nº 420/2009, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades humanas.

2.3.1. Lagoa de Tratamento de Esgoto

Uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) pode ser definida como unidade ou estrutura projetada com o objetivo de tratar esgotos, no qual o homem, através dos processos físicos, químicos e/ou biológicos, simula ou intensifica as condições de autodepuração que ocorrem na natureza, mas dentro de uma área delimitada, onde supervisiona e exerce algum controle sobre o processo de depuração, antes de devolver o esgoto tratado ao um corpo receptor (LA ROVERE et al., 2002).

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2008), 45% dos municípios do Nordeste brasileiro apresentam serviço de esgotamento sanitário por rede coletora e destes, 58,4% ainda não apresentam um sistema de tratamento de esgoto sanitário e esse esgoto não-tratado tem como principal destino os rios, lagos e outros corpos receptores. No país, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2015 apud ABCON e SINDCON, 2017), somente 42,67% dos esgotos coletados são tratados antes de retornar para o meio ambiente.

A estratificação das etapas de tratamento de esgoto pode ser feita através de níveis de tratamento, de acordo com o grau de remoção de poluentes que se deseja atingir (OLIVEIRA, 2006). Tais níveis são: preliminar, primário, secundário e terciário e estão associados diretamente com o método de tratamento empregado e com os contaminantes possíveis de serem removidos. O tratamento terciário, por exemplo, objetiva a remoção de poluentes específicos como metais pesados.

2.3.1.1. Metais pesados

Os metais pesados ocorrem de forma natural nos solos e, conhecidamente, são depositados sobre estes, principalmente por processos de mineração, uso excessivo de fertilizantes bem como através de diversas atividades industriais, os quais, frequentemente provocam a contaminação do ambiente por uma mistura de

metais potencialmente tóxicos, comprometendo a qualidade do solo, das águas superficiais e subterrâneas (FADIGAS et al., 2002; RIBEIRO FILHO, et al., 1999).

Em termos de poluição ambiental, os metais podem ser classificados de acordo com três critérios: não-crítico; tóxico e muito tóxico, conforme demonstrado no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação de alguns elementos químicos de acordo com sua toxicidade para a fauna e flora

Toxicidade	Elementos Químicos
Não-crítico	Na, K, Mg, Ca, H, O, C, P, Fe, S, Cl, Br, F, Li, Rb, Sr, Si
Tóxico	Ti, Hf, Zr, W, Nb, Ta, Re, Ga, La, Os, Rh, Ir, Ru, Ba, Al
Muito tóxico	Be, Co, Ni, Zn, Cu, Sn, As, Se, Te, Pd, Ag, Cd, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi

Fonte: FÖRSTNER e WITTMAN (1983); STEFFAN et al., (2017).

Os elementos químicos Zn, Cu, Hg e Cd são considerados os causadores de maior impacto ambiental, especialmente por estarem relacionados a problemas de saúde pública, com possibilidade de promoverem mutações genéticas (STEFFAN et al., 2017).

Os metais são cátions que, em sua maioria, apresentam mobilidade razoavelmente limitada no solo e na água subterrânea por causa da troca catiônica e da sorção na superfície dos grãos minerais (FETTER, 1993). As interações que podem ocorrer entre os metais pesados e o solo são inúmeras, a depender das características físicas e químicas de ambos. Na Figura 3 está sendo apresentado os principais tipos de interações.

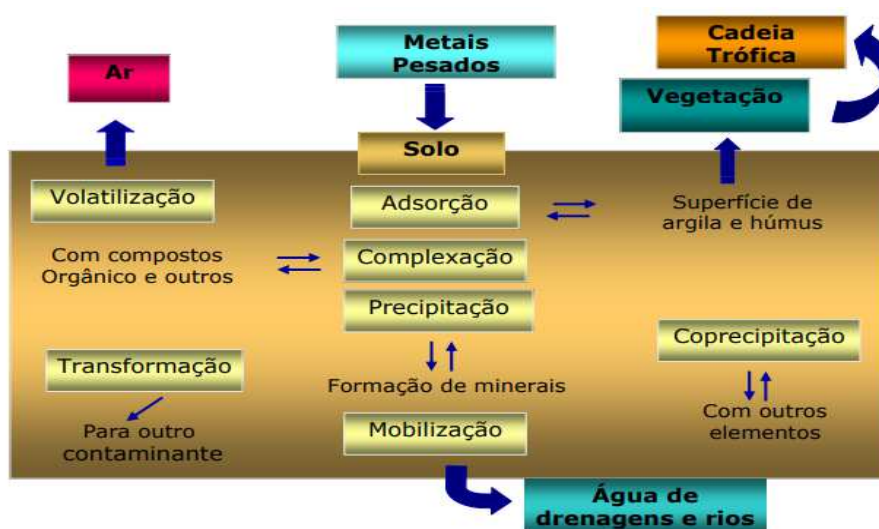
2.3.1.1.1. Cobre

Metal de transição, o cobre (Cu) é um elemento amplamente encontrado na natureza. Em pequenas quantidades, constitui-se como um elemento essencial aos

organismos vivos, em especial para as plantas no seu processo de crescimento e desenvolvimento. Fatores como matéria orgânica, textura do solo, pH e balanço de nutrientes influenciam a sua disponibilidade no solo (YRUELA, 2005).

As principais fontes antropogênicas deste metal são através de atividades de mineração, fundição e queima de carvão como fonte de energia e incineração de resíduos. Além disso, alimentos, bebidas e água potável também constitui como fonte de exposição de cobre a população em geral. A ingestão excessiva resulta na sua acumulação no fígado, com probabilidade de danos ao sistema digestório e circulatório (sangue) (KLAASSEN; WATKINS III, 2012).

Figura 3 - Dinâmica dos metais pesados no solo



Fonte: *Adaptado* de Garcia e Dorronsoro (2006).

Segundo a Resolução CONAMA nº 430/2011, nos efluentes a concentração máxima de cobre dissolvido permitida é de 1 mg/L. No solo, conforme Resolução nº 420/2009, do mesmo conselho, o valor de prevenção é 60 mg por kg de solo. Já de acordo com a Portaria 2.914/2011 do Ministério da saúde (MS), a concentração máxima permitida em água potável é de 2 mg/L de Cu.

2.4. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Historicamente, a Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) teve início na década de 70 (TU; YEOH; LIU, 2008). Esta ferramenta computacional trata da simulação numérica de escoamentos de fluidos, transferência de calor e matéria, para fenômenos relacionados como reações químicas, combustão, aerocústica, secagem, entre outros. As equações que regem o escoamento de fluidos teve origem na mecânica dos fluidos e podem ser resolvidas por meio de diferentes métodos numéricos tais como volumes finitos, diferenças finitas, elementos finitos, dentre outros (KESSLER, 2016).

Uma maneira de ter acesso a esse tipo de programa é usando dos pacotes comerciais que incluem sofisticadas interfaces que permitem ao usuário a implementação do problema, bem como examinar os resultados. Estes pacotes são geralmente divididos em três elementos principais, sendo eles: Pré-processador, processador e pós-processador.

No pré-processador, para se aplicar a fluidodinâmica computacional, é necessário dividir a geometria de interesse (criada a partir de coordenadas no espaço, próximas da geometria real do objeto de estudo) em um número de células computacionais denominadas de malha ou elementos de volume de controle. Esta tarefa, conhecida por discretização, é geralmente realizada empregando programas computacionais que utilizam o CAD (*Computer Aided Design*) (FARIAS, 2006).

No *processador*, é preciso considerar que os fenômenos associados ao escoamento do fluido real são, geralmente, governados por equações complexas e não-lineares, resolvidos por meio de soluções iterativas. Estas soluções envolvem todos os valores discretos das propriedades de fluxo como velocidade, pressão, temperatura e outros parâmetros de interesse.

No *pós-processador*, é possível visualizar os resultados destas equações através de gráficos X-Y (para duas dimensões), campos de pressão, velocidade e animações, que contribui para um melhor entendimento do problema em estudo.

Dentre os pacotes comerciais disponibilizados nos limitaremos a listar alguns deles com seus respectivos métodos numéricos de discretização: (a) Diferenças

finitas – FLOW-3D; (b) Elementos finitos – FIDAP, ANSYS, FEMFLOW, PAM-FLUID;
(c) Volumes finitos – FLUENT, CFX, PHOENICS.

3 MATERIAL E MÉTODOS

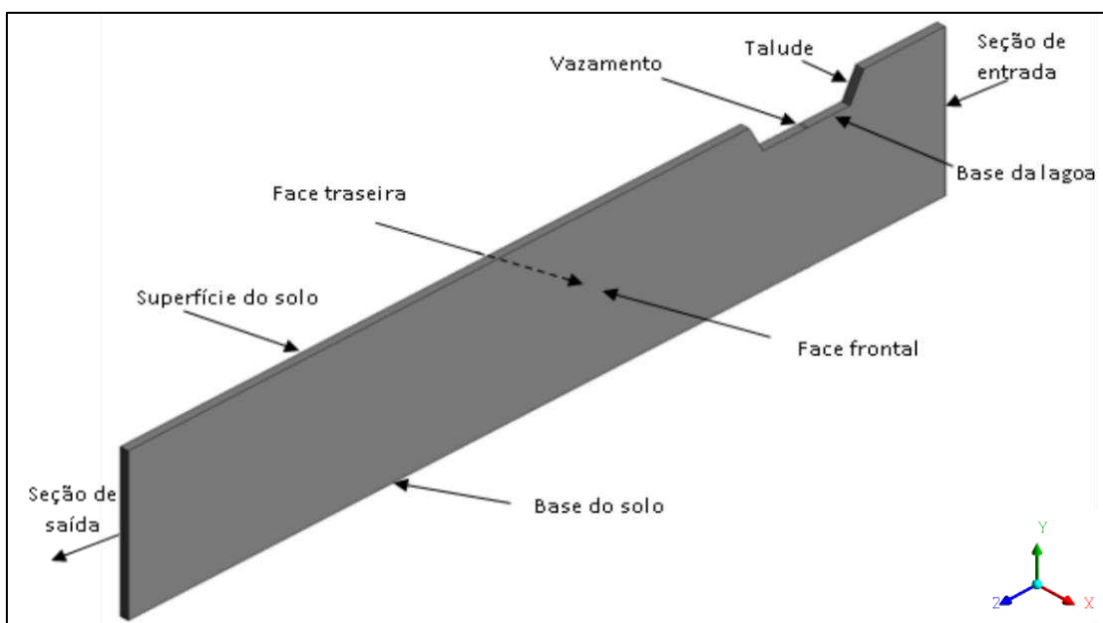
Este trabalho foi desenvolvido em parceria com o Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem (LPFI), da Unidade Acadêmica de Engenharia Química, da UFCG, que dispõe dos pacotes comerciais ANSYS CFX® 15.0 e Icem-CFD® 15.0, onde foram realizadas as simulações dos diferentes casos estudados para atingir os objetivos especificados.

3.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O domínio de estudo referente a lagoa de tratamento de esgoto foi baseado no trabalho de Santos (2015), com dimensões de 200m x 20m, conforme a Figura 4.

O contaminante estudado foi o cobre, por ser um poluente associado a graves problemas ambientais (perda da biodiversidade e contaminação dos aquíferos) e de saúde pública (em excesso, pode estar relacionado a danos celulares).

Figura 4 - Geometria final do domínio computacional estudado

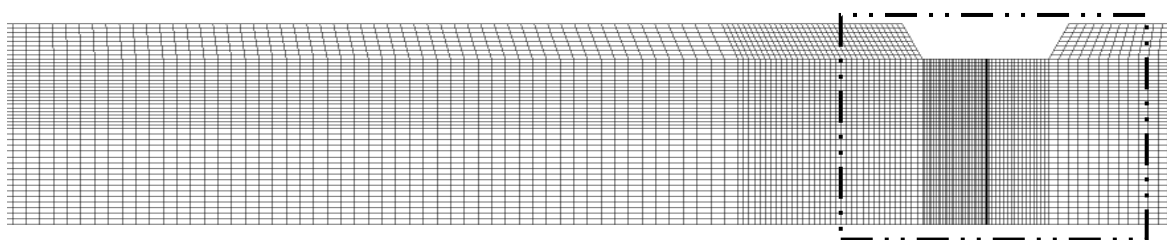


Fonte: Autor (2017).

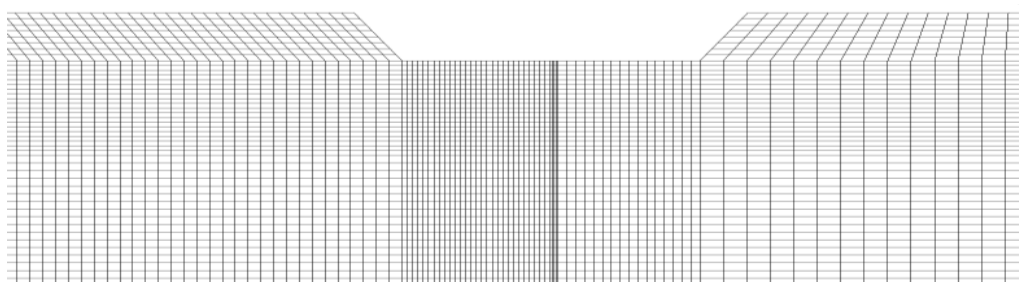
3.1.1. Malha Computacional

Para geração da malha do domínio de estudo (Figura 5), foi utilizado o ICEM-CFD 15.0[®]. A forma geométrica foi criada com auxílio de pontos, curvas e superfícies considerando um domínio bidimensional. A geração da malha foi realizada usando o conceito ou estratégia de blocagem que possibilita um melhor controle de refinamento da malha. Após sua obtenção, foram feitos alguns refinamentos visando a não-dependência dos resultados numéricos com a malha a ser usada. A malha final resultante deste procedimento, Figura 5 (a), é formada por 25.464 elementos hexaédricos e 32.850 nós. Na Figura 5(b), observa-se o detalhe da malha refinada próxima ao talude e vazamento.

Figura 5 - Malha numérica de simulação: (a) visão geral e (b) detalhe da região da lagoa de tratamento de esgoto



(a)



(b)



Fonte: Autor (2017).

3.2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para estudar o comportamento da pluma de contaminantes em solo saturado, adotou-se o modelo de escoamento monofásico e multicomponente, baseado nas equações de conservação de massa, momento linear e de transferência de massa. Foram adotadas as seguintes considerações:

- Escoamento em regime laminar e transiente;
- Fluido incompressível (água) com propriedades físico-químicas constantes;
- O meio poroso (solo) foi considerado isotrópico (porosidade e permeabilidade constantes);
- Não há reação química.

Com base nas considerações feitas, as equações de conservação podem ser escritas como sendo:

- Equação de conservação de massa

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho \gamma) + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{K} \cdot \vec{V}) = 0 \quad (3.1)$$

- Equação de momento linear

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \cdot (\mathbf{K} \cdot \vec{V}) \otimes \vec{V} - \nabla \cdot (\mu_e \cdot \mathbf{K} (\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \vec{V}))) = \Phi S_M - \Phi \nabla P \quad (3.2)$$

Onde: ϕ é a porosidade, \vec{V} é o vetor velocidade, ρ é a densidade, \mathbf{K} é o tensor permeabilidade, μ_e é a viscosidade efetiva, S_M é uma fonte de momento (representa uma resistência ao escoamento no meio poroso) e P é a pressão.

- Equação da transferência de massa

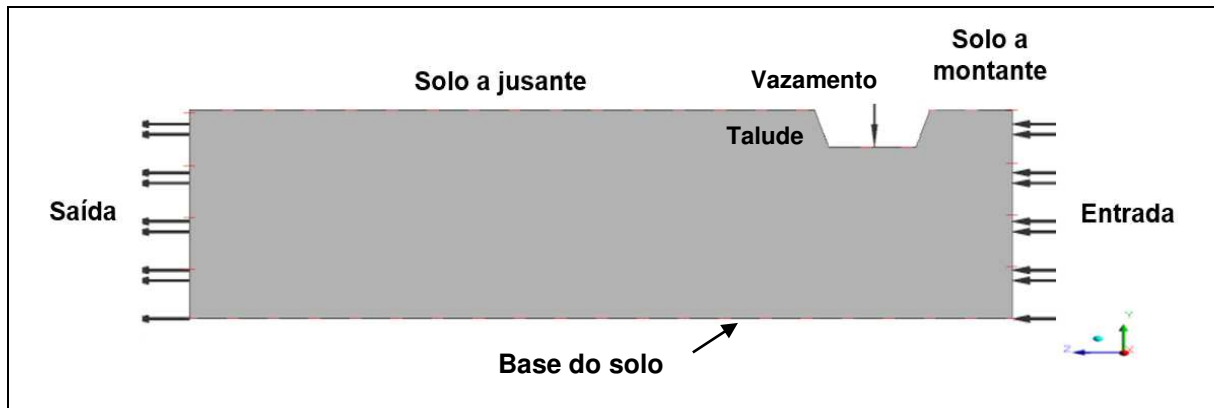
$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho \mathbf{Y}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{K} \cdot u \mathbf{Y}) = \nabla \cdot (D_{AB} \mathbf{K} \cdot \nabla \mathbf{Y}) \quad (3.3)$$

Onde Y é a fração mássica dos componentes, D_{AB} é a difusividade da espécie A no solvente B.

3.2.1. Condições Iniciais e de Contorno

As condições de contorno, apresentadas na Figura 6, são aplicadas sobre as fronteiras do domínio meio poroso.

Figura 6 – Condições de contorno



Fonte: Autor (2017).

O domínio de estudo (meio poroso) foi inicialmente considerado saturado com água, ou seja, fração mássica de água (f_w) é igual a 1.

Adotou-se as seguintes condições de contorno:

Na seção de entrada

$$w = u_z \quad (\text{Quadro 2})$$

$$f_w = 1 \quad ; \quad f_{Cu} = 0$$

Na saída

$$\frac{\partial u}{\partial x_i} = \frac{\partial v}{\partial x_i} = 0 \quad i = x, y$$

Velocidade do vazamento	$v = u_y$ (Quadro 2) $f_w = 0$; $f_{Cu} = 1$
Na base da lagoa e taludes; Superfície e base do solo (meio poroso)	Condição de não-deslizamento $v = w = 0$
Faces frontal e traseira*	Condição de simetria $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$

Onde u, v e w correspondem, respectivamente, aos componentes de velocidade nas direções x, y e z.

As propriedades físico-químicas da água e do cobre estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

A densidade da água ($\rho_{\text{água}}$) e do cobre (ρ_{Cu}) foram baseados nos valores informados por Baccan et al. (2003). O coeficiente de difusão do cobre (D_{Cu}) foi retirado dos estudos de Santos (2015).

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas da água 25°C e 1 atm

Densidade, ρ (kg/m ³)	997,0
Viscosidade dinâmica, μ (cP)	0,891

Fonte: Autor (2017).

Tabela 2 - Propriedades físico-químicas do cobre 25°C e 1 atm

Densidade (kg/m ³)	8933
Coeficiente de difusão (cm ² /s)	$5,21 \times 10^{-5}$

Fonte: Autor (2017).

A porosidade do meio poroso foi adotada constante e igual a 0,3 e as permeabilidades (K) são apresentadas na Tabela 3.

No Quadro 2 são apresentados os casos avaliados, onde foram alterados os valores dos componentes de velocidade na direção y e z (u_y e u_z) e a permeabilidade, K, do meio poroso (solo).

Quadro 2 – Casos estudados

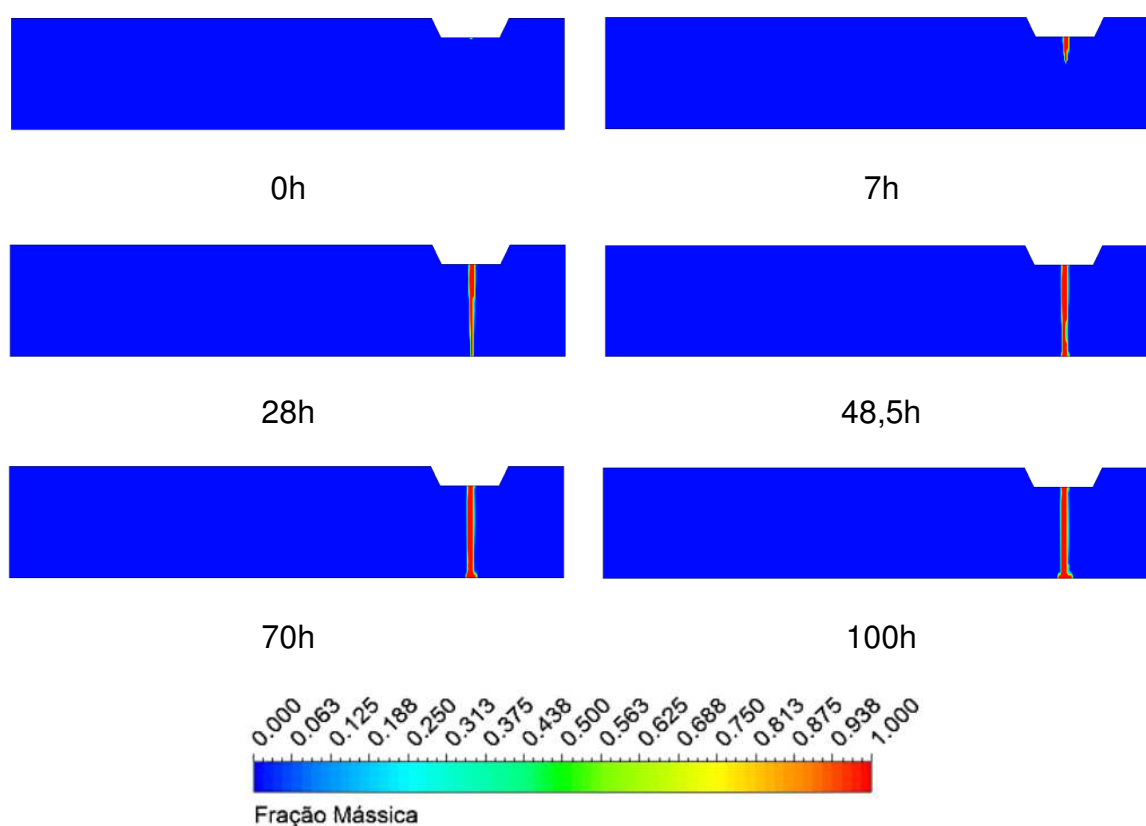
Casos	u_y (cm/s)	u_z (cm/s)	K (m ²)
1	5×10^{-5}	1	10^{-10}
2	$2,5 \times 10^{-4}$	1	10^{-10}
3	1×10^{-4}	0	10^{-10}
4	1×10^{-4}	2	10^{-10}
5	1×10^{-4}	4	10^{-10}
6	1×10^{-4}	1	10^{-10}
7	1×10^{-4}	1	10^{-11}
8	1×10^{-4}	1	10^{-12}

Fonte: Autor (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 7 está representado a evolução da distribuição de fração mássica de contaminante (cobre) a partir do vazamento na lagoa de tratamento de esgoto sobre o plano longitudinal YZ, em diferentes tempos (0; 7; 28; 48,5; 70 e 100 h). Os resultados ilustrados correspondem ao caso 3, onde a velocidade de escoamento no meio poroso é considerada nula, ou seja, a água no solo encontra-se estagnada. Observa-se que a pluma de contaminante evolui verticalmente até atingir a base do solo (rocha selante ou impermeável) em aproximadamente 28 horas, em consequência da ação da força da gravidade e a resistência oferecida pelo meio poroso.

Figura 7 – Dispersão do contaminante (Cu) em função do tempo (caso 3)



Fonte: Autor (2017).

4.1 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ENTRADA DE ÁGUA

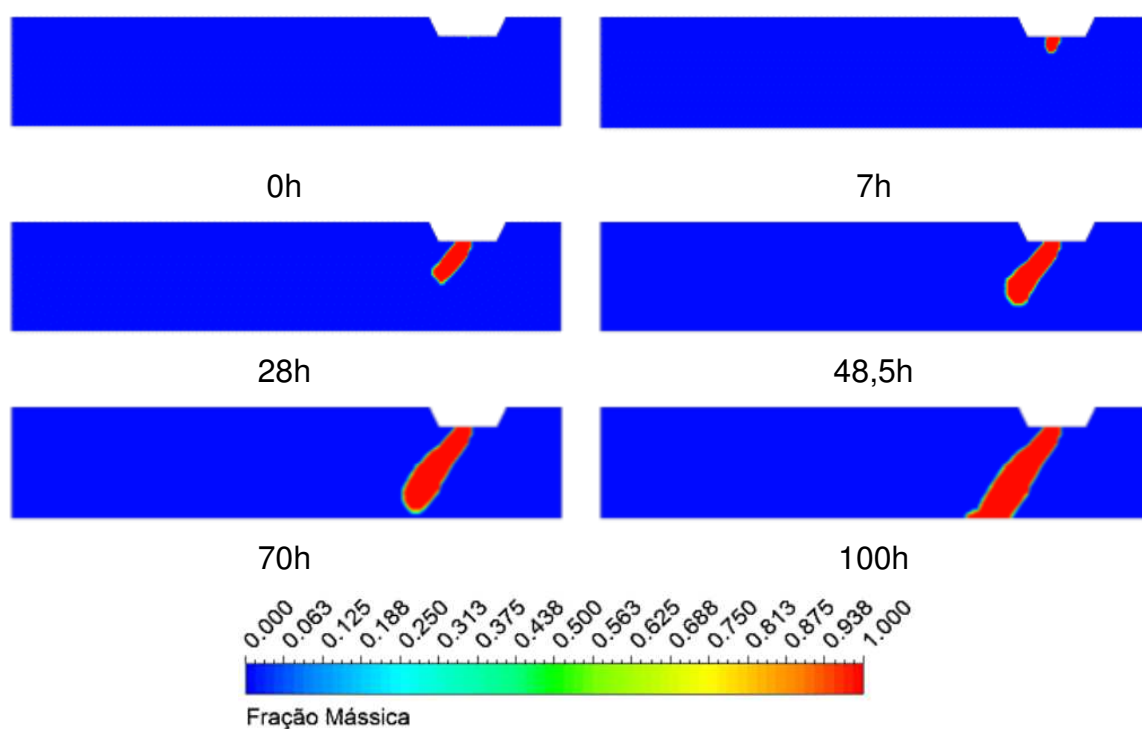
Com o intuito de avaliar o efeito da corrente de água (horizontalmente) a partir da seção de entrada (Figura 4) sobre o comportamento da pluma de contaminantes, a seguir são apresentados os resultados para diferentes casos simulados, variando a velocidade de água no meio poroso.

Nas Figuras 8 a 10 estão ilustradas a evolução das distribuições de frações mássicas do contaminante (cobre), sobre o plano longitudinal YZ, em diferentes tempos, considerando as velocidades de entrada da água iguais 1, 2 e 4 cm/s referente aos casos 6, 4 e 5, respectivamente. É possível verificar claramente a influência da velocidade de entrada de água sobre o comportamento da pluma. A medida que se aumenta esta velocidade proporciona o deslocamento da pluma horizontalmente (na direção z), comportamento observado na Figura 11 que ilustra o campo vetorial de velocidade superficial da água indicando a direção da mesma. Este fato faz com que a pluma atinja distâncias maiores no solo, mas por outro lado demora a atingir a base do solo.

Observa-se que na Figura 9, onde a velocidade de entrada de água é igual a 2 cm/s, que a pluma de contaminante evolui da direita para a esquerda, do domínio até se aproximar da base do solo. Verifica-se que ao contrário do que foi observado na Figura 8, a pluma não toca a rocha selante no tempo de 100 h.

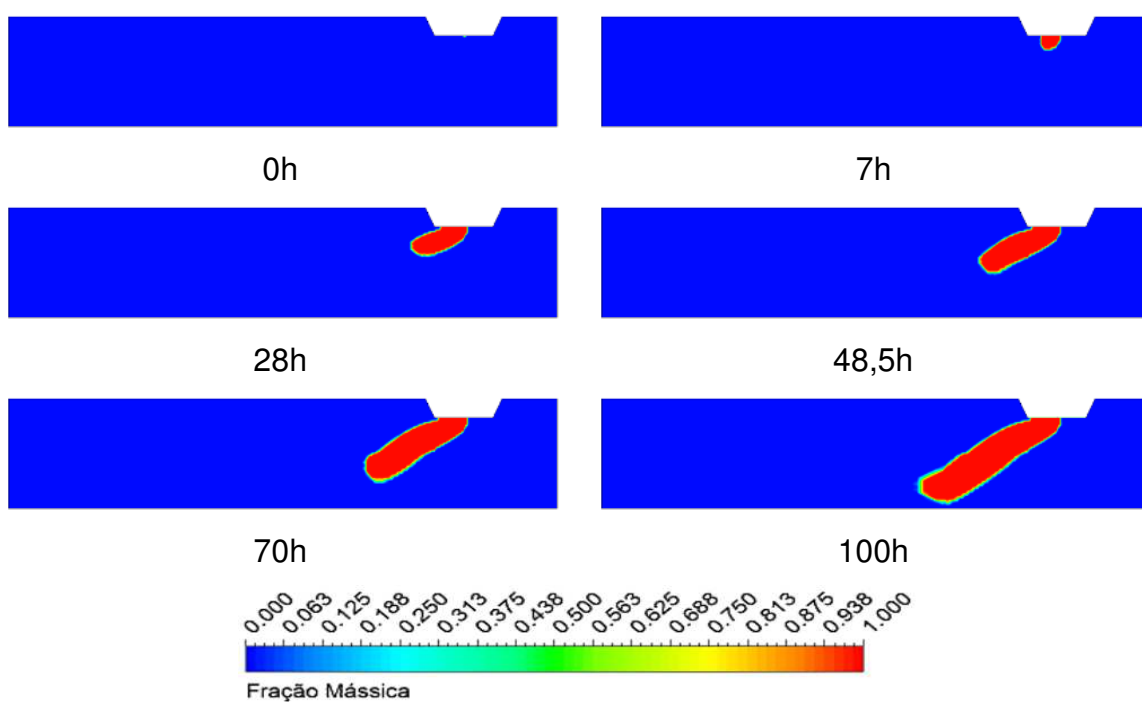
Para o caso em que a velocidade de entrada é igual a 4 cm/s (Figura 10), observa-se que a pluma de contaminante é arrastada com mais intensidade, fazendo com que a pluma nas mesmas 100 h nem se aproxime da rocha selante (base do solo). Este fato é explicado pela força que o escoamento de água exerce sobre a pluma deslocando-a na direção horizontal (z).

Figura 7 - Dispersão da pluma cobre (Cu) em função do tempo (Caso 6)



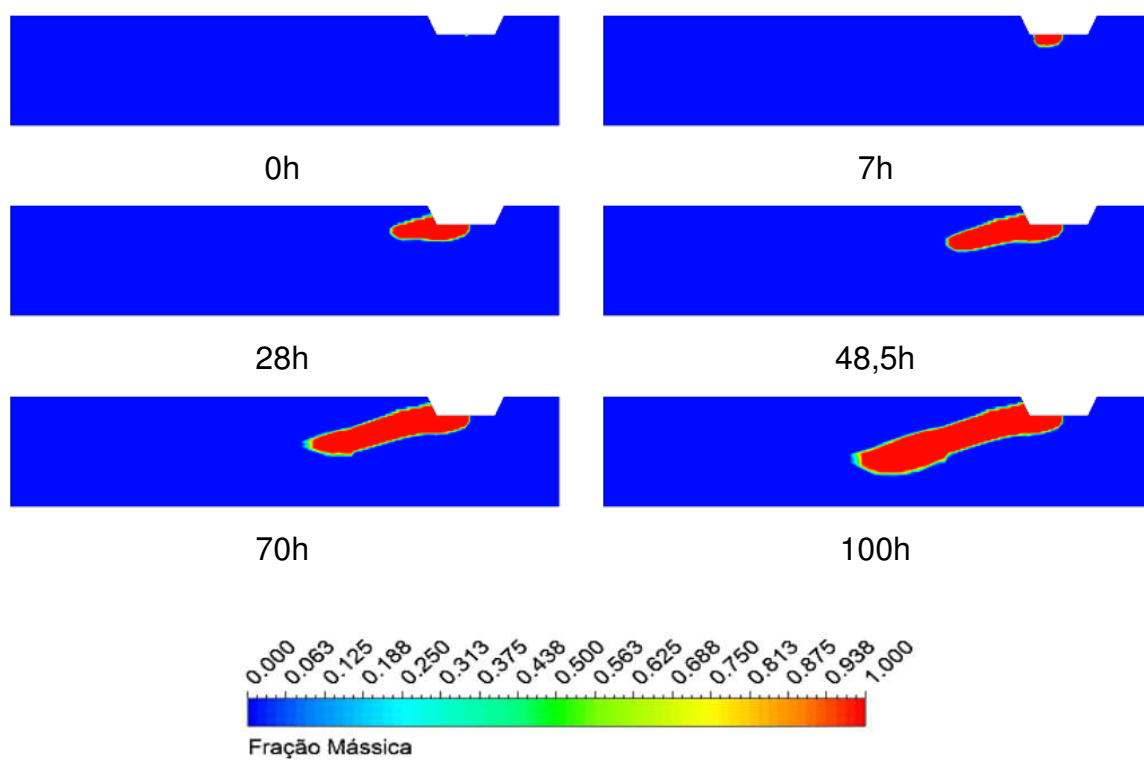
Fonte: Autor (2017).

Figura 8 - Dispersão da pluma cobre (Cu) em função do tempo (Caso 4)



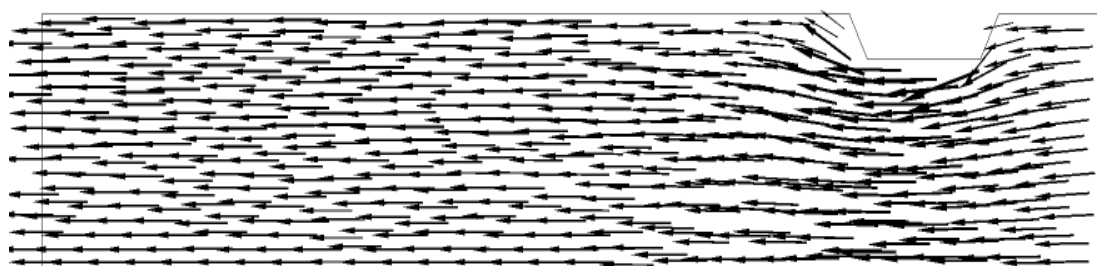
Fonte: Autor (2017)

Figura 9 - Dispersão da pluma cobre (Cu) em função do tempo (Caso 5)



Fonte: Autor (2017).

Figura 10 - Campo vetorial da corrente de água no solo.



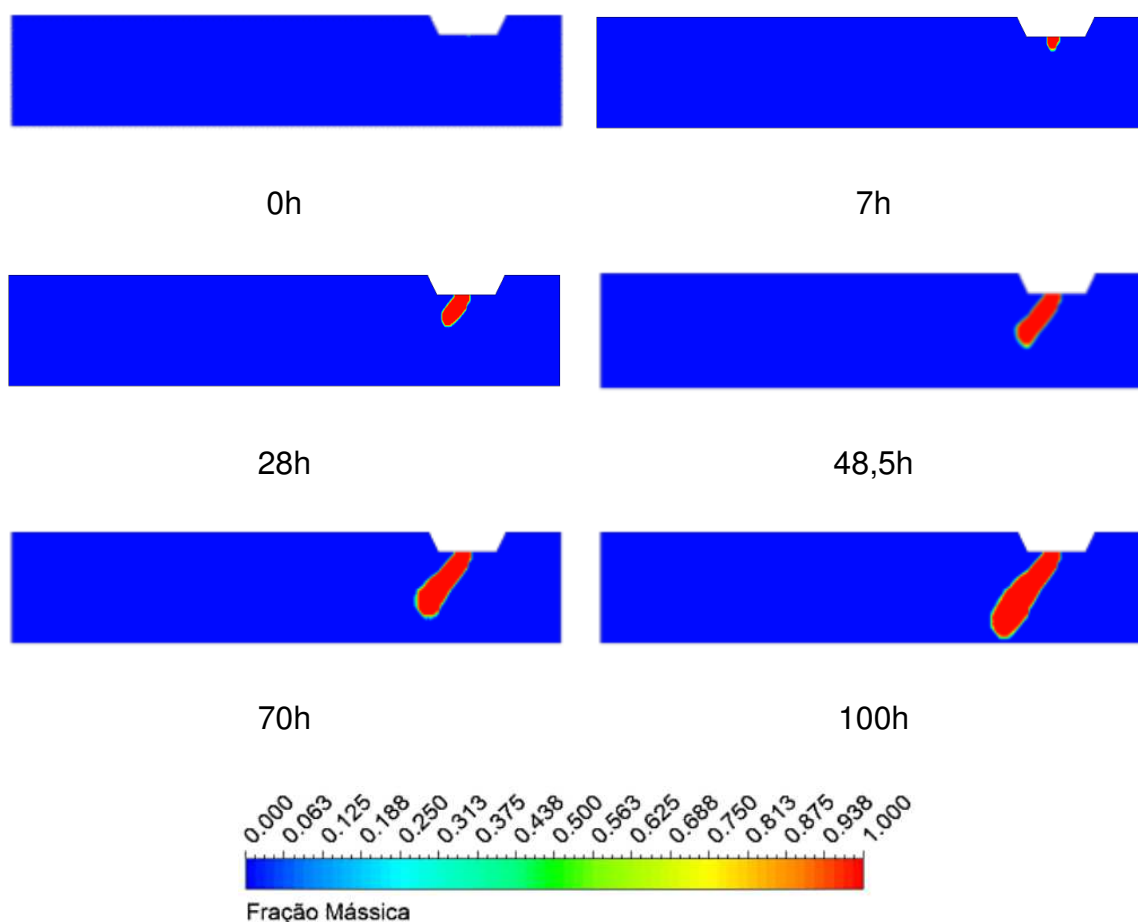
Fonte: Autor (2017).

4.2 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE VAZAMENTO

As Figuras 12 e 13 ilustram as distribuições de frações mássicas do contaminante (cobre) em função do tempo sobre o plano longitudinal YZ, para os casos de velocidade de vazamento 5×10^{-5} e $2,5 \times 10^{-4}$ cm/s, respectivamente.

Ao se observar a Figura 12, percebe-se que a frente de avanço no tempo se aproxima da base do meio poroso em 100 horas (condição de tempo final adotada para todos os casos estudados).

Figura 11 - Dispersão do contaminante cobre (Cu) em função do tempo (Caso 1)

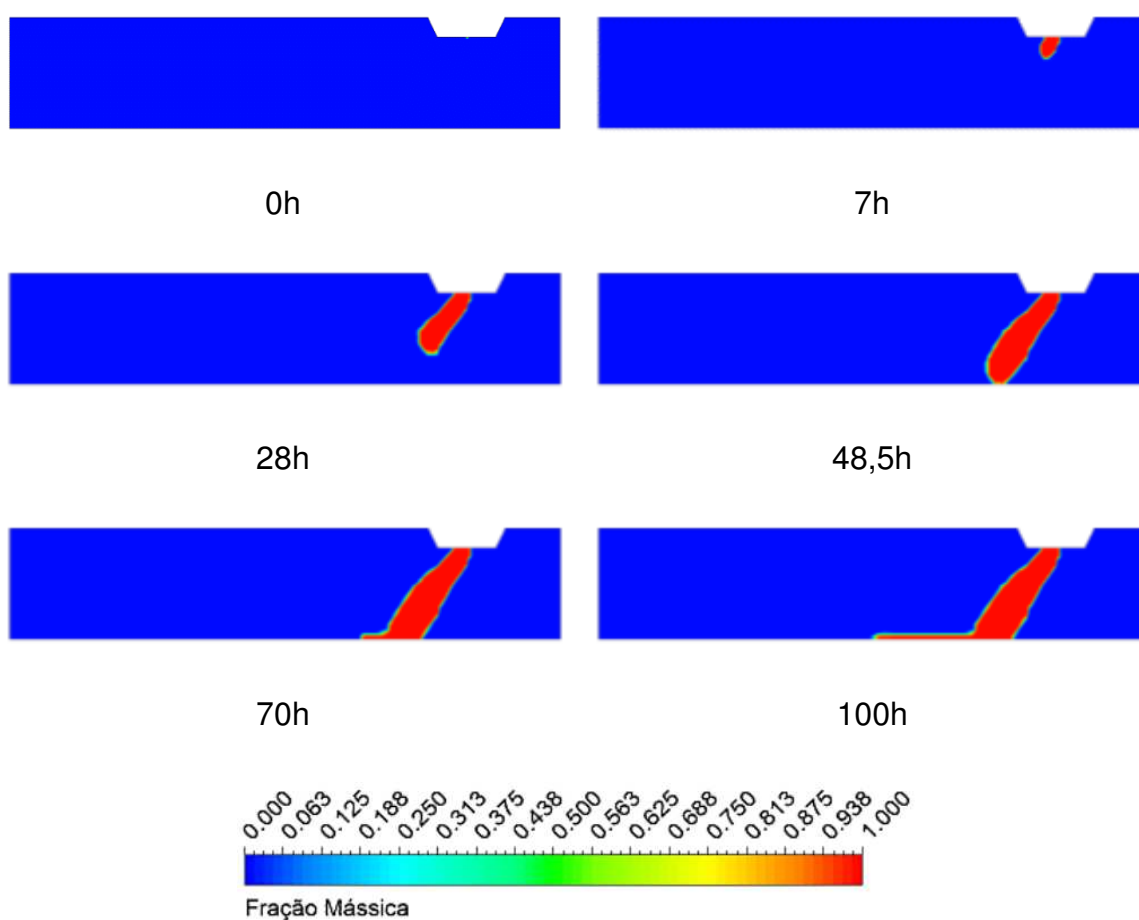


Fonte: Autor (2017).

No entanto, para o valor de velocidade de vazamento do contaminante de $2,5 \times 10^{-4}$ cm/s (Figura 13) a partir da seção de vazamento, nota-se claramente que a

pluma atinge a base do solo praticamente na metade do tempo do caso anterior (Figura 12). Este fato pode ser explicado pela maior quantidade de contaminante que deixa a lagoa pelo ponto de vazamento e, conseqüentemente, maior pressão o que impulsiona a pluma no meio poroso em direção a base do solo.

Figura 12 - Dispersão do contaminante cobre (Cu) em função do tempo (Caso 2).



Fonte: Autor (2017).

4.3 INFLUÊNCIA DA PERMEABILIDADE DO SOLO

Na Figura 14 está representado o comportamento da pluma de contaminante (Cobre) no tempo final considerado (100 h) sobre o plano longitudinal YZ, para três permeabilidades 1×10^{-10} , 1×10^{-11} e 1×10^{-12} m², Figuras 14 (a), 14 (b) e 14 (c),

respectivamente. Nota-se que o comportamento da pluma de contaminante é fortemente influenciada pela redução da permeabilidade. A pluma tende a se difundir no solo a jusante da lagoa de tratamento de esgoto, próximo a superfície (Figuras 14 (b) e (c)). Esta tendência é explicada pela alta resistência que o solo oferece, nas condições avaliadas.

Figura 13 - Dispersão do contaminante cobre (Cu) em 100h para diferentes permeabilidades. (a) Caso 6; (b) Caso 7; (c) Caso 8



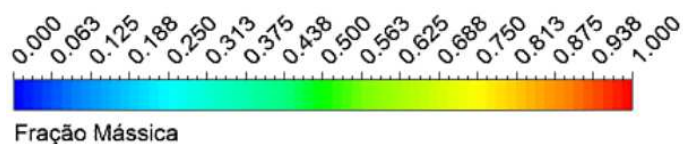
(a)



(b)



(c)



Fonte: Autor (2017).

Em termos comparativos, por exemplo, uma permeabilidade na ordem de 10^{-12} corresponderia a uma rocha selante, a exemplo do granito, e para ordem de 10^{10} m^2 seria rochas calcárias. Neste último caso, a resistência oferecida é 100 vezes menor o que facilita o escoamento da água e do contaminante no solo. Nota-se que a dispersão mecânica é dominante e para permeabilidades de ordem de 10^{-12} m^2 o fenômeno de difusão domina, ou seja, o mecanismo de espalhamento do poluente ou contaminante é praticamente por difusão.

5 CONCLUSÃO

Mediante os resultados obtidos, pôde-se concluir que:

- A modelagem matemática foi capaz de prever numericamente o avanço da pluma de contaminante para o vazamento de cobre em uma lagoa de tratamento de esgoto;
- O alcance da pluma de contaminante depende, consideravelmente, da velocidade de vazamento, da velocidade de entrada lateral de água no solo ou meio poroso;
- O deslocamento da pluma de contaminante (Cobre) mostrou-se ser fortemente dependente da resistência oferecida do tipo de solo definido nas simulações, por meio da propriedade, permeabilidade, do meio poroso;
- Os resultados das simulações indicam que para permeabilidades da ordem de 10^{-12} o transporte do contaminante é dominado pelo fenômeno de difusão. E para permeabilidades na ordem de 10^{-10} o fenômeno de dispersão por convecção mostrou-se ser dominante;
- O tempo que a pluma de contaminantes (Cobre) atinge uma profundidade de 20 m mostrou-se dependente da velocidade da mistura através do orifício de vazamento na lagoa de tratamento de esgoto.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar novas simulações variando-se os valores de concentração de cobre no ponto de vazamento;
- Estudar o comportamento de outros contaminantes;
- Considerar a ocorrência de reação química entre o contaminante e o solo;
- Realizar a simulação em uma geometria tridimensional.

REFERÊNCIAS

ABIKO, A; MORAES, O. B. de. **Desenvolvimento Urbano Sustentável**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009. 29 p. (Série Texto Técnico, TT/PCC/26). Disponível em: <<http://www.pcc.usp.br/files/files/alex/TT26DesUrbSustentavel.pdf>>. Acesso em: 21 jul. 2017, 16:58:00.

ACERBI, J. M. C. Simulação Numérica Bidimensional do Fluxo da Franja de Contaminação do Solo em Lagoas de Tratamento de Esgoto. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2010, Campina Grande. **Anais...**Campina Grande: Editora da UFCG, 2010.

Agência Nacional Das Águas- ANA. Atlas Brasil: Abastecimento Urbano de Água: Resultados por estado. Brasília: DF, 2 v., 2010.92p. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/downloads/atlas/Resumo%20Executivo/Atlas%20Brasil%20-%20Volume%202%20-%20Resultados%20por%20Estado.pdf>>. Acesso em: 21 jul. 2017.

Associação Brasileira das Concessionárias Privadas de Serviços Públicos de Água e Esgoto (ABCON); Sindicato Nacional das Concessionárias Privadas de Serviços Públicos de Água e Esgoto (SINDCON). **Panorama da Participação Privada no Saneamento** – Brasil 2017. 100 p. Disponível em: <<http://abconsindcon.com.br/publicacoes/panorama-da-participacao-privada-no-saneamento/#>>. Acesso em: 21 jun. 2017, 23:11:45.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6502: Rochas e solos – Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995, 18p.

BACCAN, N; ANDRADE, J. C. de; GODINHO, O. E. S; BARONE, J. S. **Química analítica quantitativa elementar**. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2003. 292 p.

BEAR, J. **Dynamics of Fluids in Porous Media**. Nova York: Elsevier, 1972. 764p.

BIRD, R. B; STEWART, W. E; LIGHTFOOT, E. N. **Transport phenomena**. 2 ed. Nova York: John Wiley and Sons, Inc, 2003.

BORGHETTI, N. R. B; BORGHETTI, J. R; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani: A integração dos países do Mercosul**. Curitiba: Gia, 2004. 214p.

BRADY, N. C; WEIL, R. R. Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos. 3 ed. [s.l]: Bookman, 2012. 716p.

BRASIL. Ministério da Saúde (MS) – Portaria 2.914 de 12 de dezembro de 2011, Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: < http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html>. Acesso em: 17 ag. 2017, 23:00:00.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Solo: Propriedades. Informações básicas, *online*, 2013. Disponível em: <<http://solo.cetesb.sp.gov.br/solo/informacoes-basicas/informacoes-basicas-solo/propriedades/>>. Acesso em: 16 jun. 2017, 23:16:00.

Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. **Lex:** Disponível em < <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res09/res42009.pdf> >. Acesso: 07 jun. 2017, 00:20:00.

Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições de lançamentos de efluentes, complementa e altera a resolução de nº 357 de 17 de março de 2015. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 21 jun. 2017, 23:28:30.

DEMUELENAERE, R. G. de. A. **Caracterização de Propriedades de Transporte de Metais Pesados em Solos Residuais do Rio de Janeiro**. 2004. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Técnico Científico da PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: < www.civ.puc-rio.br/wp-content/view/down_pdf.php?pdf=../pdf/200.pdf>. Acesso: 21 jul. 2017, 19:07:00.

ELHAKIM, A. F. Estimation of soil permeability. **Alexandria Engineering Journal**, v.55, n.3, 2631-2638p, 2016.

FADIGAS, F. de S; AMARAL SOBRINHO, M. N. B. do; MAZUR, N; ANJOS, L. H. C. dos.; FREIXO, A. A. Solos e Irrigação: Concentrações Naturais de Metais Pesados em Algumas Classes de Solos Brasileiros. **Bragantia**, v.61, n.2, 151-159p, 2002. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/brag/v61n2/18475.pdf>>. Acesso em: 21 jul. 2017.

FARIAS, F. P. M. **Estudo Teórico da Termofluidodinâmica em Secadores Ciclônicos**. 2006. 150f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Centro de Ciência e Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

FAVERO, J. L; MUNIZ, A. R; SANTOS, R. P. B. dos. Análise teórico-experimental da dispersão de poluentes líquidos em solos. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 12, n.4, out. 2007.

FETTER, C. W. **Contaminant Hydrogeology**. 2 ed. New York: Macmillan Publishing Company, U. S. 1993. 458p.

FÖRSTNER, U.; WITTMANN, G.T.W. Metal Pollution in the Aquatic Environment. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 486p.

GARCIA, I; DORRONSORO, C. Contaminacion del Suelo. **Contaminacion por Metales Pesados**. 2006. Disponível em: < <http://www.edafologia.net/> >. Acesso em: 22 jun. 2017, 01:43:00.

HAANDEL, A. C. V; MARAIS, G. **O comportamento do sistema de lodo ativado: Teoria e aplicações para projetos e operação**. Campina Grande: Epgraf, 1999. 472p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**, 2008. Disponível em: < http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/defaultt abzip_esgot_san.shtm>. Acesso em: 21 jun. 2017, 22:27:00.

Investigação para a Sustentabilidade – LNEG. Água Subterrânea: Conhecer para Proteger e Preservar. 1 Fotografia, color. Disponível em < http://www.lneg.pt/CienciaParaTodos/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/texto>. Acesso: 06 jun. 2017, 23:30:00.

IRITANI, M. A; EZAKI, S. **As Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo**. 2.ed. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA, 2009, 104 p. Disponível em < http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/cart_AG_SB.pdf >. Acesso em: 21 jul. 2017, 20:46:00.

KESSLER, M. **Fluidodinâmica Computacional: O que é? ESSS**, 2016. Disponível em: <<http://www.esss.com.br/blog/2016/06/fluidodinamica-computacional-o-que-e/>>. Acesso em: 25 jun. 2017, 11:54:40.

KLAASSEN, C. D; WATKINS III, J. B. **Fundamentos em Toxicologia de Casarett e Doull**. 2. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 472p.

KULKAMP, M.S.; CORSEUIL, H. X.; Jr. AMORIM, C.J. Influência do etanol na biodegradação de hidrocarbonetos de petróleo em um aquífero contaminado com uma mistura de diesel etanol. In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2002. p. 1-11.

LA ROVERE, E. L; D'AVIGNON, A; PIERRE, C. V; KLIGERMAN, D. C; SILVA, H. V. de. O; BARATA, M. M. de. L; MALHEIROS, T. M. M. **Manual de Auditoria Ambiental para Estações de Tratamento de Esgotos Domésticos**. Rio de Janeiro, Qualitymark. 2002.151p.

Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). [2001]. **fig3.jpg**. Altura: 360 pixels. Largura: 600 pixels. 96 dpi. 33Kb. Formato JPEG. Disponível em: < <http://www.lneg.pt/download/3056/fig3.jpg> >. Acesso em: 16 jun. 2017, 22:01:45.

LIMA, V. C; LIMA, M. R. de; MELO, V. de. F. **O solo no Meio Ambiente: Abordagem Para Professores do Ensino Fundamental e Médio e Alunos do Ensino Médio**. 1 ed. Curitiba: Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Paraná, 2007. 130 p. Disponível em: < <http://www.escola.agrarias.ufpr.br/arquivospdf/livro.pdf> >. Acesso em: 16 jun. 2017, 20:44:30.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Águas Subterrâneas: Um recurso a ser conhecido e protegido**. Brasília, 2007. 40p.

MOREIRA, C. A; BRAGA, A. C. de. O. Aplicação de Métodos Geofísicos no Monitoramento de Área Contaminada Sob Atenuação Natural. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 14, n. 2, abr. 2009.

NOBRE, M.M.M. **Estudo Experimental do Transporte de Poluentes em Solos Argilosos Compactados**. 1987. 214f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1987.

OLIVEIRA, A. S. **Tratamento de Esgoto pelo Sistema de Lodos Ativados no Município de Ribeirão Preto, SP: Avaliação da Remoção de Metais Pesados**. 2006.172f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública), Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto, Programa de Pós-Graduação em Enfermagem em Saúde Pública, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2006.

REBOUÇAS, A. da. C; BRAGA, B; TUDINISI, J. G. **Águas doces no Brasil**: Capital ecológico, uso e conservação. 2.ed. rev. e ampl. São Paulo: Escrituras, 2002. 702p.

RIBEIRO FILHO, M.R; CURI, N; SIQUEIRA, J. O; MOTTA, P. E. F. da. Seção IX – Poluição do Solo e Qualidade Ambiental: Metais Pesados em Solos de Área de Rejeitos de Indústria de Processamento de Zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.2, p. 453-464, 1999. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v23n2/29.pdf>>. Acesso em: 21 jul. 2017, 23:31:00.

SANTOS, J. S. de. S. **Simulação Numérica da Dispersão de Poluentes em Solos. Estudo de Caso**: Lagoas de Estabilização. 2015.131f.Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Centro de Ciências e Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNIS. **Coleta 2015**. 2015. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/coleta-de-dados-snis-agua-e-esgotos>>. Acesso em: 21 jun. 2017, 23:19:00.

SILVA, D. C. **Electrorremediação de Solos Contaminados com Metais Pesados**. 2015. 90p. Dissertação (Mestrado em Química), Departamento de Química, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2015.

STEFFAN, J. J; BREVIK, E. C; BURGESS, L. C; CERDÀ, A. The effect of soil on human health: an overview. **European Journal Of Soil Science**, [s.l.], p.1-13, 17 jul. 2017. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1111/ejss.12451>.

TELHADO, M. C. S. C. L; LEITE, S. G. F; RIZZO, A. C. de. L; REICHWALD, D; CUNHA, C. D. da. **Avaliação da Biodisponibilidade de Contaminantes Orgânicos em Solo Contaminado**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 131p. (Série Tecnologia Ambiental).

TU, J; YEOH, G. H; LIU, C. **Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach**. 1 ed. United Kindgom: Butterworth-Heinemann, 2008. 480 p.

WIESINIESKI, J. A. **Estudo de Mecanismos de Retenção de Espécies Metálicas no Sedimento das Lagoas de Decantação do Aterro Controlado do Botuquara**. 2009. 120p. Dissertação (Mestre em Química Aplicada), Programa de Pós-Graduação em Química Aplicada, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Paraná, 2009.

YRUELA, I. Copper in plants. **Brazilian Journal Plant Physiology**. *Online*, n. 17, v. 1, p. 145-156. 2005. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/bjpp/v17n1/a12v17n1.pdf>>. Acesso em: 17 ag. 2017.