

**TRACTEBEL ENGINEERING Ltda.**

Rua Paraíba, 1.122 - 14º andar - Savassi  
CEP: 30.130-918 - Belo Horizonte - Minas Gerais - BRASIL  
tel.: +55 31 3249 7600

[contato@tractebel.engie.com](mailto:contato@tractebel.engie.com)  
[tractebel-engie.com.br](http://tractebel-engie.com.br)

---

# ANEXO 18

## RODOANEL METROPOLITANO BH

### MODELO TRANSPORTE DE

### CONTAMINANTES

### VARGEM DAS FLORES

---

BA ENVIRONMENT & SOCIAL

C.C.: W.000067.0001 - INCSPA - PROJETO AMBIENTAL RODOANEL RMBH

**CLIENTE: BHR S.A.**

**PROJETO: Rodoanel Metropolitano de Belo Horizonte**

**JANEIRO DE 2024**

---

00	31.01.2024	A	I. Silva	A. Canhoto, G. Eger	L. Melo
REV.	DD.MM.AA	NATUREZA DAS REVISÕES	ELABORAÇÃO	VERIFICAÇÃO	APROVAÇÃO

---

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....	4
2	MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEITUAL.....	6
2.1	Caracterização da Área de Estudo .....	6
2.1.1	Localização e Acessos .....	6
2.1.2	Contexto Geológico .....	9
2.2	Contexto Hidrológico .....	10
2.2.1	Precipitação .....	10
2.2.2	Fluxo de Base.....	11
2.3	Contexto Hidrogeológico .....	12
3	USOS E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	15
4	LEVANTAMENTO DE DADOS PRIMÁRIOS.....	17
4.1	Objetivos .....	17
4.2	Metodologia .....	17
4.3	Normas de Referência .....	20
4.3.1	Leis e Deliberações Normativas.....	21
4.3.2	Normas Regulamentadoras e Manuais de Laboratório .....	21
4.4	Características Físicas das Amostras de Solo .....	21
4.4.1	Granulometria dos Solos Amostrados.....	23
4.4.2	Massa Específica, Percentual de Umidade e Percentual de Sólidos dos Solos Amostrados .....	23
4.4.3	Limites de Atterberg .....	24
4.5	Características Físico-químicas das Amostras de Solo .....	24
4.6	Características Físico-químicas das Amostras de Água Subterrânea .....	27
5	TRANSPORTE DE CONTAMINANTES .....	29
5.1	Mecanismos de transporte de contaminantes .....	29
5.2	Premissas e Restrições de Projeto .....	31
5.3	Determinação das Condições Iniciais.....	32
6	MODELO HIDROGEOLOGICO NUMÉRICO .....	34

6.1	Características Construtivas do Modelo .....	34
6.1.1	Área de Estudo e Dados de Entrada.....	34
6.1.2	Malha Numérica .....	36
6.1.3	Fluxo, Carga Hidráulica e Condições de Contorno .....	37
6.2	Calibração do Modelo Numérico .....	40
6.3	Resultados em Regime Permanente .....	42
6.4	Cenários do Transporte de Contaminantes .....	48
6.5	Resultados do Transporte de Partículas .....	48
6.6	Resultados do Transporte de Contaminantes .....	51
7	CONCLUSÕES .....	58
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

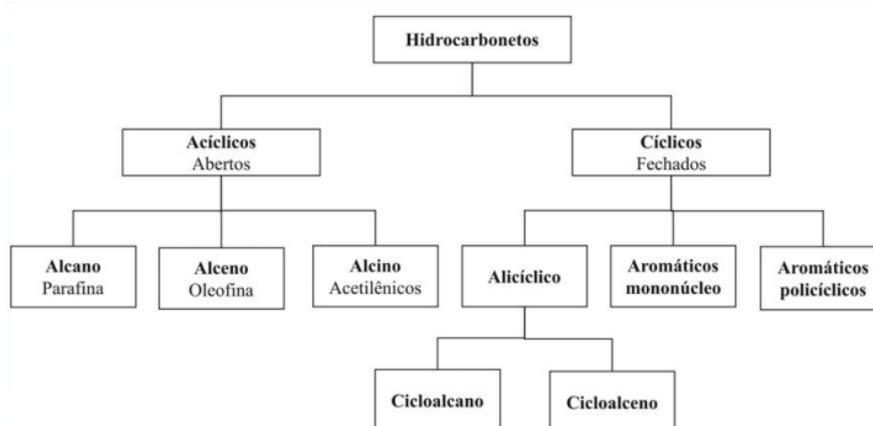
## 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Consoante ao apresentado no **Anexo 13 - Diretrizes Ambientais** referente à documentação da Concorrência Internacional nº 001/2022 do Rodoanel Metropolitano de Belo Horizonte, este documento objetiva apresentar o modelo computacional do comportamento de manchas (plumas) de contaminação da bacia hidrográfica Vargem das Flores, que tem grande importância regional por desaguar no Rio Betim, o qual é represado e utilizado como fonte de abastecimento hídrico para região metropolitana de BH.

Localizada na Alça Oeste do Rodoanel Metropolitano BH, a Área de Proteção Especial (APE) da bacia Vargem das Flores, é considerada como área prioritária em relação às demais sub-bacias que são interceptadas pelo Rodoanel Metropolitano BH, dado à maior preocupação devido à sua importância estratégica para abastecimento público e propensão de expor, com maior facilidade, os seres humanos e/ou ao meio ambiente à impactos por ações antrópicas.

A simulação numérica de transporte de contaminantes da bacia Vargem das Flores, foi realizada priorizando substâncias como óleos e combustíveis derivados de petróleo (hidrocarbonetos), que podem ser resultantes de um possível vazamento, fugas, práticas indevidas ou derramamentos acidentais, nas fases de implantação e operação da rodovia, além de óleos e graxas que podem ser derramados durante a manutenção de máquinas em canteiro de obras. Nesse sentido, Corseuil & Marins (1997) afirmaram que em um derramamento de componentes derivados de petróleo, uma das principais preocupações é a contaminação de aquíferos, que é o bem a proteger decorrente do seu potencial uso como fonte de abastecimento de água para consumo humano.

Os hidrocarbonetos derivados de petróleo abrangem um extenso espectro de substâncias (**Figura 2.1-1**), que podem ser classificadas de acordo com o grau de saturação, definido pelos tipos de ligações entre átomos de carbono, e com sua estrutura, se acíclica ou cíclica. Os hidrocarbonetos acíclicos diferem-se quanto ao grau de saturação em alcanos, alcenos e alcinos, enquanto os hidrocarbonetos cíclicos dividem-se quanto a estrutura entre alicíclicos, sem a presença de anéis de benzeno, e aromáticos, com pelo menos um anel de benzeno em sua estrutura. Dentre os hidrocarbonetos de maior atenção no contexto da contaminação, destacam-se os aromáticos e os poliaromáticos, que apresentam risco à saúde humana devido ao seu caráter carcinogênico e mutagênico (SANTOS, 2005).



**Figura 2.1-1 – Classificação dos hidrocarbonetos de acordo com a estrutura e o grau de saturação.**

Fonte: LFUG, 2000 *apud* BERGER, 2005

Para avaliar a contaminação por hidrocarbonetos, realiza-se análise dos parâmetros Hidrocarbonetos Totais de Petróleo (TPH), que indicam se há ocorrência de algum dos componentes de petróleo na área de interesse. Em casos em que se observa contaminação, além das análises de TPH, foram realizadas análises referentes aos compostos tóxicos, tais como Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA) e Hidrocarbonetos Monoaromáticos, representados pelo BTEX, que correspondem ao benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno, de forma a entender as condições do possível risco ambiental (BERGER, 2005).

Os HPAs constituem uma família de compostos orgânicos semivoláteis. Quando em altas massas molares, são dificilmente degradados, tendendo a acumular no meio ambiente. De acordo com Chiaranda (2006), os HPAs mais comumente identificados em locais contaminados, além de serem suspeitos de prejudicar a saúde devido ao maior grau de exposição aos seres humanos, são os compostos naftaleno, acenafteno, acenaftileno, antraceno, benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno, benzo(a)fluoranteno, benzo(g,h,i)perileno, benzo(k)fluoranteno, criseno, dibenzo(a,h)antraceno, fluranteno, fluoreno, ideno(1,2,3-dc)pireno, fenantreno e pireno.

Em contato com as águas subterrâneas, esses compostos químicos se dissolverão parcialmente. Os hidrocarbonetos BTEX e hidrocarbonetos aromáticos são os constituintes que têm maior solubilidade em água e, portanto, são os contaminantes que primeiro irão atingir o lençol freático (Corseuil, 1992). Portanto, esses compostos indicam a necessidade de maior detalhamento em um estudo de simulação de cenários hipotéticos de contaminação no sistema aquífero granito-graússico presente na bacia Vargem as Flores.

Ressalta-se que, a bacia Vargem das Flores consiste em uma Área de Proteção Especial (APE), instituída com a finalidade de realizar a proteção dos mananciais presentes na bacia, que, inclusive, são utilizados para abastecimento hídrico da região metropolitana de Belo Horizonte.

A Deliberação Normativa (DN) Conjunta COPAM/CERH nº 02/2010, que estabelece as diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por substâncias químicas e a DN COPAM nº 166/2011, que estabelece os valores de referência para qualidade do solo, em consonância com o que determina a Política Estadual de Recursos Hídricos, visam assegurar o controle e a segurança da água subterrânea pelos usuários atuais e futuros.

Neste sentido, a modelagem numérica de transporte de contaminantes considerando vários cenários de exposição, irá desempenhar um papel importante na compreensão e previsão do comportamento no caso da ocorrência de contaminação ao aquífero subterrâneo, permitindo, simular fontes de contaminação, estudar a variabilidade espaço-temporal de plumas de contaminação e avaliar os cenários possíveis, de forma a desenvolver estratégias eficazes de prevenção e remediação dos danos ao meio ambiente e à população usuária da água subterrânea do local.

Ademais, a avaliação da mobilidade dos possíveis contaminantes, irá subsidiar decisões nas etapas de avaliação de risco ambiental e programa gerenciamento de risco ambiental, pertinentes ao escopo deste EIA.

Não foi considerado para fins deste estudo os potenciais riscos decorrentes do processo de escoamento superficial das hipotéticas ações de contaminação,

Após o estudo de modelagem matemático, foram avaliadas conceitualmente os riscos associados a um hipotético evento de contaminação na área objeto de estudo (**ANEXO 19 - RODOANEL METROPOLITANO BH ANÁLISE DE RISCO VARGEM DAS FLORES**).

## 2 MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEITUAL

O documento **ANEXO 15 - RODOANEL METROPOLITANO BH MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL VARGEM DAS FLORES**, subsidia o conhecimento do comportamento das águas subterrâneas do Sistema Aquífero da Região da Bacia de Vargem das Flores. Nesse estudo, o sistema aquífero foi caracterizado, de acordo com o contexto hidrográfico, geológico local e geomorfológico em que está inserido, bem como são apresentados os parâmetros hidráulicos, dados hidrogeológicos (fluviometria, pluviometria, piezometria), mapa potenciométrico local e pontos de água (nascentes) levantados por meio de dados secundários. Os resultados do modelo incluem uma descrição sucinta do ciclo hidrológico da região e a disposição de em um esquema representativo para síntese da relação entre as águas superficiais e subterrâneas.

Assim, os itens abordados nesse capítulo consistem em um resumo dos estudos anteriores já desenvolvidos no âmbito do **ANEXO 15 - RODOANEL METROPOLITANO BH MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL VARGEM DAS FLORES**.

### 2.1 Caracterização da Área de Estudo

#### 2.1.1 Localização e Acessos

A caracterização do meio físico da região de interesse foi definida com base na localização e acessos, contexto geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos e uso e ocupação do solo.

A caracterização da área de estudo servirá para embasamento técnico e para definição das condições de contorno do modelo hidrogeológico numérico, que estão relacionados com os recursos físicos, como corpos d'água superficiais e rochas relativamente impermeáveis a impermeáveis, zonas de falhas ou fraturas; recursos hidráulicos, como divisões de águas subterrâneas, lagos, rios; e o lençol freático que define o limite superior de um modelo (BARNETT *et al.*, 2012).

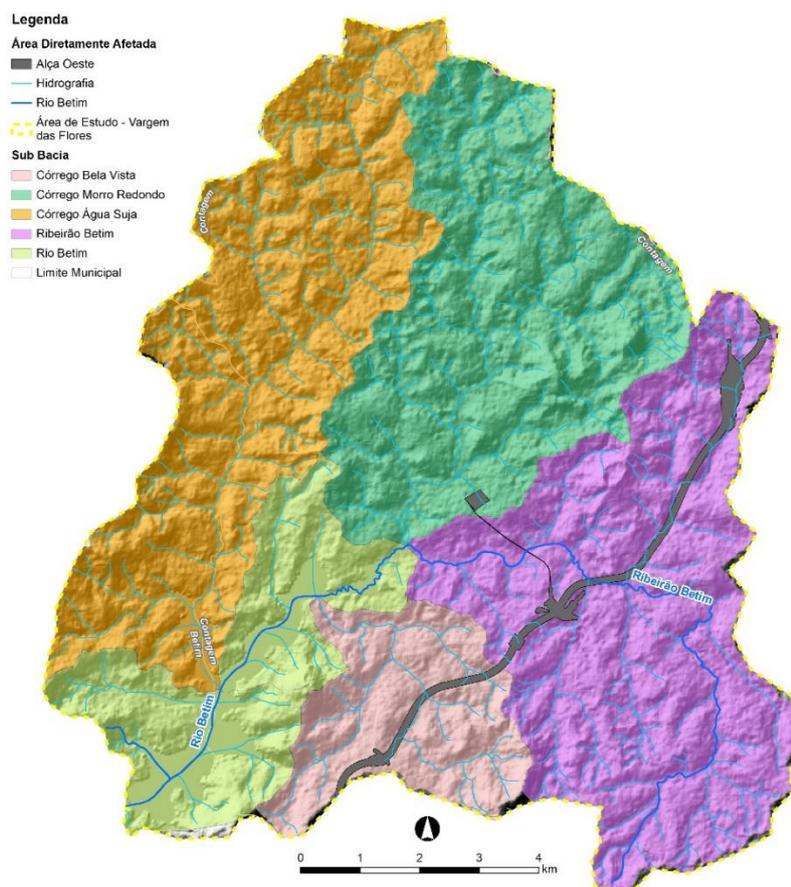
O Rodoanel Metropolitano BH a ser implementado na região metropolitana de BH, tem como objetivo principal estabelecer uma rota alternativa para os usuários que atualmente utilizam o anel viário de Belo Horizonte e as vias urbanas da capital para deslocamentos de longa distância. O empreendimento apresenta extensão aproximada de 70 Km, dividido nas alças norte e oeste.

Localizada na Alça Oeste do Rodoanel Metropolitano BH, tem-se em destaque a região da Área de Proteção Especial (APE) da bacia Vargem das Flores, estabelecido pelo Decreto Estadual nº 20.793/1998, que conta com um reservatório de água, inaugurado em 1973, para abastecimento hídrico da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Juntamente com os reservatórios Serra Azul e rio Manso, o reservatório Vargem das Flores compõe o Sistema Paraopeba, que garante o abastecimento de água para cerca de 3,5 milhões de pessoas da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), (Agência Nacional das Águas – ANA, 2023). As águas superficiais da bacia Vargem das Flores são enquadradas como classe 1, conforme Deliberação Normativa COPAM nº 14 de 1995.

Ressalta-se que, a bacia Vargem das Flores, é considerada como área prioritária em relação às demais sub-bacias que são interceptadas pelo Rodoanel Metropolitano BH, dado à maior preocupação devido à sua importância estratégica para abastecimento público e propensão de expor, com maior facilidade, os seres humanos e/ou ao meio ambiente à impactos por ações antrópicas.

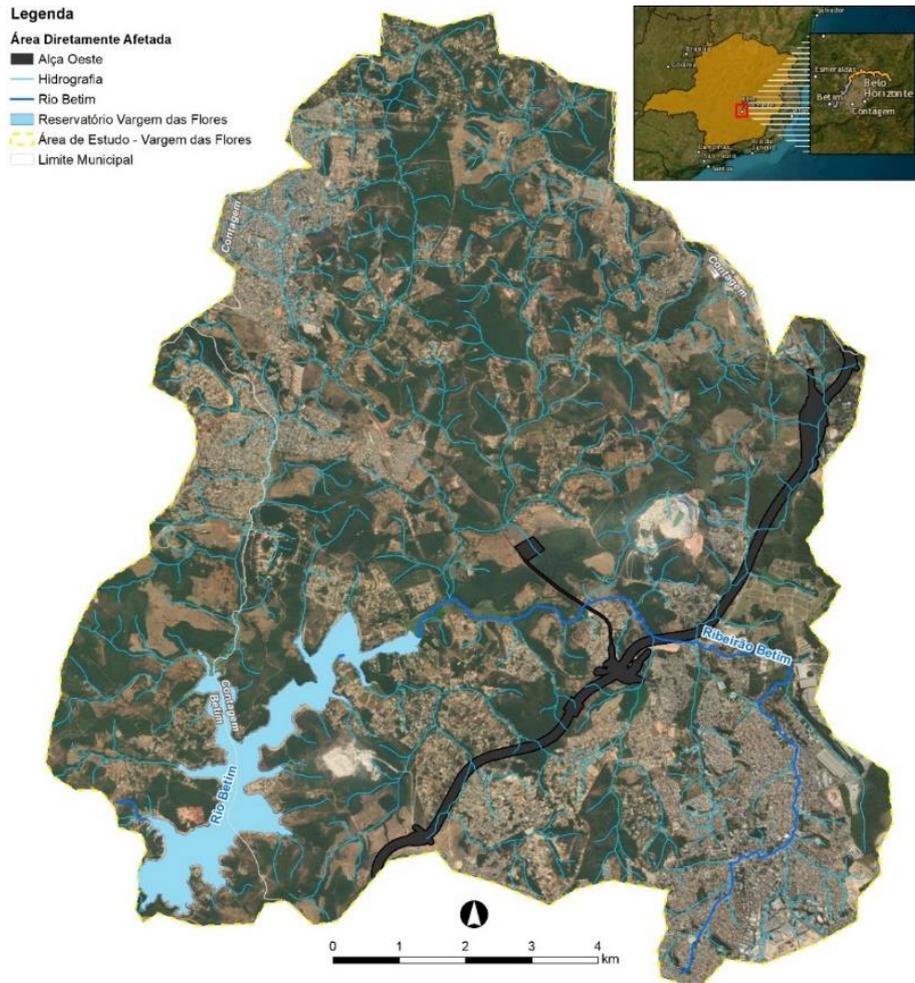
A região possui uma área total de drenagem de, aproximadamente, 123 km<sup>2</sup>, e se tratando especificamente, onde há interceptação direta do Rodoanel Metropolitano BH, observa-se na **Figura 2.1-1** que o traçado verterá parte de suas águas para as subbacias ribeirão Betim e córrego Bela Vista, que, por sua vez, irão convergir para o rio Betim, onde está localizado o reservatório Vargem das Flores.



**Figura 2.1-1 – Bacias hidrográficas Vargem das Flores.**

Assim, a área de estudo para elaboração do modelo numérico de transporte de contaminantes consiste na região da bacia Vargem das Flores (Alça Oeste), inserida nos municípios de Betim (13%) e Contagem (87%), conforme pode ser visualizado na **Figura 2.1-2**.

Na **Figura 2.1-2**, observa-se a presença do Canteiro de Apoio 03 e Usina de Britagem, que serão estruturas temporárias a serem locadas na sub-bacia córrego Ribeirão Betim e córrego Morro Redondo, durante a fase de implantação do empreendimento. Após a finalização da construção, tais estruturas serão removidas, entretanto os estudos ambientais acerca das mudanças no comportamento da dinâmica hídrica e possíveis fontes de contaminação são imprescindíveis para esses locais.



**Figura 2.1-2 - Mapa da inserção do traçado e localização de estrutura de apoio prevista, a nível básico, na Bacia de Contribuição Hídrica do Reservatório Vargem das Flores.**

O canteiro de obras 03, contará com escritórios de apoio contendo almoxarifado, oficinas mecânicas, serralherias, posto de abastecimento, ambulatório e demais estruturas administrativas, assim como alojamentos para acomodar parte da mão de obra, pátios de estacionamento e outras estruturas de apoio para as frentes de obra contendo infraestrutura mínima de refeição e sanitária (tendas, containers, banheiros químicos, entre outros). Além disso, uma série de equipamentos, veículos de transporte e maquinários específicos relacionados à natureza do empreendimento serão empregados e estarão inseridos dentro de toda essa infraestrutura a ser montada para implantação do Rodoanel Metropolitano BH.

## 2.1.2 Contexto Geológico

A área da bacia Vargem das Flores está localizada e totalmente inserida na unidade Complexo Belo Horizonte. Segundo Noce, Teixeira e Machado (1997), o gnaíse cinza-claro, frequentemente exibindo bandamento composicional e feições de migmatização, é caracterizado como litotipo dominante no Complexo Belo Horizonte. As características do gnaíse Belo Horizonte podem apresentar feições bastante variáveis. Entretanto, o tipo mais frequente exhibe fino bandamento, da ordem de milímetros a poucos centímetros, resultante da alternância de bandas leucocráticas ou félsicas e outras mais ricas em minerais máficos, essencialmente biotita. Localmente, as bandas atingem espessuras maiores, na faixa de 20-30 cm.

O bandamento pode apresentar caráter retilíneo e mais ou menos uniforme, ou encontrar-se fortemente dobrado e rompido. Observa-se uma gradação entre porções bandadas e outras de aspecto mais homogêneo, onde a estrutura dominante é uma foliação muito bem desenvolvida. O evento de migmatização, datado por U-Pb em 2860±14/-10 Ma (NOCE, 1995), varia sua intensidade de forma muito irregular dentro da área investigada.

Nos estudos desenvolvidos por Noce, Teixeira e Machado (1997), abordou-se, que no Complexo Belo Horizonte, ocorrem duas faixas vulcano-sedimentares com dimensões da ordem de 2-5 km, orientadas segundo N-S e apresentando mergulhos elevados. Constituindo-se de anfíbolitos, formação ferrífera, quartzitos e quartzo-mica xistos.

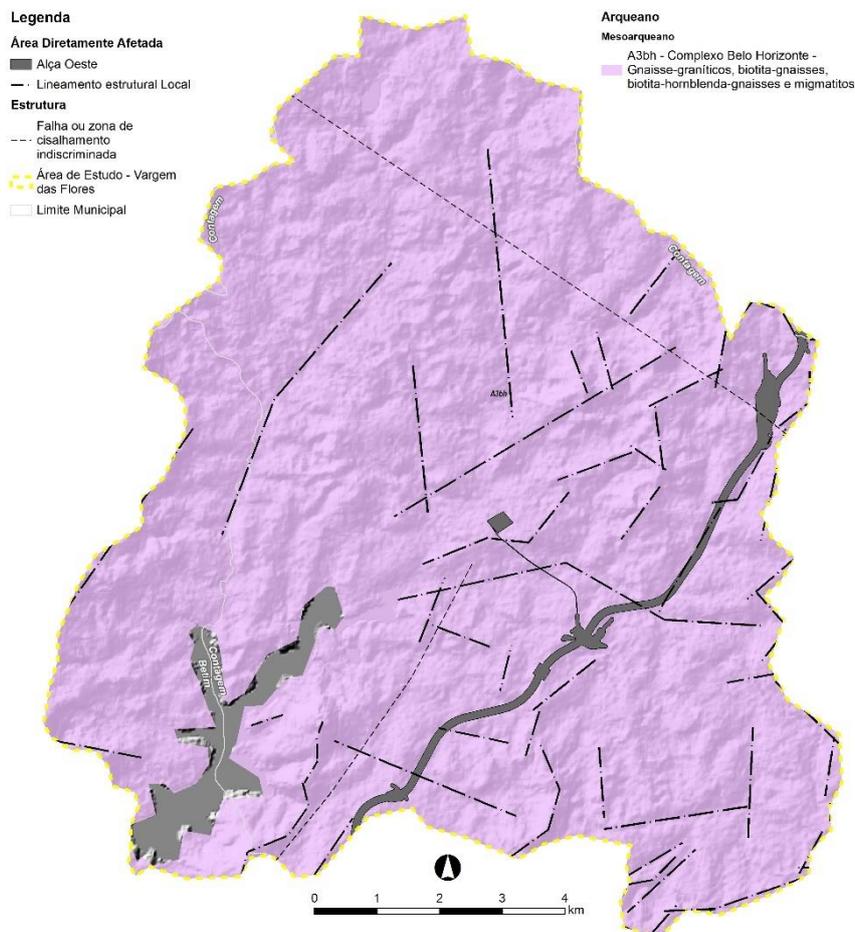
Alterações e mantos de intemperismo silto-argilosos ocorrem em toda a bacia, sobrepondo as rochas granito-gnáissicas, que afloram, pontualmente, em determinadas regiões de maior elevação topográfica. Assim, os solos residuais podem apresentar-se ora espessos ora delgados (CÂNDIDO, 2018).

A ocorrência de água nas rochas granito-gnáissicas é determinada pelo caráter, distribuição e estrutura das rochas, ou sejam pela geologia da região. Nesse contexto, foi feito um levantamento das principais estruturas das rochas, que pode condicionar zonas de drenagem de águas subterrâneas. De acordo com a definição de O'Leary et. al. (1976), lineamentos são qualquer feição linear, retilínea ou suavemente encurvada mapeável da superfície que refletem estruturas em subsuperfície como fraturas, falhas, zonas de cisalhamento, foliações e dobras.

A avaliação de lineamentos retilíneos ou de depressões alinhadas determinadas pelo Modelo Digital de Elevação – MDE da região de interesse foi feita segundo metodologia de Fetter & Kreamer (2022).

A região do aquífero granito-gnáissico da bacia Vargem das Flores, corresponde a uma área arrasada, o que pode dificultar a observação dos lineamentos estruturais existentes e gerar alguma incerteza na localização desses lineamentos.

A **Figura 2.1-3** apresenta duas falhas ou zona de cisalhamento indiscriminada levantadas com abrangência regional por Fiume et al. (2022). Lineamentos estruturais ou traços de fratura locais foram levantados por meio do satélite ALOS-PALSAR (06/2022).



**Figura 2.1-3 – Falhas Regionais e Lineamentos Estruturais Pertencentes ao Sistema Aquífero Granito-gnáissico da Bacia Vargem das Flores.**

## 2.2 Contexto Hidrológico

A caracterização hidrológica da área incluiu a análise de dados de estações fluviométricas e pluviométricas, além de dados piezométricos medidos em poços tubulares e cadastros de nascentes, conforme detalhado no **ANEXO 15 – RODOANEL METROPOLITANO BH MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL VARGEM DAS FLORES**.

### 2.2.1 Precipitação

A bacia Vargem das Flores está inserida na zona climática subsequente (temperatura entre 15 e 18 °C em pelo menos 1 mês). No que se refere ao parâmetro de umidade, essa zona climática é classificada como semiúmida, com quatro a seis meses secos.

A caracterização da pluviometria na região da bacia Vargem das Flores foi realizada por meio da análise de dados da série histórica da estação climatológica Belo Horizonte (cód. 83587), no período de 1992 a 2021, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A variabilidade mensal

da precipitação mínima, média e máxima durante o período de 1992 a 2001 é apresentada no **Quadro 2.2-1**.

**Quadro 2.2-1 – Precipitações mínimas, médias e máximas mensais referentes à estação Belo Horizonte (83587).**

MÊS	JAN.	FEV.	MAR.	ABR.	MAIO	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OUT.	NOV.	DEZ.
Mínima	88,6	22,9	62,7	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,0	108,2	129,3
Média	319,6	184,0	194,5	79,7	27,7	12,1	5,4	10,9	47,8	114,0	237,8	342,2
Máxima	934,7	431,9	391,3	235,8	96,7	75,3	48,1	47,1	127,2	344,3	396,6	720,0

Fonte: INMET, 2023

Analisando o comportamento da pluviometria, verifica-se que o período chuvoso pode ser definido entre os meses de novembro a março, nos quais são observadas precipitações médias acima de 100 mm, com destaque para os meses de novembro, dezembro e janeiro, com 237,9, 341,2 e 319,9 mm, respectivamente. Nos meses de abril a outubro, os quais tendem a apresentar as menores precipitações observadas, define-se o período seco, com médias mensais variando de 5,6 a 11,0 mm, em julho e agosto, respectivamente. A precipitação média anual para o período de 30 anos observados foi de 1575,8 mm.

## 2.2.2 Fluxo de Base

A determinação do escoamento de base não é de simples decomposição e exige entendimento do comportamento da recessão do hidrograma de vazões de modo a se determinar o ponto de separação do escoamento direto (escoamento superficial + subsuperficial) do escoamento de base.

Essa separação do escoamento de base pode ser feita pelo filtro digital proposto por Eckhardt (2005). O filtro parte da premissa que o escoamento de base tende a ser mais constante e suave ao longo do tempo, enquanto o escoamento superficial varia rapidamente em resposta a eventos de chuva. A partir de convoluções e diferenciações matemáticas que ditam o comportamento do escoamento de base no período de estiagem, é possível identificar e isolar o comportamento de base de uma série de vazão observada.

Foi calculado o Índice de Fluxo de Base (BFI), que relaciona o fluxo de base com a vazão total ao longo do tempo. O parâmetro  $BFI_{max}$ , que influencia o BFI e pode ser influenciado pela geologia local, foi determinado conforme as propostas de Eckhardt (2005) ou por meio da relação Q90/Q50 sugerida por Collischonn e Fan (2013).

O **Quadro 2.2-2** apresenta as estações fluviométricas selecionadas para a análise, bem com suas respectivas áreas de drenagem (AD), as vazões médias de longo termo ( $Q_{MLT}$ ), o escoamento de base médio, o  $BFI_{máx}$ , e, por fim a porcentagem do fluxo de base por estação.

**Quadro 2.2-2 – Resultados após a aplicação do Filtro Eckhardt**

ESTAÇÕES	AD (km <sup>2</sup> )	$Q_{MLT}$ (m <sup>3</sup> /s)*	ESCOAMENTO DE BASE MÉDIO (m <sup>3</sup> /s)*	$BFI_{máx}$	% FLUXO DE BASE**
Ponte Nova do Paraopeba (40800001)	5.680	74,78	50,42	0,79	67,4%
Alberto Flores (40740000)	4.120	56,81	38,57	0,79	67,9%
Suzana (40823500)	154	1,81	1,14	0,77	62,6%

ESTAÇÕES	AD (km <sup>2</sup> )	Q <sub>MLT</sub> (m <sup>3</sup> /s)*	ESCOAMENTO DE BASE MÉDIO (m <sup>3</sup> /s)*	BFI <sub>MÁX</sub>	% FLUXO DE BASE**
Jardim (40811100)	113	1,20	0,80	0,76	66,1%
Mateus Leme Aldeia (40822995)	113	0,96	0,58	0,73	60,2%
Fazenda Pasto Grande (40810800)	54,7	0,60	0,40	0,76	65,7%

\*Valores médios de longo termo considerando o período de 1992-2021

\*\*Razão entre a vazão do escoamento de base e vazão média de longo termo para o período de 1992 a 2021.

Visto que o estudo se propõe analisar o comportamento hidrogeológico da bacia Vargem das Flores, fez-se necessário regionalizar os valores encontrados das vazões médias mensais. Assim, as informações da área de drenagem das estações fluviométricas e as suas respectivas vazões médias de longo termo e da vazão resultante média do escoamento de base, foram ajustadas em regressões lineares do tipo potência para a bacia Vargem das Flores (**Quadro 2.2-3**).

**Quadro 2.2-3 - Vazões regionalizadas para a bacia Vargem das Flores.**

VAZÕES DE REFERÊNCIA	EQUAÇÕES DE REGIONALIZAÇÃO	COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO (R <sup>2</sup> )	VAZÃO REGIONALIZADA (m <sup>3</sup> /s)
Vazão média de longo termo - Q <sub>MLT</sub>	$Q_{MLT} = 0,0077 \times AD^{1,0645}$	0,9984	1,29
Escoamento de base médio - Q <sub>bf</sub>	$Q_{bf} = 0,0046 \times AD^{1,0785}$	0,9979	0,83

## 2.3 Contexto Hidrogeológico

A caracterização e delimitação do sistema aquífero pertencente a bacia Vargem das Flores foi feita por meio do Mapa Hidrogeológico da região sudeste de Minas Gerais em escala 1:500.000 (Fiume et al., 2022). Nesse contexto, a bacia Vargem das Flores está inserida majoritariamente inserida no sistema aquífero granito-gnáissico.

O autor supracitado aponta que o Embasamento Indiferenciado apresenta uma grande variedade de litotipos, como gnaisses, xisto, granito, quartizito, migmatito, mármore, além de rochas metapelíticas, vulcânicas e metavulcânicas.

Em consonância com Castro et al. (2020), o Complexo Belo Horizonte, originalmente denominado por Noce et al. (1994), apresenta-se como um sistema aquífero fraturado, caracterizado como anisotrópico, de produtividade muito baixa, porém, localmente baixa, com baixo grau de fraturamento. O **Quadro 2.3-1** apresenta uma breve descrição do sistema hidrogeológico identificado, caracterizados conforme Beato et al. (2005) modificado por Castro et al. (2020) e Fiume et al. (2022).

**Quadro 2.3-1 - Classificação da Unidade Hidrogeológica Granito-gnáissica. Sy – Porosidade Efetiva; Q – Vazão; K – condutividade Hidráulica; Q/s – Capacidade Específica; T – Transmissividade; R – Recarga (% da precipitação média).**

Classe	Sy (%) <sup>1</sup>	Q (m <sup>3</sup> /h)	K (cm/s)	Q/s (m <sup>3</sup> /h/m)	T (m <sup>2</sup> /s)	R (%) <sup>1</sup>
Embasamento Indiferenciado (4)	0,75 a 2,0	10,0 a 25,0	10 <sup>-8</sup> a 10 <sup>-7</sup>	0,40 a 1,00	10 <sup>-5</sup> a 10 <sup>-4</sup>	< 10%

Fonte: Fiume et al. (2022); <sup>1</sup> Castro et al. (2020).

De forma geral, pode-se afirmar que os aquíferos em rochas do embasamento cristalino constituem um domínio de fluxo misto (granular e fissural) associado ao manto de alteração (grau de fraturado tipo 4) e a rocha são e fraturada (grau de fraturamento 3) de baixo potencial hidrogeológico. A porosidade fissural ocorre na rocha são fraturadas, onde se desenvolvem lineamentos de fraturas e de estruturas planares penetrativas. No manto de alteração ocorre porosidade granular, que determina a presença de aquíferos com baixa permeabilidade e capacidade de armazenamento em espessuras médias inferiores a 50m.

Conforme apresentado de forma mais detalhada no **ANEXO 15 – RODOANEL METROPOLITANO BH MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL VARGEM DAS FLORES**, na bacia Vargem das Flores, a entrada de água está exclusivamente ligada à precipitação pluvial, igual a 1.575,70 mm por ano. A água que incide na superfície da bacia infiltra ou compõe o escoamento superficial, integrando o fluxo superficial que converge para os cursos d'água superficiais das sub-bacias Bela Vista e ribeirão Betim.

A água que infiltra na zona não saturada dos aquíferos granulares representa o principal processo de reposição de água nos aquíferos. Na região em estudo a infiltração é pouco significativa, uma vez que a maior parte da região é representada por áreas urbanas, que impermeabilizam o solo e a vegetação é reduzida. Ressalta-se que nas regiões mais a sudeste do Rodoanel Metropolitano BH, a quantidade de nascentes cadastrada é elevada. Entretanto, a ocupação urbana excessiva na região, vem reduzindo a quantidade destas nascentes.

Os maciços rochosos da área são pouco fraturados, apresentando locais com fraturas simples, isoladas ou com pequena abertura, que indicam condutividades hidráulicas muito baixas (da ordem de grandeza de 10<sup>-8</sup> ou 10<sup>-9</sup> cm/s). O fluxo se concentra nas regiões que tendem aos baixos topográficos, onde se encontram os cursos d'água perenes que drenam o sistema. A capacidade específica é limitada e restrita às zonas de fraturamento, variando de 0,40 a 1,00 m<sup>3</sup>/h/m, em espessuras médias inferiores a 50m.

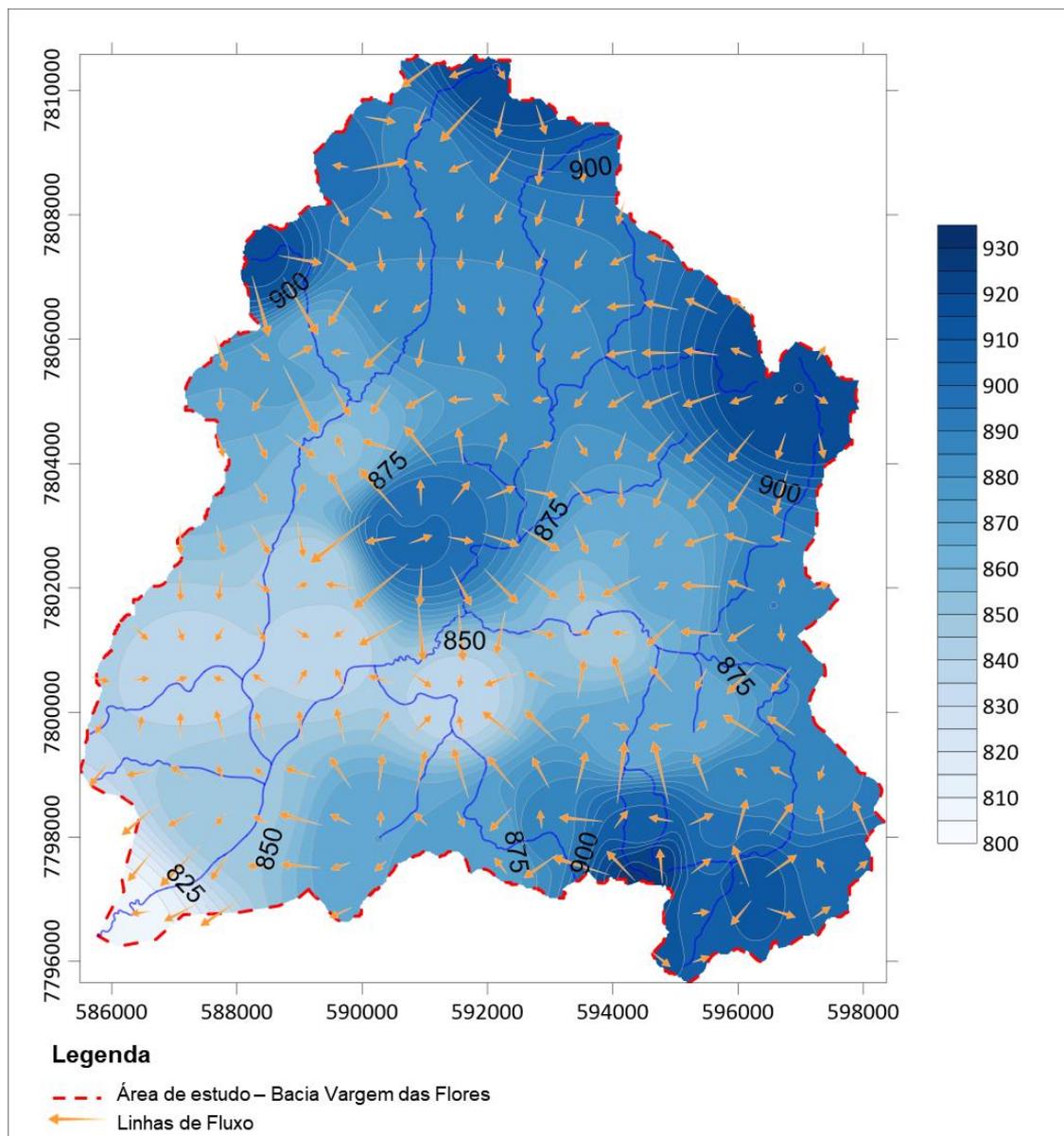
A avaliação estatística apresentada no **Quadro 2.3-2** contou com dados de 18 poços tubulares, indicando a média das cotas do nível estático (NE) e do nível dinâmico (ND), além da variabilidade da capacidade específica e as vazões de estabilização.

**Quadro 2.3-2 - Síntese dos dados de poços produtivos pertencentes a bacia Vargem das Flores, que estão localizados no contexto geológico do Complexo Belo Horizonte.**

ESTATÍSTICA	COTA NÍVEL ESTÁTICO (m)	COTA NÍVEL DINÂMICO (m)	VAZÃO DE ESTABILIZAÇÃO (m <sup>3</sup> /h)	CAPACIDADE ESPECÍFICA (m <sup>3</sup> /h/m)
Mínimo	805,00	733,00	1,84	0,03
Média	875,72	835,89	11,29	0,29
Mediana	884,00	838,50	6,31	0,14
Máximo	920,00	902,00	37,87	1,68
Desvio Padrão	33,70	44,97	10,49	0,40

Os mapas potenciométricos indicaram a direção preferencial de fluxo da água subterrânea, que tende a acompanhar os fluxos superficiais, se iniciando em cotas mais elevadas com, aproximadamente, 920 m, indo em direção ao exultório da bacia com 805,00 m. O gradiente hidráulico calculado é de 1,06%. A água que flui através das redes de fraturas dos maciços rochosos também pode alimentar a rede de cursos d'água superficial, devendo formar nascentes classificadas como de fratura ou de falha (zonas de descarga).

O mapa potenciométrico desenvolvido no âmbito do **ANEXO 15 – RODOANEL METROPOLITANO BH MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL VARGEM DAS FLORES**, pode ser observado na **Figura 2.3-1**.



**Figura 2.3-1 – Mapa Potenciométrico da bacia Vargem das Flores, gerado com valores de Nível Estático (m) dos poços tubulares cadastrados no SIAGAS/CPRM e cadastro de nascentes.**

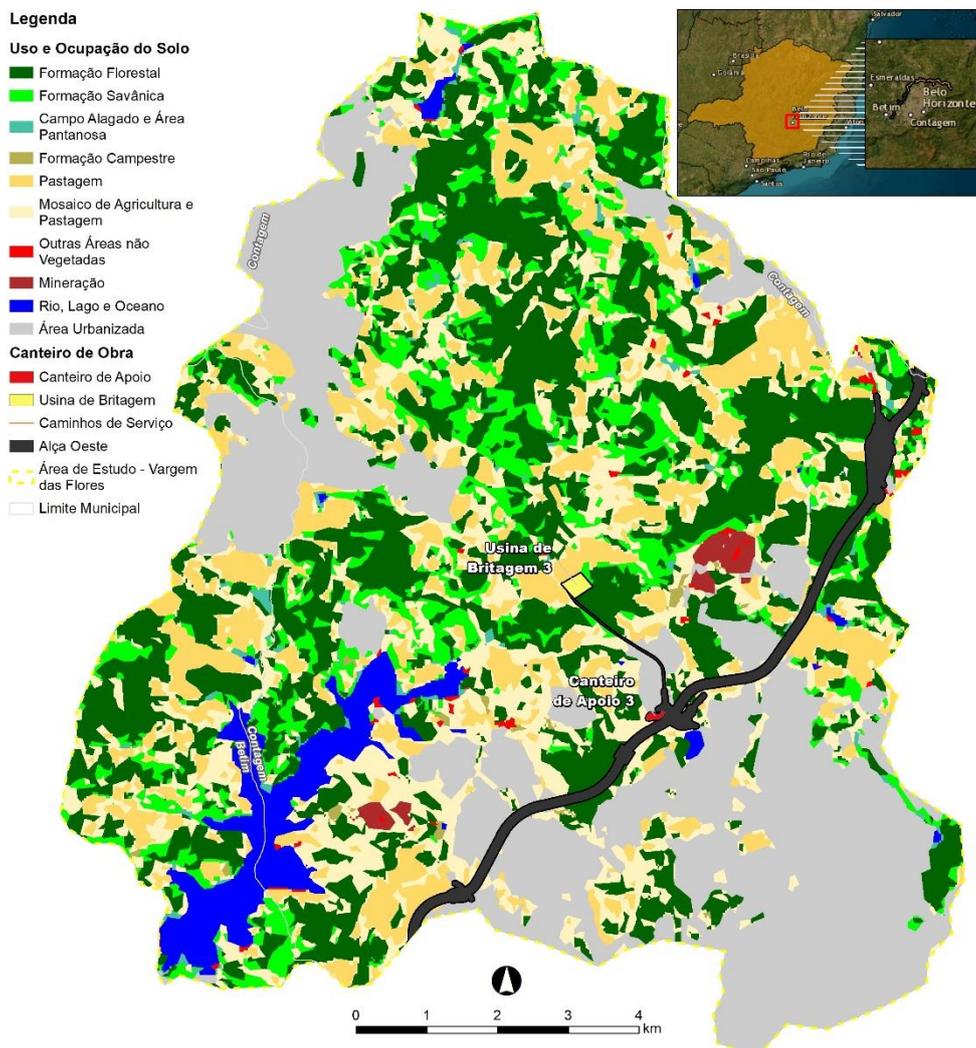
Por fim, pode-se concluir a partir das observações do levantamento de campo que as regiões que compreendem solo e saprolito podem apresentar permeabilidade mais alta e possuem maior eficiência para infiltrar e transmitir água, quando comparado com a porção fissural. Já o aquífero fissural a capacidade de infiltração e transmissão vai depender da densidade de fraturas, espaçamento dessas fraturas e da conectividade entre elas, assim tendem a obedecer aos valores dos parâmetros adotados nos estudos apresentados por Fiume et al. (2022).

### 3 USOS E OCUPAÇÃO DO SOLO

A vulnerabilidade de um aquífero à contaminação depende de alguns fatores, sendo um deles os usos e a ocupação do solo onde está localizado, isso porque as atividades exercidas ou os usos dados à uma área têm capacidade de proteger ou potencializar os riscos. Para que haja proteção dos recursos hídricos em uma dada região, é necessário definir quais atividades desenvolvidas apresentam maiores potenciais de perigos à contaminação de aquíferos (HIRATA & FERREIRA, 2001).

A região onde será inserido o traçado do Rodoanel Metropolitano BH possui diferentes usos e coberturas do solo. No contexto da bacia Vargem das Flores, que é interceptada pela alça Oeste, sua área equivale a aproximadamente 123 km<sup>2</sup>, dos quais 36,89% desta está ocupada por área verdes, compostas por florestas (27,45%), formações savânicas (9,21%) e campestres (0,23%). As áreas destinadas às atividades de agricultura e pastagem correspondem a 31,61%, sendo compostas por mosaico de agricultura e pastagem (17,89%), pastagem (13,72%) e pela cultura do café (0,01%).

A **Figura 2.3-1** apresenta os usos e as atividades que atuam no solo da área delimitada pela bacia Vargem das Flores. Com base nessa figura, observa-se que dentre as áreas não vegetadas, que em conjunto correspondem a 26,43% da área da bacia, destacam-se as áreas urbanizadas (26,08%), as áreas de mineração (0,54%) e outras áreas não vegetadas de forma geral (0,35%). As áreas pantanosas e de campo alagado representam 0,7%, e os corpos d'água correspondem a 3,82% da área total da bacia.



**Figura 2.3-1 – Usos e ocupação do solo na bacia Vargem das Flores.**

Fonte: Adaptado MapBiomas (2022).

O risco de contaminação do solo e da água subterrânea pode estar correlacionado ao tipo de uso do solo, sendo resultado da vulnerabilidade destes em relação às atividades antrópicas que são potencialmente contaminantes/poluentes atuantes no meio (PEIXOTO e CAVALCANTE, 2019; NOBRE et al., 2007; LI et al., 2012).

Nesse contexto, chama-se atenção para a localização da obra do Rodoanel Metropolitano BH, que no caso da Alça Oeste, já está sendo realizada em uma região significativamente urbanizada. Não somente, mas principalmente a sudeste da Rodovia, percebe-se um risco pré-existente de contaminação associada à disposição irregular de resíduos urbanos e/ou industriais e até mesmo efluentes no solo e nas águas superficiais, inerentes a atividades que ocorrem nessa região. Por isso é importante, realizar coleta de amostras de solo e água subterrânea nas fases futuras de projeto detalhado, de forma a ter um controle ambiental da obra de forma efetiva.

Ressalta-se que, já existe cadastramento de área contaminada na região da bacia Vargem das Flores, conforme apontamento do **ANEXO 17 - RODOANEL METROPOLITANO BH QUADRO ÁREAS CONTAMINADAS** (Ponto ACI 03). Entretanto, conforme mencionado, estima-se que

nessa região já existem outras possíveis fontes de contaminação, devido ao próprio tipo de adensamento de empreendimentos, que estão ali presentes.

Mindris (2006) aponta que em áreas urbanas e densamente povoadas são observados empreendimentos com potencial de contaminação do solo e das águas subterrâneas, como indústrias e postos de combustíveis, que armazenam produtos químicos e combustíveis em tanques subterrâneos que podem, por acidente, falha ou falta de manutenção, comprometer a qualidade da água subterrânea e deste modo prejudicar o abastecimento através deste recurso hídrico.

Já em áreas onde há presença de atividades ligadas à agricultura, deve-se observar a adequação do uso de agrotóxicos e fertilizantes às normas e legislações, pois uma vez que este seja feito de maneira irregular, pode resultar em uma fonte significativa de contaminação do solo. Como descrito anteriormente, uma vez no solo, a contaminação pode propagar-se até o lençol freático e atingir as águas subterrâneas, colocando em risco a saúde da população e degradando o meio ambiente.

A presença de vegetação contribui por si só para a diminuição da degradação do solo e para a manutenção da qualidade ambiental. Em áreas não vegetadas, o solo exposto tende a se tornar mais vulnerável à contaminação, enquanto em áreas vegetadas as coberturas vegetais podem atuar de certa forma como um obstáculo, podendo extrair, acumular ou até mesmo metabolizar os contaminantes presentes no solo em produtos menos tóxicos (CAIRO, 2021), atenuando a contaminação.

## 4 LEVANTAMENTO DE DADOS PRIMÁRIOS

### 4.1 Objetivos

Os objetivos principais deste item consistem em:

- Conhecer os parâmetros físico-químicos dos solos e das águas subterrâneas;
- Estabelecer os valores *background* e qualidade dos solos e água subterrânea de acordo com a COPAM 166/2011;
- Realizar caracterização física e classificação textural dos solos;
- Conhecer os valores de TPH *Fingerprint* dos solos e das águas subterrâneas;
- Avaliar a possibilidade de contaminação pré-existente nas áreas de estudo

### 4.2 Metodologia

Para atingir os objetivos deste relatório, foram executadas duas campanhas de levantamento de campo de dados primários, executadas no período seco (julho de 2023) e período chuvoso (dezembro de 2023). Inicialmente, foram coletadas 10 (dez) amostras de solo e 08 (oito) de água subterrânea na bacia hidrográfica Vargem das Flores cujas coordenadas são dispostas na **Figura 4.2-1** e **Figura 4.2-2**, respectivamente. As coordenadas informadas estão no *Datum* SIRGAS 2000.

Ressalta-se que houve tentativa de amostragem água subterrânea no ponto 3 (EAB03), que não foi bem-sucedida, pois não houve autorização da coleta pelo proprietário/responsável pelo poço. Dessa forma, optou-se por suprimir as características locais deste, uma vez que não foi encontrado outro poço disponível para realocação do ponto.

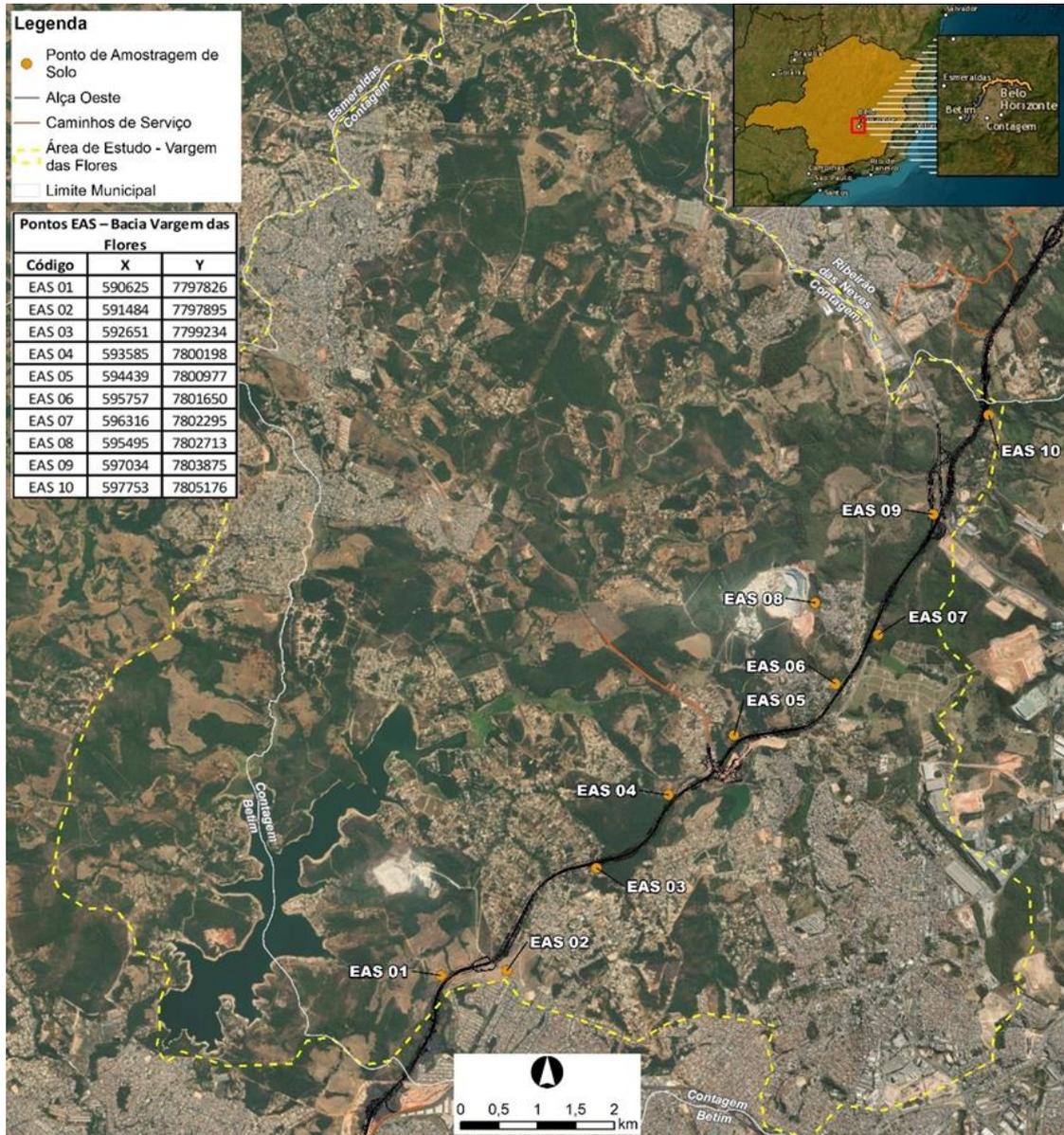
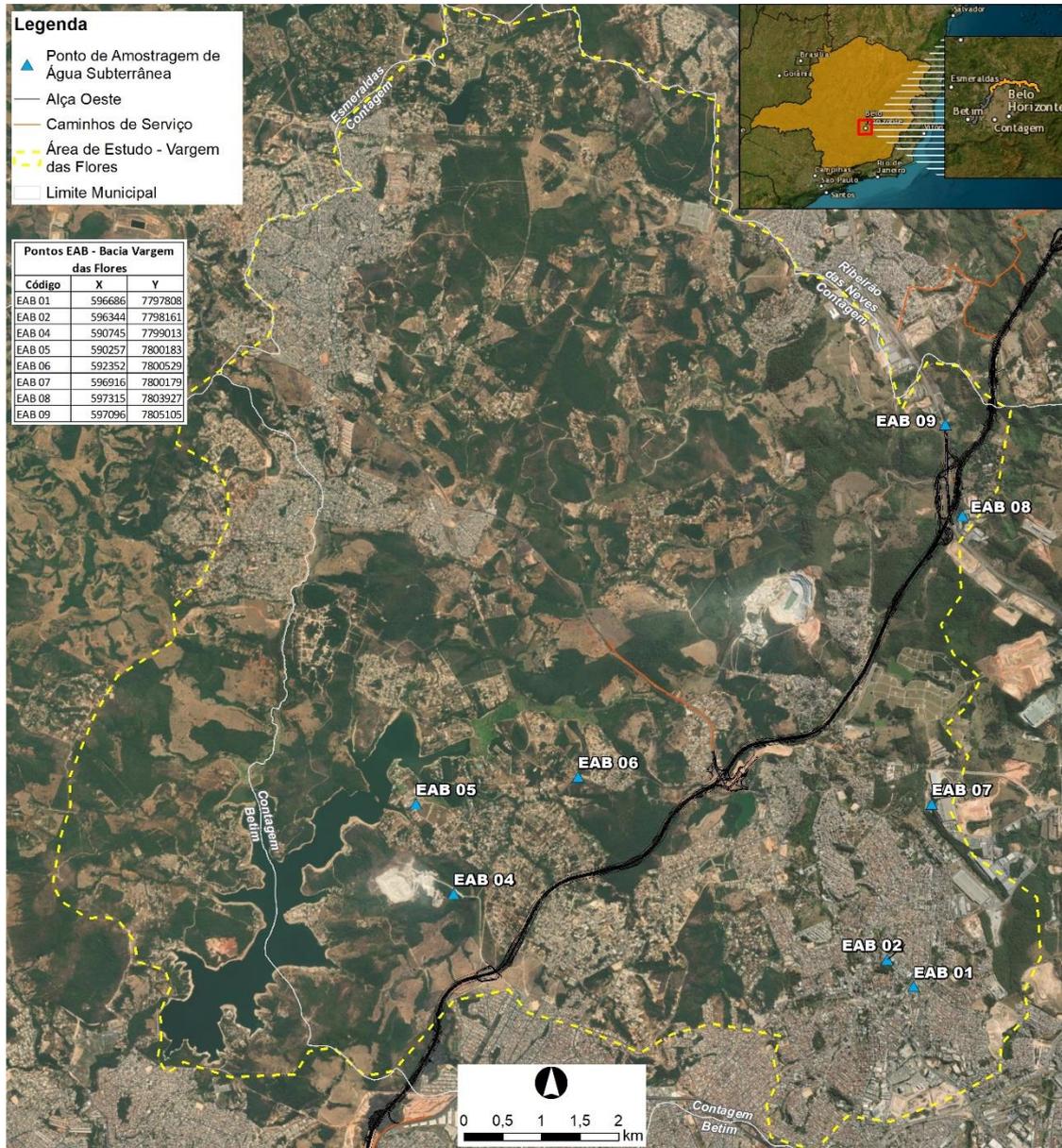


Figura 4.2-1 – Mapa de Pontos de Coleta de amostras de Solo.



**Figura 4.2-2 – Mapa de Pontos de Coleta de amostras de Água Subterrânea**

As coletas das amostras de solo foram realizadas com trado manual com profundidade média das amostras de 1,50 metros. As mesmas foram colocadas em sacos plásticos para transporte para o laboratório. Assim, foram investigados parâmetros da COPAM 166/2011, exceto os parâmetros voláteis conhecidos como BTEX, que não foram possíveis de serem estudados no caso de as amostras em solo devido a metodologia de coleta ter sido o trado manual. Já as amostras de água subterrânea foram coletadas instantaneamente em poços tubulares de produção, armazenados em frascos com preservantes (quando necessário) e refrigerados a  $4,0 \pm 2,0^\circ \text{C}$  tornando possível investigar todos os parâmetros da COPAM 166/2011, inclusive os BTEX em laboratório.

O **Quadro 4.2-1** e **Quadro 4.2-2** apresentam as coordenadas das coletas de amostras de solo e água subterrânea realizadas.

**Quadro 4.2-1 - Coordenadas das coletas de amostras de solo realizadas.**

ID AMOSTRA	Coordenadas UTM Sirgas 2000 23S	
	S	E
EAS 01	7797826	590625
EAS 02	7797895	591484
EAS 03	7799234	592651
EAS 04	7800198	593585
EAS 05	7800977	594439
EAS 06	7801650	595757
EAS 07	7802295	596316
EAS 08	7802713	595495
EAS 09	7803875	597034
EAS 10	7805176	597753

**Quadro 4.2-2 - Coordenadas das coletas de amostras de água subterrânea realizadas.**

ID AMOSTRA	Coordenadas UTM Sirgas 2000 23S	
	S	E
EAB 01	7797808	596686
EAB 02	7798161	596344
EAB 04	7799013	590745
EAB 05	7800183	590257
EAB 06	7800529	592352
EAB 07	7800179	596916
EAB 08	7803927	597315
EAB 09	7805105	597096

As amostras de solo foram coletadas apenas durante o período seco de 2023, já as amostras de água subterrânea foram coletadas em ambas as campanhas de chuva e seca. Posteriormente, foram realizadas análises físico-químicas, considerando os valores *background* como referência para distinguir substâncias naturalmente presentes daquelas introduzidas por atividades humanas. As amostras de solo e água subterrânea foram ensaiadas com base nos parâmetros sugeridos pela COPAM 166/2011. Além disso, as amostras coletadas também tiveram a finalidade para realização de ensaios do tipo TPH *Fingerprint* tanto nos solos quanto nas águas subterrâneas, tendo em vista que a busca por contaminação por hidrocarbonetos é o foco deste estudo.

Além de verificar as características do solo em relação à COPAM 166/2011, também foram realizados ensaios de caracterização física para a avaliação dos parâmetros de solo, que permitirão estimar as características hidráulicas do meio e estimar a susceptibilidade à contaminação, contribuindo assim para o entendimento do estado ambiental das áreas de estudo do Rodoanel Metropolitano de BH.

## 4.3 Normas de Referência

A seguir são citadas as leis, deliberações normativas, normas regulamentadoras e manuais de ensaios de laboratório que subsidiaram os estudos e a realização ensaios de laboratório, que são apresentados nesse documento.

### 4.3.1 Leis e Deliberações Normativas

- Deliberação Normativa Copam nº 166, de 29 de junho de 2011 – Altera o Anexo I da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 02 de 06 de setembro de 2010 estabelecendo os valores de Referência de Qualidade dos Solos.

### 4.3.2 Normas Regulamentadoras e Manuais de Laboratório

- ABNT NBR 6458, de 29 de setembro de 2016 – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água;
- ABNT NBR 6459, de outubro de 1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez;
- ABNT NBR 7180, de outubro de 1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade;
- USEPA SW846D 8015D: 2003 – Método de teste validado 8015D – Compostos orgânicos não halogenados utilizando cromatografia gasosa/detecção por ionização de chama (GC/FID);
- Análise granulométrica – Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) - Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos, 2009;
- Classificação textural – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, 1957 – Diagrama de Classificação Textural de Solos;
- Umidade natural - Manual de Métodos de Análise de Solo - EMBRAPA 2017
- Percentual de umidade - ALS São Paulo – POP 053, CRL 0222 – Determinação dos percentuais de umidade e de sólidos na amostra de solo;
- Percentual de sólidos - ALS São Paulo – POP 053, CRL 0222 – Determinação dos percentuais de umidade e de sólidos na amostra de solo.

## 4.4 Características Físicas das Amostras de Solo

Diante dos resultados apresentados no **Quadro 4.4-1** e no **Quadro 4.4-2** pode-se fazer caracterização física dos solos amostrados, bem como classificá-los em termos de textura de acordo com a metodologia proposta pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (1975).

**Quadro 4.4-1 - Resultados Referentes às Frações Granulométricas dos Solos Amostrados**

Parâmetro	EAS 01	EAS 02	EAS 03	EAS 04	EAS 05	EAS 06	EAS 07	EAS 08	EAS 09	EAS 10	Unidade
Areia (2,00 a 0,062mm)	457	528	735	381	638	383	316	522	498	516	g/Kg
Silte (0,062 a 0,00394 mm)	138	114	111	194	229	207	411	144	228	308	g/Kg
Argila (0,00394 a 0,0002 mm)	405	358	154	425	133	410	273	334	274	176	g/Kg
Classificação Textural (Fonte: USDA, 1975)	Areno argilosa	Areno argilosa	Franco Arenosa	Argilosa	Franco Arenosa	Argila	Siltosa	Areno argilosa	Areno argilosa	Arenosa	-

**Quadro 4.4-2 - Resultados Referentes ao Demais Parâmetros Físicos das Amostras de Solo**

Parâmetro	EAS 01	EAS 02	EAS 03	EAS 04	EAS 05	EAS 06	EAS 07	EAS 08	EAS 09	EAS 10	Unidade
Massa específica natural da amostra	1,61	1,61	1,63	-	1,51	-	-	-	-	-	g/cm <sup>3</sup>
Massa específica seca da amostra	1,62	1,34	1,64	1,21	1,34	-	1,31	1,32	1,29	1,3	g/cm <sup>3</sup>
% Sólidos	85,4	87,4	93,5	84,1	86,2	79,1	80	87,5	86,7	85,9	%
% Umidade	14,6	12,6	6,5	15,9	13,8	20,9	20	12,5	13,3	14,1	%
Limite de Liquidez	35,4	31,6	Amostra não possui Limite de Liquidez	41,5	34,7	60,7	52	34,5	39,5	37,5	%
Limite de Plasticidade	29,3	26,0	Amostra não plástica	31,5	Amostra não plástica	50,5	38,6	26	34,3	32,1	%

#### 4.4.1 Granulometria dos Solos Amostrados

Nas amostras EAS 01 e EAS 02, nota-se a presença predominante das frações Areia e Argila, ao passo que a presença da fração silte em ambas as amostras foi significativamente menor do que as demais frações. Com isso, os referidos solos coletados foram classificados como argila arenosa, perfil que sugere uma textura equilibrada, com uma proporção significativa de argila, indicativa de retenção de nutrientes e de água, uma vez que a presença de argila também pode influenciar positivamente na capacidade de retenção de água.

Já as amostras EAS 03, EAS 05 e EAS 10 a fração granulométrica que se destaca é a areia, ao passo que as frações argila e silte, juntas, representam um percentual inferior ao da areia, conferindo a classificação Franco Arenosa aos solos referentes às amostras em questão. Com isso, a maior proporção de areia sugere solos mais permeáveis, porém, com uma alguma capacidade de retenção de água devido à presença de argila.

Já as amostras EAS 04 e EAS 06, apresentam teores mais altos de argila e quantidade intermediária de areia próxima às de argila, além de pequenas quantidades de silte. De acordo com o diagrama de classificação textural proposto pelo USDA (1975), os solos amostrados são classificados como argilosos. Essa combinação equilibrada sugere uma boa drenagem com a presença de areia, e boa capacidade de retenção de água com a presença de argila.

A amostra EAS 07, com a presença predominante de silte e teores inferiores de areia e de argila, é classificada como Siltosa. A presença predominante de silte sugere uma textura fina, com boa capacidade de retenção de água.

Por fim, nas amostras EAS 08 e EAS 09, os teores de areia se destacam, com presença intermediária de argila, ao passo que o teor de silte apresenta um baixo percentual, características estas que resultam em uma classificação de Areno argilosa. Essa combinação equilibrada indica um solo com capacidade de drenagem e, também capacidade de retenção de água e nutrientes.

#### 4.4.2 Massa Específica, Percentual de Umidade e Percentual de Sólidos dos Solos Amostrados

Analisando os resultados dos parâmetros físicos relacionados a massa específica seca da amostra apresentados no **Quadro 4.4-2**, observa-se massas específicas de baixo peso, que variam de 1,21 a 1,64. Percebe-se uma relação entre esses valores com os valores obtidos no quadro de parâmetros químicos (**APÊNDICE 1**) uma vez que, não foi identificada a presença de nenhum dos metais nas amostras de solo analisadas.

Ao analisar o percentual de umidade percebe-se que a maior parte das amostras possuem um percentual médio de aproximadamente 13% e que o percentual de sólidos foi apresentado em uma média de aproximadamente 87%. Este baixo teor de umidade em relação à concentração de sólidos nas amostras é uma característica de solos com baixos teores de argila e silte como aqueles caracterizados pelas amostras EAS 01, EAS 02, EAS 03, EAS 05, EAS 08, EAS 09 e EAS 10, que possuem concentrações de finos suficientemente baixos para não serem bons retentores de água, mas sim, para garantir uma boa percolação de água.

Diferentemente dessas, as amostras EAS 04, EAS 06 e EAS 07, possuem percentuais de umidade acima de 15%, destacando uma quantidade maior de água nestes solos, que por sua vez, são caracterizados com altos teores de frações mais finas de solo. Ao visualizar o **Quadro 4.4-1**, verifica-

se que estes solos obtiveram uma classificação textural de Argila e Silte, que contribuem para uma maior retenção de água.

#### 4.4.3 Limites de Atterberg

O **Quadro 4.4-2** também dispõe de informações que refletem consistência do solo, que são os limites de *Atterberg*, caracterizados pelos parâmetros Limite de Plasticidade (LP) e Limite de Liquidez (LL). Neste sentido, o limite de liquidez é a umidade em que uma amostra de solo transita do estado plástico para o estado líquido, e o limite de plasticidade se trata da umidade em que uma amostra de solo começa a exibir propriedades plásticas, ou seja, torna-se suficientemente mole para ser moldada sem quebrar (LINO; ECKS; SOKACHESKI, 2015).

Ao analisar esses parâmetros no **Quadro 4.4-1**, percebe-se que as amostras apresentam valores de limites de liquidez e de plasticidade na maior parte das amostras, exceto na amostra EAS 03, que é essencialmente arenosa. Sendo assim, a maior parte das amostras caracterizadas com os baixos valores de LL e LP, que foram EAS 01, EAS 02, EAS 05, EAS 08, EAS 09, EAS 10, apresentam pouca maleabilidade, sendo um reflexo da menor quantidade de argila ou silte.

Ainda no contexto, dos limites de *Atterberg*, duas amostras se destacam pelos seus valores mais altos do que as demais. Ou seja, as amostras EAS 04, EAS 06 e EAS 07 apresentaram maior plasticidade em função da sua maior concentração de frações de solo mais finas e na sua consequente capacidade de maior retenção de água em relação aos demais solos. Esses solos, possuem quantidades significativas de argila ou silte que por possuir propriedades de retenção de água e resistência a deformação, apresentaram LL mínimo de 41,5% e máximo de 60,7% e LP mínimo de 31,5% e máximo de 50,5%.

### 4.5 Características Físico-químicas das Amostras de Solo

Em se tratando das características químicas das amostras de solo, foram realizadas verificações dos mesmos em relação aos valores estabelecidos pela Deliberação Normativa COPAM nº 166 de 2011 (**APÊNDICE 1**), que objetiva definir a qualidade do solo e da água subterrânea em Minas Gerais. Essa Deliberação Normativa define valores de investigação agrícola, residencial e industrial. Diante disso, a referência utilizada neste trabalho foi embasada nos valores de investigação agrícola, por serem os valores de investigação mais restritivos.

Ao interpretar os resultados apresentados no **APÊNDICE 1** (parâmetros químicos as amostras de solo), conclui-se que nenhum dos resultados obtidos se mostrou acima dos valores de investigação agrícola.

Além disso, foi avaliada a presença de Hidrocarbonetos Totais de Petróleo (TPH), conforme metodologia USEPA SW846D 8015D/2003.

Os parâmetros relacionados à presença de hidrocarbonetos originados de petróleo merecem enfoque nesta análise, dado o risco potencial de contaminação por esse tipo de substância nas fases de implantação e operação do Rodoanel Metropolitano BH. Os resultados seguem mostrados no **Quadro 4.5-1**.

**Quadro 4.5-1 - Resultados de TPH Referentes às Amostras de Solos**

Ponto Parâmetro	EAS 01	EAS 02	EAS 03	EAS 04	EAS 05	EAS 06	EAS 07	EAS 08	EAS 09	EAS 10	Unidade
<b>TPH Total (C8 - C40)</b>	< 23	< 23	39	< 24	< 23	< 25	< 24	< 22	15,275*J	< 22	mg/kg
<b>TPH Resolvido</b>	< 23	< 23	17,120*J	< 24	< 23	< 25	< 24	< 22	28	< 22	mg/kg
<b>MCNR</b>	< 23	< 23	22	< 24	< 23	< 25	< 24	< 22	12,273*J	< 22	mg/kg
<b>Cromatograma combina com:</b>	Não se aplica	Não se aplica	Não Combina	Não se aplica	Não Combina	Não se aplica	No Unit				

TPH é uma medida quantitativa da quantidade mensurável de hidrocarbonetos à base de petróleo em um determinado meio ambiente, como solo ou água. Este parâmetro representa uma métrica bruta que representa a soma total de todos os hidrocarbonetos presentes, sem identificação específica de seus constituintes individuais. Com isso, o TPH não é um indicador direto de risco para humanos ou para o meio ambiente, mas sua medição é amplamente utilizada para avaliar a presença e a extensão da contaminação por hidrocarbonetos de petróleo em locais específicos (ATSDR, 2014).

A metodologia de análise de laboratório (USEPA SW846D 8015D/ 2003), avalia as concentrações de TPH Total em relação as concentrações de dois grupos de hidrocarbonetos: os Hidrocarbonetos Resolvidos de Petróleo (HRP) e a Mistura Complexa Não Resolvida (MCNR).

Neste sentido, o TPH-Resolvido se refere à quantificação dos hidrocarbonetos que são separados na análise cromatográfica. Já o MCNR se refere à quantificação da Mistura de Hidrocarbonetos de Petróleo que não são separados na análise cromatográfica (ATSDR, 2014).

Diante dos resultados apresentados no **Quadro 4.5-1**, percebe-se que alguns deles estão acompanhados de uma notação representada pela letra J. Esta se trata de um qualificador que sinaliza um problema específico não identificado na análise laboratorial (DEPARTAMENTO DE CONSERVAÇÃO AMBIENTAL DO ALASKA, 2019).

O qualificador “J” geralmente é aplicado sempre que a concentração medida é superior ao Limite de Detecção e inferior ao Limite de Quantificação, sob as condições experimentais estabelecidas para o método analítico (DEPARTAMENTO DE CONSERVAÇÃO AMBIENTAL DO ALASKA, 2019).

Assim, ao deparar-se com um resultado acompanhado do qualificador “J”, é possível interpretar que o analito foi identificado com algum tipo de contaminação. O qualificador "J" indica que um ou mais requisitos de controle de qualidade não atenderam aos critérios de aceitação exigidos, mas a instrumentação estava funcionando corretamente durante a análise. Os dados qualificados como "J" são considerados tendenciosos, mas proporcionam uma identificação definitiva do analito (EPA, 1996).

A partir das observações supracitadas, os parâmetros TPH Total, TPH Resolvido e MCNR das amostras EAS 01, EAS 02, EAS 04, EAS 05, EAS 06, EAS 07, EAS 08 e EAS 10, indicam que não há contaminação proveniente de hidrocarboneto de petróleo nessas amostras.

De forma relacionada, o parâmetro “Cromatograma combina com” se refere ao perfil da amostra para o método de TPH. Neste caso, para as amostras cujos são resultados são “não se aplica”, interpreta-se que os resultados para o método de TPH foram menores o que o Limite de Quantificação e, por isso, não apresentam um perfil de produto derivado de petróleo. Ao visualizar os resultados das amostras supracitadas, percebe-se então que todos os resultados de ambas as metodologias de busca apresentam valores baixíssimos ou nulos de TPH nas amostras, o que confirma a ausência de derivados de petróleo.

Apesar disso, nota-se nas amostras EAS 03 e EAS 09, a presença do qualificador “J”. Sobre isso, no que diz respeito à amostra EAS 03 o qualificador se encontra no resultado do parâmetro TPH Resolvido o valor aproximado de 17,120\*J mg/kg, valor este que está coerente os valores de 39 mg/kg do TPH Total e de 22 mg/kg do MCNR, considerando o arredondamento do valor da soma, uma vez que, o TPH Total é igual à soma do TPH Resolvido com o MCNR.

De uma forma semelhante, aconteceu com a amostra EAS 09, onde foram percebidos dois valores aproximados para TPH Total e para MCNR, sendo eles 15,275\*J e 12,273\*J mg/kg respectivamente, que também obedeceu a lógica da soma, considerando o arredondamento.

Portanto, ainda que, os resultados do cromatograma indiquem que as amostras EAS 03 e EAS 09 não apresentam um perfil de produto derivado de petróleo, o aparecimento do multiplicador “J”, indica que pode haver algum nível de contaminação no local, por estar acima do Limite de Detecção do equipamento do laboratório. Entretanto, esse dado não pode ser quantificado exatamente, uma vez que, está abaixo do Limite de Quantificação esperado.

À vista disso, indica-se que nas próximas etapas de estudo detalhado do Rodoanel Metropolitano BH, sejam realizadas no contexto dos Programas de Impactos Ambientais (Volume VII) campanhas de investigação especiais para Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs), que deverão ocorrer concomitantemente com a construção da rodovia.

## 4.6 Características Físico-químicas das Amostras de Água Subterrânea

No que se refere às amostras de água subterrânea, foram analisadas as características físico-químicas dos parâmetros em relação aos valores de investigação estabelecidos pela Deliberação Normativa COPAM nº 166 de 2011. Os resultados estão disponíveis no **ANEXO 16 - RODOANEL BH LAUDOS DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**.

Ao interpretar o **ANEXO 16 - RODOANEL BH LAUDOS DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS** (parâmetros químicos as amostras de água subterrânea), percebe-se que nenhum dos resultados obtidos se mostrou acima dos valores de investigação da DN COPAM 166/2011. Com isso as águas subterrâneas coletadas não apresentaram características de contaminação pelos parâmetros abordados pela referida legislação.

Para as amostras de água subterrânea também foi avaliada a presença de Hidrocarbonetos Totais de Petróleo (TPH), conforme metodologia USEPA SW846D 8015D/2003. Os resultados seguem mostrados no **Quadro 4.6-1**.

Com relação as análises de TPH, não foram identificadas fontes de contaminação das águas subterrâneas por hidrocarbonetos derivados de petróleo, uma vez que, os resultados dos parâmetros TPH Total, Hidrocarbonetos Resolvidos de Petróleo (HRP) e a Mistura Complexa Não Resolvida (MCNR) apresentaram resultados menores que 300 µg/L, sendo este o limite de quantificação para estes parâmetros de acordo com as condições de análises do laboratório.

Ao analisar o parâmetro “cromatograma combina com:” todos os resultados obtidos são “Não se Aplica”, cabendo a interpretação de que as amostras não apresentaram um perfil de produto derivado de petróleo no método de cromatografia gasosa, ou seja, não foi encontrada a presença de hidrocarbonetos derivados de petróleo nas amostras.



## 5 TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

Este item irá abordar os mecanismos de transporte de contaminantes, as premissas a serem adotadas para realização da modelagem matemática da bacia Vargem das Flores e os cálculos necessários para propor uma concentração inicial hipotética de transporte de contaminantes.

### 5.1 Mecanismos de transporte de contaminantes

Em meio subterrâneo, considera-se duas vias onde é possível o transporte de contaminantes: zona não saturada e zona saturada. Quando derramado no subsolo, o contaminante irá passar pela zona não saturada até atingir o a zona saturada, onde tem-se o lençol freático.

Ao passar pela zona não saturada e zona saturada, os contaminantes podem sofrer partição e se encontrarem em diferentes fases, como em fase livre (líquida ou sólida), fase dissolvida, em fase gasosa e/ou estar retidos nos sólidos do meio, em fase residual (adsorvida e sorvida). Dessa forma, os contaminantes se distribuem entre essas diferentes fases dependendo das suas propriedades e das condições do meio. Por fim, a transferência de massa entre fases ocorrerá até que sejam atingidas condições de equilíbrio químico.

Os principais contaminantes a serem considerados neste estudo, consistem em contaminantes orgânicos líquidos, conhecidos como NAPLs (do inglês *non-aqueous phase liquids*), cujas diferenças nas propriedades físicas e químicas resultam na imiscibilidade em água (Newell et al., 1995). Quanto à densidade, os compostos de NAPLs podem ser divididos em duas classes:

- Compostos de Fase Líquida Leve Não Aquosa – LNAPL, caracterizados por apresentarem densidade menor que a água. Estão comumente associados com a produção, refino e distribuição de produtos do petróleo, como a gasolina, diesel, azeite, querosene, acetona;
- Compostos de Fase Líquida Densa Não Aquosa – DNAPL, caracterizados por apresentarem densidade maior que a água. Estão relacionados a uma ampla variedade de atividades industriais e produtos, como os solventes (MATEUS, 2016).

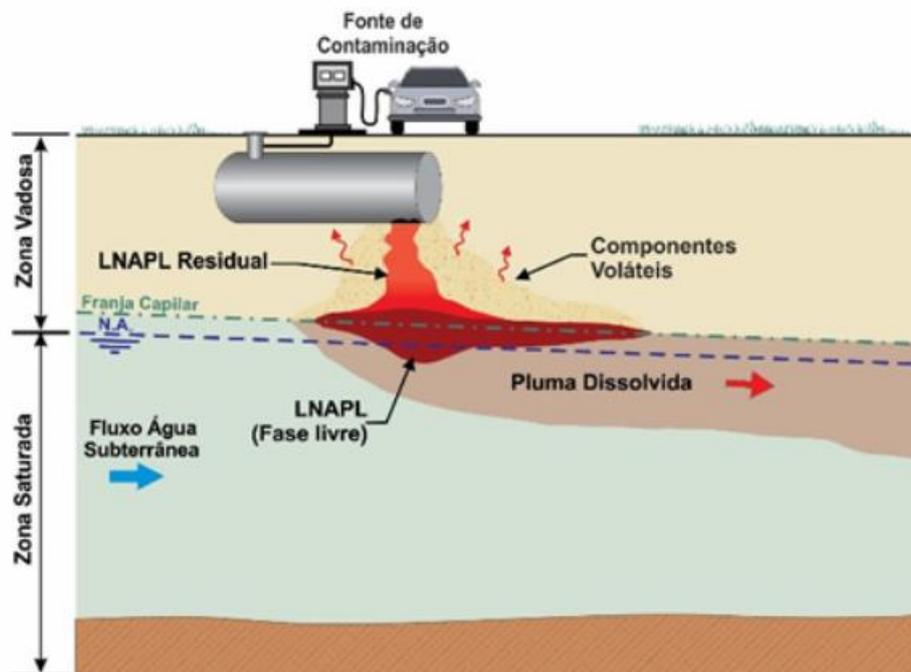
Mais especificamente, o objetivo será a realização de investigação e modelagem numérica de LNAPLs, que correspondem aos óleos e combustíveis derivados de petróleo, associados aos combustíveis utilizados para transportar veículos leves e pesados, que estão sujeitos ao derramamento em caso de acidente, além de óleos e graxas que são utilizados para manutenção.

Estes são contaminantes de elevada perigosidade, de difícil remoção e de longa duração, que devido à sua baixa solubilidade, podem formar uma fase oleosa (fase livre) na superfície. Quando infiltrados podem chegar à zona saturada do solo, flutuar sobre a superfície de águas subterrâneas ou percolar na zona inferior e causar problemas de contaminação de aquíferos rasos e/ou profundos por muitos anos (RAIMUNDO, 2013).

No caso de um vazamento, em subsuperfície, o LNAPL tende a migrar através da zona não saturada em fluxo descendente, deixando uma fração retida (fase residual) nos poros do solo (PARKER & ISLAM, 2000; GARCIA et al., 2021). Enquanto houver aporte suficiente, o LNAPL continuará migrando até encontrar o topo da zona saturada (franja capilar), onde, devido à sua menor densidade, passa a migrar lateralmente como uma fase contínua e móvel (fase livre), causando uma depressão da franja capilar e zona saturada (NEWELL et al., 1995; TOMLINSON et al., 2017;

GARCIA *et al.*, 2021). Isto posto, tem-se que o movimento do LNAPL na subsuperfície é descrito de forma simplificada na **Figura 5.1-1**.

No caso do NAPL, a fase oleosa (fase livre) pode ser composta por um único composto contaminante ou ser uma mistura de vários constituintes com diferentes propriedades, como é o caso da gasolina, que apresenta uma mistura de centenas de compostos. No entanto, NAPLs não são completamente insolúveis em água, e podem se dissolver em taxas lentas, resultando na contaminação da água subterrânea. Além disso, alguns compostos podem volatilizar contribuindo para geração da fase vapor. O transporte e o comportamento dos NAPLs em subsuperfície são controlados pela gravidade, forças viscosas e capilares.



**Figura 5.1-1 - Migração de LNAPL em meios porosos e detalhe da fase residual nas zonas não-saturada e saturada.**

Fonte: CETESB (2022).

Dessa forma, a diferença entre a fase livre e a residual será a mobilidade. Como a fase livre é móvel, poderá migrar para dentro de poços de monitoramento, por exemplo. Isso ocorre quando o volume do NAPL em relação ao volume de poros (saturação de NAPL) é suficiente para existir continuidade do produto nos poros. Assim, como a fase residual é imóvel, ela não irá apresentar continuidade e estará retida por forças capilares. Na zona não saturada, em geral, a fase residual está entre a água e o ar, na forma de filmes e anéis (**Figura 5.1-1**). Na zona saturada, a fase residual pode ter formato de bolhas, que podem ser formadas, por exemplo, quando a água ocupa um espaço previamente ocupado pelo NAPL, e separa e isola uma parte do produto do corpo do NAPL.

Quando ocorre um vazamento de LNAPL, sua migração na zona não saturada ocorre predominantemente na direção vertical, em fluxo descendente. O espalhamento lateral pode ocorrer pelo efeito de forças capilares e pela presença de heterogeneidades na litologia. Durante a migração nessa zona, o LNAPL desloca principalmente o ar (que possui maior mobilidade), mas uma pequena parcela de água também pode ser deslocada. Ao longo da sua migração, parte do NAPL fica retida como fase residual (**Figura 5.1-1**).

Quanto maior for o volume de produto vazado, o LNAPL continuará avançando em direção à zona saturada. À medida que o LNAPL atinge maiores profundidades, aumenta a saturação de água e a mobilidade do LNAPL diminui devido ao compartilhamento do espaço dos poros entre os dois fluidos (diminuição da permeabilidade relativa). Combinado a isso, a sua menor densidade em relação à água gera forças empuxo que fazem com que o LNAPL tenda a se acumular na zona da franja capilar, causando um espalhamento lateral. Se o volume do vazamento for grande o suficiente, a pressão de LNAPL aumenta e ele pode penetrar o nível d'água (NA), além de gerar um maior espalhamento lateral. Quando o fluxo descendente de NAPL cessa devido à exaustão da fonte de contaminação, o NAPL que se dissolveu ao atingir as profundidades abaixo do NA é deslocado pela água, mas a fase residual permanecerá na zona saturada.

Dessa maneira, entende-se que, a fase residual de uma fonte de contaminação do tipo LNAPL pode ser considerada como fonte contínua de contaminação, enquanto a fase dissolvida irá constituir a pluma de contaminação, que irá migrar em direção ao fluxo de águas subterrâneas.

## 5.2 Premissas e Restrições de Projeto

O transporte de contaminantes é determinado por processos básicos do tipo: advecção, dispersão mecânica, difusão molecular, sorção e decaimento. A advecção corresponde ao transporte da substância pelo fluido no qual ela se encontra, na mesma direção e sentido do fluxo do fluido, com velocidade igual à velocidade média do fluido.

A dispersão, corresponde a todos os processos que causam espalhamento dos contaminantes ao redor do centro de massa da pluma. Assim, a dispersão causa mistura com água subterrânea não contaminada, causando diluição e expansão da pluma de contaminação para zonas além das que seriam impactadas. A dispersão pode ocorrer na direção do fluxo do fluido, chamada de dispersão longitudinal, ou normal à direção do fluxo, sendo denominada de dispersão lateral ou transversal.

Para análise hipotética de cenários de contaminação, considera-se o processo de advecção como o principal mecanismo, sendo, inclusive, muito importante para a avaliação do transporte de partículas, que por sua vez, irá avaliar o caminho preferencial das partículas de um contaminante qualquer, aplicando as condições hidrogeológicas do meio físico inicialmente formulado, sem considerar características químicas intrínsecas de uma fonte em específico.

O modelo de transporte de partículas, a ser realizado pelo pacote MODPATH, foi inicialmente desenvolvido para tratar de problemas em regime permanente. Assim, o algoritmo de caminhamento das partículas, realiza as simulações em regime transiente usando uma série de períodos de fluxo em regime permanente (MENESCAL & CASTRO, 2004).

Já para uma avaliação de um contaminante de maneira mais precisa, seria necessário considerar os demais mecanismos de transporte. Devido inexistência de dados que confirmem quaisquer contaminantes na região de estudo da bacia Vargem das Flores, e de que o contexto do empreendimento é a fase de licenciamento ambiental para construção do Rodoanel Metropolitano de Belo Horizonte, considera-se a proposição de uma possível contaminação da região por derramamento acidental de gasolina, que contém Benzeno em sua composição, como um cenário crítico em termos ambientais e sociais para realização de uma simulação hipotética.

O Benzeno faz parte do grupo de contaminantes conhecidos por BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos), que são compostos voláteis extremamente tóxicos à saúde humana, apresentando toxicidade crônica mesmo em pequenas concentrações e sendo poderosos

depressores do sistema nervoso central, podendo, conforme apontado por Chiaranda (2006) ser transportados rapidamente através do solo e da água subterrânea devido a sua volatilidade e solubilidade. Dentre os BTEX, o benzeno é considerado o mais tóxico com padrão de potabilidade de 5 µg/l, segundo a PORTARIA GM/MS Nº 888 de 2021 do Ministério da Saúde, e, conforme descrito por Carfer (2013), trata-se de uma substância comprovadamente carcinogênica (podendo causar leucemia, ou seja, câncer dos tecidos que formam os linfócitos do sangue).

Somado a isso, a Lei Federal nº 8.723/1993, alterada pela Lei nº 13.033/2014, que dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores, permite elevar o percentual de álcool etílico anidro combustível para 27% à gasolina em todo território nacional. Tal medida integra a Política Nacional de Meio Ambiente, objetivando reduzir os níveis de emissões de monóxido de carbono e outros compostos poluentes por veículos no país. Entretanto, se por um lado essa estratégia traz benefícios para a qualidade do ar e contribui para a diminuição do aquecimento global e seus efeitos, por outro, ela traz malefícios em casos de vazamento desses combustíveis no solo.

No caso de derramamento de combustíveis, a presença de etanol na gasolina, é capaz de aumentar a transferência de BTEX para a fase líquida, por serem altamente solúveis de água. Em outras palavras, as interações entre o etanol e os compostos BTEX presentes na gasolina podem aumentar solubilidade, bem como a mobilidade dos BTEX em água subterrânea, além de dificultar a biodegradação natural dos BTEX, aumentando a persistência destes compostos na água subterrânea (CORSEUIL & MARINS (1997); CÂNDIDO, 2018).

Com relação ao diesel, tanto as análises de BTEX como as de HPA são relevantes, já que pesquisas relacionadas a derramamento de óleo diesel no país, mostram a existência de compostos monoaromáticos neste combustível (CORSEUIL et al., 2004). Segundo o KAIPPER (2003), a concentração de BTEX encontrada no óleo diesel é em torno de 11% em fração molar, sendo superior àquela encontrada na gasolina (~9%).

O modelo de transporte de contaminação por Benzeno, a ser realizado pelo pacote MT3DMS, foi desenvolvido para simular processos de advecção-dispersão e reações químicas de contaminantes em sistemas de fluxo de águas subterrâneas. O algoritmo realiza as simulações em regime transiente.

## 5.3 Determinação das Condições Iniciais

Para o modelo de transporte de contaminantes é necessário indicar as condições iniciais de concentração do contaminante para estabelecimento das condições de contorno. Em cenário hipotético, onde a fonte de contaminante é a gasolina comercial brasileira, tem-se como referência a fração e da concentração de equilíbrio entre as diferentes fases livre e dissolvida para alguns componentes BTEX (**Quadro 5.3-1**).

**Quadro 5.3-1 – Fração de alguns hidrocarbonetos monoaromáticos presentes na gasolina comercial brasileira.**

Combustível	Fração
Benzeno	0,0063
Tolueno	0,0341
o-Xileno	0,0141

Fonte: Adaptado CORSEUIL & FERNANDES (1999) e KAIPPER (2003).

Nota: <sup>1</sup> Considerando a Lei nº 13.033 de 2014 que permite adição de 27% de álcool à gasolina.

A Lei de Raoult (Equação 1), determina a maior concentração dissolvida dos compostos, a partir de sua solubilidade máxima em água e sua fração molar (BEDIENT *et al.*, 1997).

$$C_{W Raoult} = S_w \cdot X_i \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

$C_w$  Raoult é a concentração máxima do composto no volume de controle;

$S_w$  é a solubilidade do composto químico em água pura;

$X_i$  a fração molar do composto na mistura.

A solubilidade é um dos principais parâmetros que afetam a distribuição e transporte de compostos químicos no ambiente (Corseuil & Fernandes, 1999). De acordo com a bibliografia pesquisada, a solubilidade de alguns hidrocarbonetos monoaromáticos puros segue apresentada no **Quadro 5.3-2**.

**Quadro 5.3-2 – Solubilidade dos hidrocarbonetos monoaromáticos puros em água.**

Combustível	Solubilidade (mg/L)
Benzeno	1791,0
Tolueno	535,0
o-Xileno	175,0

Fonte: Adaptado HOWARD (1990) APUD CORSEUIL & FERNANDES (1999).

Para a determinação da concentração de equilíbrio na presença do etanol, aplica-se a expressão matemática indicada em Yalkowsky e Roseman, (2004) apud Corseuil e Fernandes (1999), conforme disposto na Equação 2.

$$\log S_m = \log(s \cdot x) + \beta \cdot f_c \quad \text{Equação 2}$$

Onde,

$S_m$  é a solubilidade do benzeno na interface (condição de contorno), ( $ML^{-3}$ );

$s$  é a solubilidade do benzeno em água ( $ML^{-3}$ );

$x$  é a fração molar do benzeno na gasolina (adimensional);

$\beta$  é o fator de co-solvência equivalente (adimensional)

$f_c$  é a fração volumétrica do etanol (adimensional).

Considerando-se o fator de co-solvência equivalente ( $\beta$ ) igual a 1,92 com base nos estudos desenvolvidos Távora (2010) e Corseuil e Fernandes (1999), a concentração de equilíbrio de Benzeno é a seguinte:

$$\log S_m = \log (s \cdot x) + \beta \cdot f_c$$

$$\log S_m = \log ( 1.791 \cdot 0,0063) + 1,92 \cdot 0,27$$

$$S_m = 36,52 \text{ mg/L}$$

Dessa forma, para uma fração de 27% de etanol em 73% de gasolina, a concentração de equilíbrio será de 36,52 mg/L.

Em um caso hipotético de tombamento de um caminhão-tanque que comporta até 50 mil litros de combustível e apresenta até 3 compartimentos para transporte de líquidos inflamáveis, que pode

conter: um para gasolina, outro para diesel e outro para álcool, estima-se que no caso do derramamento do compartimento contendo gasolina, com quantidade de, aproximadamente, 17 mil litros, resultaria em uma fonte de contaminação de Benzeno equivalente a 146 litros.

Portanto, nesse cenário hipotético pode-se concluir que uma fonte pontual de contaminação contendo o equivalente a 146 litros de Benzeno, irá acarretar uma pluma de contaminação fornecendo continuamente 36,52 mg/L de Benzeno até que se dissolva toda a massa da fonte.

Ressalta-se que, essa a equação de concentração de equilíbrio (Equação 2), já irá considerar a perda de massa na zona não-saturada para a realização da modelagem matemática do transporte de Benzeno.

Com relação ao parâmetro de dispersão, podem ser adotadas as clássicas relações de Fetter (1992), sendo dispersividades longitudinal igual a 10 m.

A partir dessa definição, pode ser estabelecida a análise de dispersão da pluma de Benzeno da fase dissolvida, que fornecerá boa estimativa para mobilidade de um contaminante, que pode migrar para dentro de poços existentes na região ou para o reservatório Vargem das Flores.

## 6 MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO

Os modelos matemáticos são considerados excelentes ferramentas para auxiliar na gestão dos recursos hídricos e para modelar transporte de contaminantes em uma determinada região de interesse. Neste trabalho foi estudada a região da bacia Vargem das Flores por meio do software Visual MODFLOW Flex versão 9.0, considerando modelo tridimensional em um domínio hidrogeológico de aquíferos raso e profundo e em regime estacionário.

Para subsidiar a elaboração do modelo matemático foram utilizados os levantamentos de dados primários e secundários, para que fosse possível estabelecer condições de contorno específicas e realizar calibração do modelo.

### 6.1 Características Construtivas do Modelo

#### 6.1.1 Área de Estudo e Dados de Entrada

Inicialmente foi feita a definição dos objetivos do modelo, definiu-se tipo de fluxo saturado com densidade constante e foi inserida a data inicial como sendo em dezembro de 2023, que foi a data de início da modelagem, tendo em vista que, não foi identificada nenhuma fonte de contaminação pré-existente pelos resultados do levantamento de dados primários.

A delimitação da região de estudo foi realizada por meio da inserção do polígono da bacia Vargem das Flores.

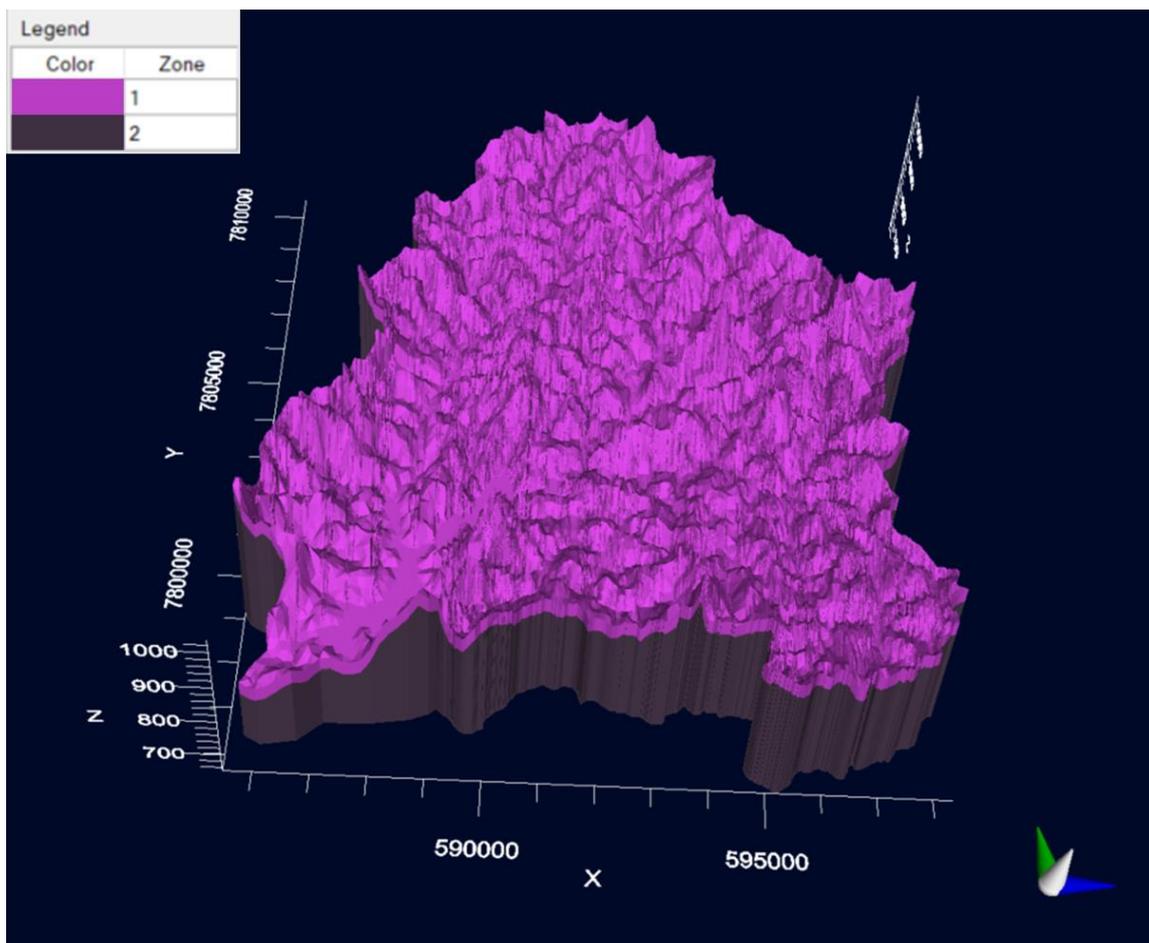
A base topográfica ALOS-PALSAR (06/2022) da bacia Vargem das Flores com curvas de nível de nível de resolução de 12 m x 12 m foi utilizada como topo do solo. A partir disso, foi utilizada a ferramenta *raster calculator* no *software* ArcGIS para obter a profundidade relativa ao contato

litológico de interesse saprolito/rocha utilizando a mesma base topográfica ALOS-PALSAR (06/2022).

Essa etapa foi necessária, devido à falta de dados de furos de sondagem para obtenção do contato litológico entre os materiais de solo, saprolito e rocha. Assim, as profundidades das camadas foram estimadas por meio dos perfis litológicos obtidos em poços tubulares cadastrados na SIAGAS/CPRM e apresentados no **ANEXO 15 - RODOANEL METROPOLITANO BH MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEITUAL VARGEM DAS FLORES**.

Em seguida, foram importados o restante dos dados utilizados na construção do modelo conceitual, que foram a hidrografia, a área do reservatório de Vargem das Flores, as estruturas e os poços de observação. Além disso, foi definida a base litológica do modelo, como sendo aquele encontrado nos poços tubulares mais profundos do cadastro existente.

Assim, foram criadas duas zonas tridimensionais, a primeira relacionada ao aquífero granular que se inicia na base topográfica (El. 0,00 m) e vai até o contato litológico saprolito/rocha (El. 36,00 m) e a segunda que se inicia nesse último e vai até a base (El. 100,00 m). As zonas associadas aos aquíferos granular e fraturado são mostradas na **Figura 6.1-1**.

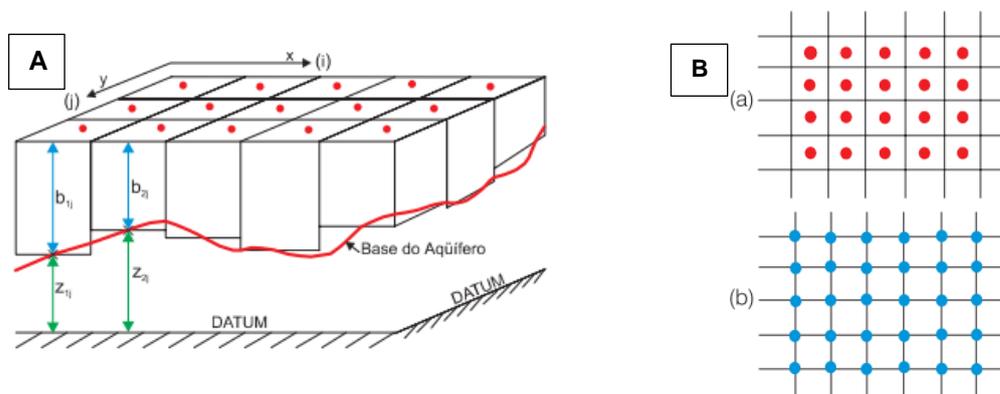


**Figura 6.1-1 – Zonas 1 e 2 relacionadas aos sistemas aquíferos granular e fraturado do Complexo Granito-gnáissico da bacia Vargem das Flores.**

## 6.1.2 Malha Numérica

Para simulação, são empregadas malhas numéricas para discretização espacial da região do fluxo da área de estudo. No caso do *software* MODFLOW, é utilizada a metodologia de diferenças finitas para estruturação da malha. Assim, durante o processo de simulação, as variáveis como cargas hidráulicas e as propriedades hidrogeológicas serão associadas de maneira distinta para cada elemento. Dessa maneira, a modelagem poderá trabalhar as complexidades e/ou propriedades de maneira singular com boas aproximações.

O método de diferenças finitas (**Figura 6.1-2**) de um sistema aquífero tridimensional, utiliza o código com bloco centrado, denominado MODFLOW (MCDONALD & HARBAUGH, 1988 *apud* GONÇALVES, 2015), e é visualizado na interface gráfica do *Visual MODFLOW* em sua versão 9.0, desenvolvido pela *Waterloo Hydrogeologic Inc.*



**Figura 6.1-2 – Malhas em diferenças finitas. A- Malha em diferenças finitas para estudo bidimensional. B (a) – malha centrada no meio da célula; (b) malha centrada nos vértices da célula.**

Fonte: Cabral e Demetrio (2008)

Segundo Cabral e Demetrio (2008), neste método é feita a discretização dos pontos do domínio modelado, ou nós, onde cada nó representa a porção limitada do aquífero a ser modelado, de modo que os parâmetros atribuídos a um nó são considerados constantes para a região da célula/quadrícula. Logo, quanto maior o número de pontos, mais próximo da realidade estará o modelo. Os modelos hidrogeológicos numéricos têm como objetivo o cálculo do valor da carga hidráulica em cada nó.

A partir da Lei de Darcy e da conservação de massa, a equação diferencial parcial, de segunda ordem aplicada em três dimensões (x, y e z), pode ser utilizada para simular os fluxos de água subterrânea em regimes transientes conforme a Equação 2 (BATISTA, 2010; CÂNDIDO, 2018; RAMPONI, 2019).

$$K_X \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_Y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_Z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \mp W \frac{\partial h}{\partial t} = Ss \quad \text{Equação 2}$$

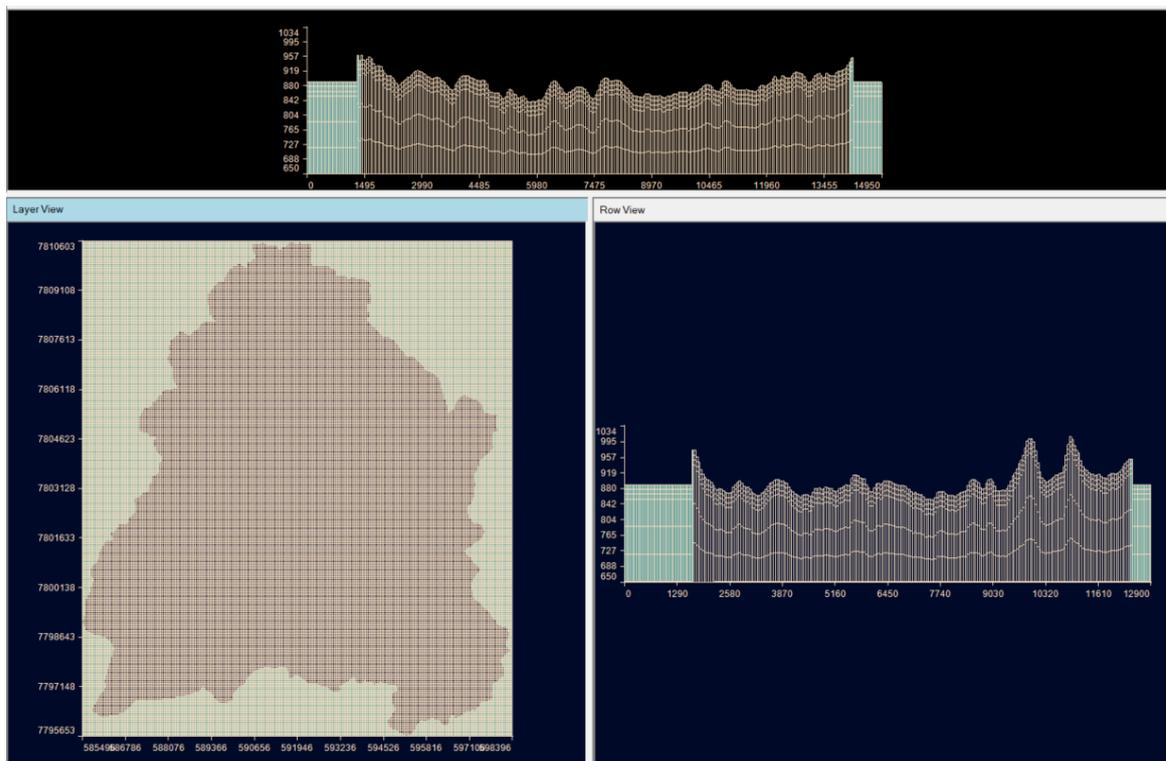
Sendo,

$K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$ : condutividade hidráulica nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente;  $S_s$ : armazenamento específico;  $t$ : tempo;  $W$ : fluxo por unidade de volume, representando fontes e/ou sumidouros de água.

Levando em consideração o regime permanente da água subterrânea em um meio isotrópico e heterogêneo, em que as condutividades hidráulicas podem ser diferentes a depender da direção, obtém-se a Equação 3.

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + W = 0 \quad \text{Equação 3}$$

Como resultado do dimensionamento da malha no modelo numérico foi obtido um *grid* do tipo deformado (**Figura 6.1-3**), composto por 256 colunas, 298 linhas e 3 *layers* em cada zona, o que resultou em células de tamanho 50m x 50m em planta.



**Figura 6.1-3 – Configuração da malha adotada no modelo numérico. Figura extraída do modelo construído no MODFLOW.**

### 6.1.3 Fluxo, Carga Hidráulica e Condições de Contorno

Para a delimitação do modelo numérico considerou-se os contornos físicos e hidráulicos definidos no modelo conceitual. Foi aplicada uma abordagem de meio poroso equivalente ao aquífero raso associados aos solos e saprólitos existentes na região superior e abordagem considerando meio fraturado equivalente ao aquífero profundo associado as rochas cristalinas pertencentes ao complexo granito-gnássico do Complexo Belo Horizonte.

Foram adotadas condições de contorno do tipo carga inicial, sendo esta equivalente a 1.200,0 metros, para todo o modelo, uma vez que, as maiores cota de elevação da topografia estão em torno deste valor. Considera-se esse valor conservador do ponto de vista de modelagem.

Em seguida foi adicionada condição carga hidráulica constante, equivalente a 835,0 metros para o contorno do reservatório de Vargem das Flores, do qual foi obtido a partir da observação de cotas de elevação médias da topografia ALOS-PALSAR (06/2022) da bacia Vargem das Flores. Assim, o lago funciona como reguladora do fluxo de água subterrânea. A cota é mantida 835,0 m constante para atuar como barreira hidráulica, o que impede que o fluxo ocorra preferencialmente do aquífero para o lago. Como não há dados de topografia do lago ou dados de levantamento batimétrico, não foi possível interpolar o fundo do lago.

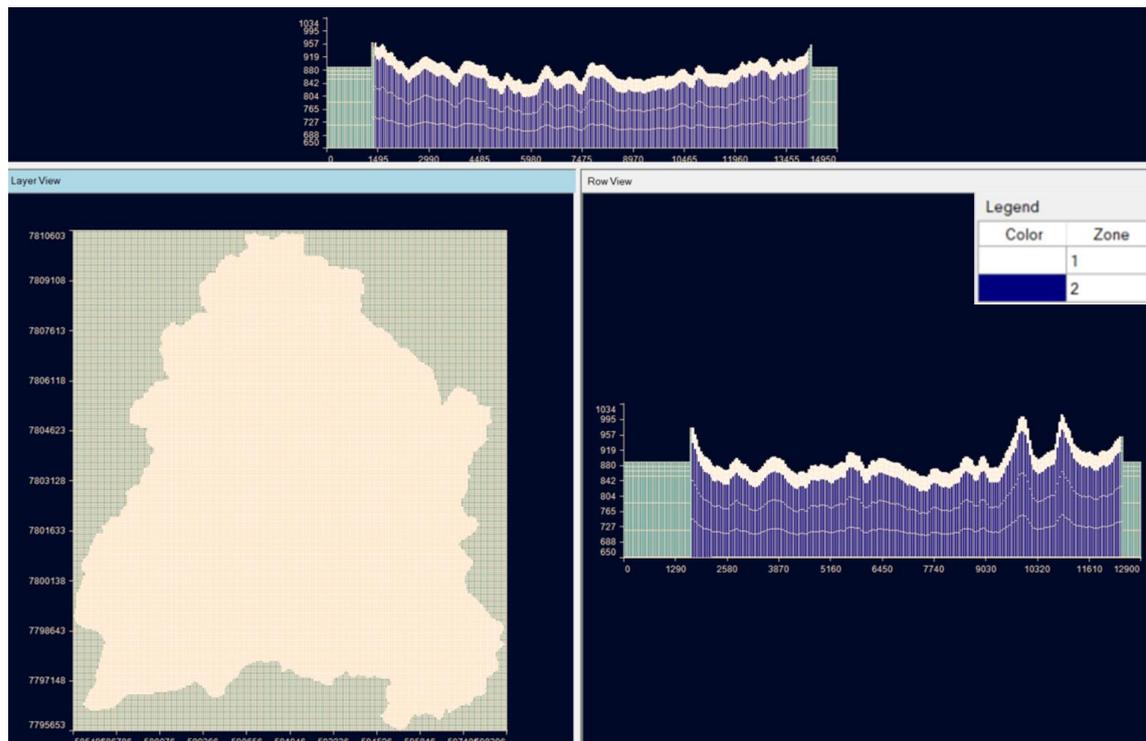
Não há dados de teste de bombeamento ou teste de vazão disponíveis na área de estudo, que pudessem ser aplicados na modelagem matemática. Estes dados forneceriam uma garantia com relação aos parâmetros hidráulicos que estão sendo utilizados no modelo. Apesar da existência de dados de bibliografia, estes parâmetros podem ser confirmados ou revisados na presença de resultados de testes de bombeamento em poços. Portanto, os parâmetros hidráulicos apresentados nesse relatório estão sendo estimados e poderão ser revisados caso novos dados sejam adquiridos.

Os horizontes definidos entre a topografia e o contato litológico e entre o contato litológico e a base, contaram com três layers cada, para as quais foram adotados valores de condutividade hidráulica (K) considerando as direções x, y e z, conforme **Quadro 6.1-1**. A Zona 1 corresponde ao aquífero freático e possui condutividades hidráulicas superiores às observadas na Zona 2, que corresponde ao aquífero fraturado.

**Quadro 6.1-1 – Valores de condutividade hidráulica (K) adotados para as direções x, y e z para as Zonas 1 a 6.**

Condutividade hidráulica	Zona 1	Zona 2
Kx	1E-04	1E-06
Ky	1E-04	1E-06
Kz	1E-05	1E-07

A Figura 6.1-4 apresenta a visualização da Distribuição das condutividades hidráulicas adotadas para as zonas 1 e zona 2.



**Figura 6.1-4 – Distribuição das condutividades hidráulicas adotadas para as zonas 1 e zona 2. Figura extraída do modelo construído no MODFLOW.**

Definiu-se a recarga, ou condição de contorno de fluxo especificado, para a qual adotou-se segundo a bibliografia, a porcentagem de 10% do valor da precipitação, logo 1575,8 mm. Entretanto, a partir de diversas tentativas de calibração esse valor foi alterado para 148,0 mm, que mostrou ser mais adequado para a região específica da bacia Vargem das Flores.

Inseriu-se também, a condição de contorno relacionada aos córregos, representados no modelo por meio de drenos, que segundo Gonçalves (2015), são capazes de remover um fluxo do sistema, mas somente, exercem sua função quando a carga hidráulica calculada do aquífero está acima da altura especificada para o dreno. Inferiu-se o sistema de drenos a partir do refinamento de rios e/ou córregos de primeira, segunda e terceira ordem no *software* ArcGIS, que foram ajustados na topografia e aplicados na zona 1, que corresponde a zona mais superficial do modelo. Cada dreno recebeu condutância equivalente a 5 m<sup>2</sup>/dia.

A **Figura 6.1-5** mostra a visualização das condições de contorno adotadas para simulação do comportamento hidrogeológico do Sistema Aquífero granito-gnáissico da bacia Vargem das Flores.

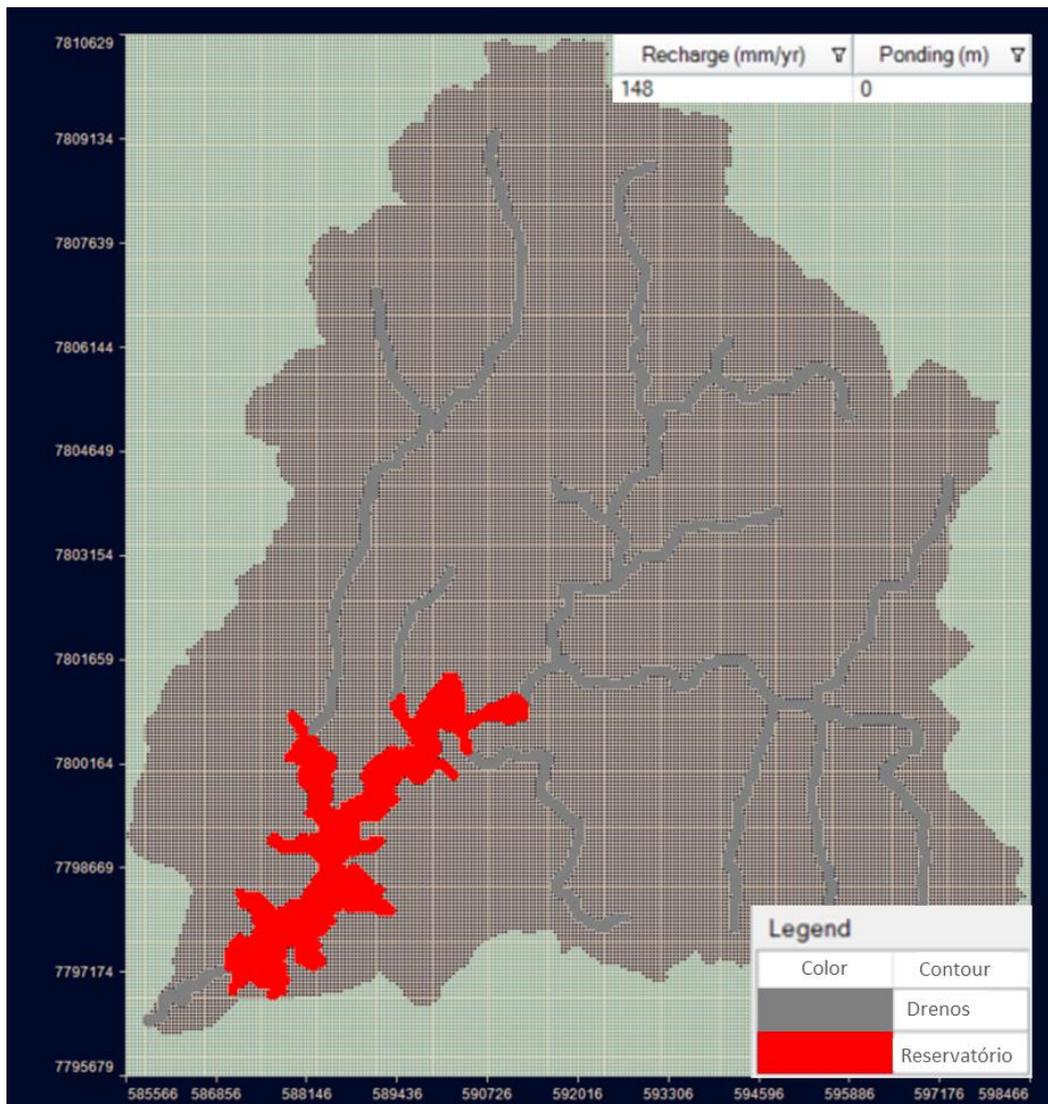


Figura 6.1-5 – Visualização das condições de contorno adotadas para simulação do comportamento hidrogeológico do Sistema Aquífero granito-gnáissico da bacia Vargem das Flores.

A partir das definições apresentadas acima, seguiu-se para tradução do modelo matemático utilizando o pacote MODFLOW-NWT e execução do modelo inicial para fins de calibração.

## 6.2 Calibração do Modelo Numérico

A calibração é um processo de ajuste dos parâmetros de entrada do modelo numérico, com o intuito de atingir um grau adequado de correspondência entre as condições simuladas numericamente e o sistema natural de fluxo. Ao mesmo tempo, as condições de contorno utilizadas devem respeitar o modelo conceitual pré-estabelecido (**ANEXO 15 - RODOANEL METROPOLITANO BH MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEITUAL VARGEM DAS FLORES**).

O modelo numérico foi calibrado em regime estacionário, atualizando as condições de contorno à luz dos conhecimentos atuais apresentados nos capítulos anteriores. Durante esta calibração foram

ajustadas as condutividades hidráulicas das unidades hidroestratigráficas, a recarga e os valores de condutância dos drenos.

Este grau de calibração é quantificado por diversos parâmetros numéricos e estatísticos, dentre os quais o mais utilizado é o nRMS (média quadrática dos erros normalizada), erro percentual normalizado estimado a partir da diferença entre o valor de carga hidráulica observado em campo e o valor simulado no modelo, onde considera-se adequado um erro inferior a 10% para uma calibração bem-sucedida.

Não há poços de monitoramento ativos instalados para serem utilizados na calibração do modelo matemático na área de estudo de Vargem das Flores. Portanto, para a calibração do modelo numérico foram utilizados inicialmente as cargas hidráulicas de 17 (dezesete) poços provenientes do banco de dados de poços tubulares disponíveis no cadastro do SIAGAS/CPRM (conforme detalhado no **ANEXO 15 - RODOANEL METROPOLITANO BH MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEITUAL VARGEM DAS FLORES**, dos quais podem apresentar dados defasados devido as informações existentes serem da data em que os poços foram instalados, e não receberam atualização conforme o tempo de observação de nível d'água (alvos de calibração),

Após diversas tentativas de calibração do modelo, em que foram testadas diferentes permeabilidades hidráulicas ( $k_x$ ,  $k_y$  e  $k_z$ ) para ambos os aquíferos freático e fraturado, chegou-se aos valores consolidados na **Quadro 6.1-1**, que inclusive estão dentro do esperado de acordo com as referências bibliográficas utilizadas (**Quadro 2.3-1**).

Entretanto, além disso, observou-se a necessidade de adicionar mais uma condição de contorno, que permitisse calibrar as leituras observadas nos poços de observação com os valores calculados pelo modelo. Tais resultados são apresentados por meio do gráfico de dispersão do painel de calibração (Calibration Dashboard) do modelo matemático.

Assim, adotou-se a condição de contorno do tipo *General Head Boundary* (GHB) nas proximidades do reservatório Vargem das Flores e na região mais elevada da bacia (**Figura 6.2-1**), para equilibrar o fluxo de entrada e saída da área de estudo. Essa condição foi necessária como uma forma de calibração do modelo, tendo em vista que os poços de observação inseridos na modelagem numérica apresentavam cargas hidráulicas acima do inicialmente calculado. A modelagem numérica realizada no *software MODFLOW* segue os princípios da Lei de Darcy e, dessa forma, o GHB tem condutância calibrada de forma que o fluxo de saída calculado pelo modelo seja similar ao obtido por essa lei.

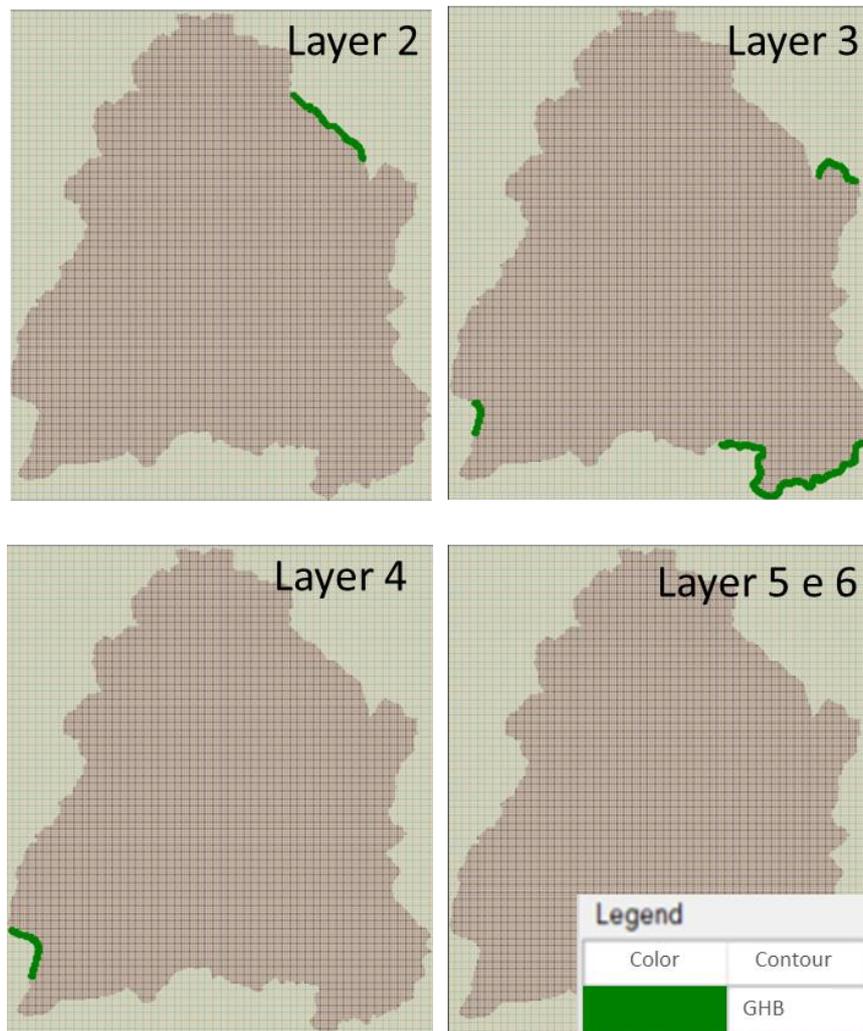


Figura 6.2-1 – Visualização da condição de contorno do tipo General Head Boundary (GHB) nas proximidades do reservatório Vargem das Flores e na região mais elevada da bacia.

Nas demais regiões onde não há informações sobre as cargas hidráulicas, não foi possível realizar calibração e por isso não foram adicionadas condições de contorno do tipo *General Head Boundary* (GHB). Após a finalização da etapa de calibração, os resultados obtidos em regime permanente poderão ser discutidos e avaliados.

### 6.3 Resultados em Regime Permanente

As condições de contorno e calibração inseridas no modelo hidrogeológico matemático da bacia Vargem das Flores foram traduzidas e interpretadas por meio do pacote NWT. O resultado obtido que permite observar, com boa aproximação, a distribuição dos níveis de água no sistema aquífero granular e fraturado do complexo granito-gnáissico de Vargem das Flores é mostrado na **Figura 6.3-1**.

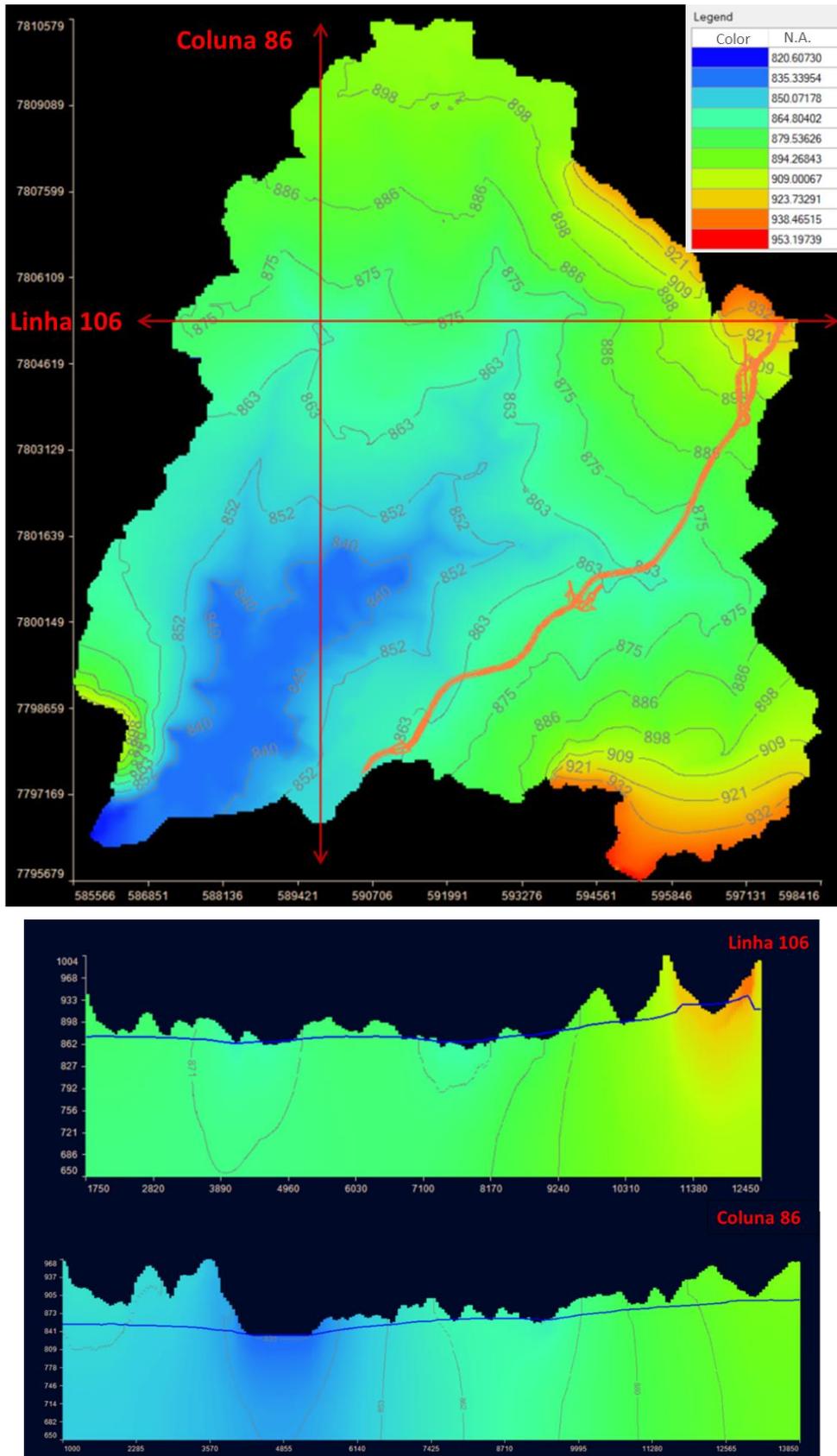
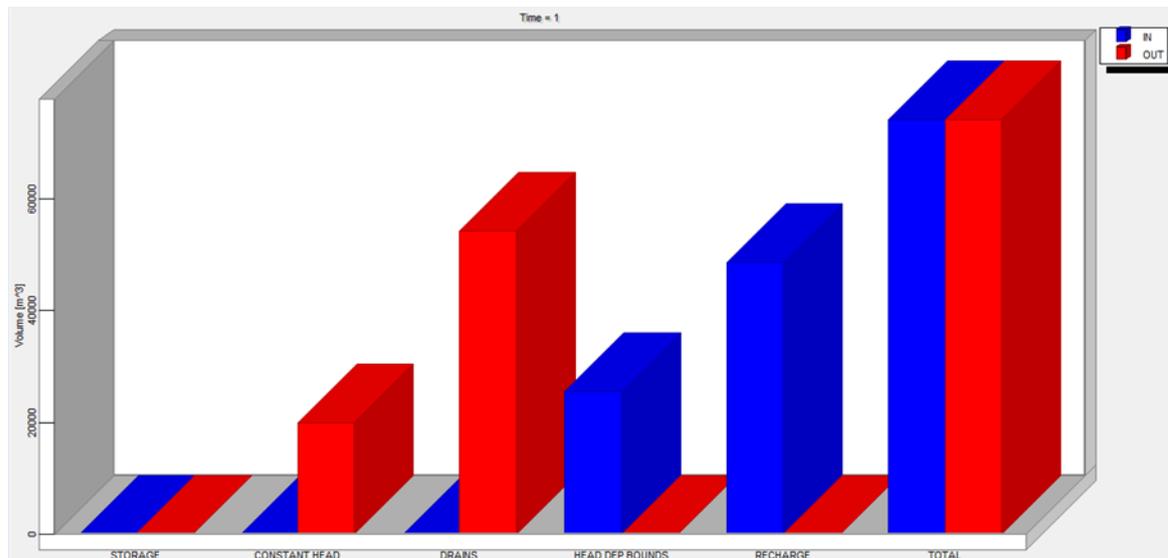


Figura 6.3-1 – Resultado do modelo hidrogeológico matemático do sistema aquífero granular e fraturado do complexo granito-gnáissico de Vargem das Flores.

A **Figura 6.3-1**, evidencia os níveis de água variando da Cota El. 953,0 m a El. 820,0 m, aproximadamente. Assim, estima-se encontrar lençol freático mais profundo a 80,0 m de profundidade e, mais rasos a 10,0 m de profundidade, aproximadamente. O gradiente hidráulico obtido é de 1,16.

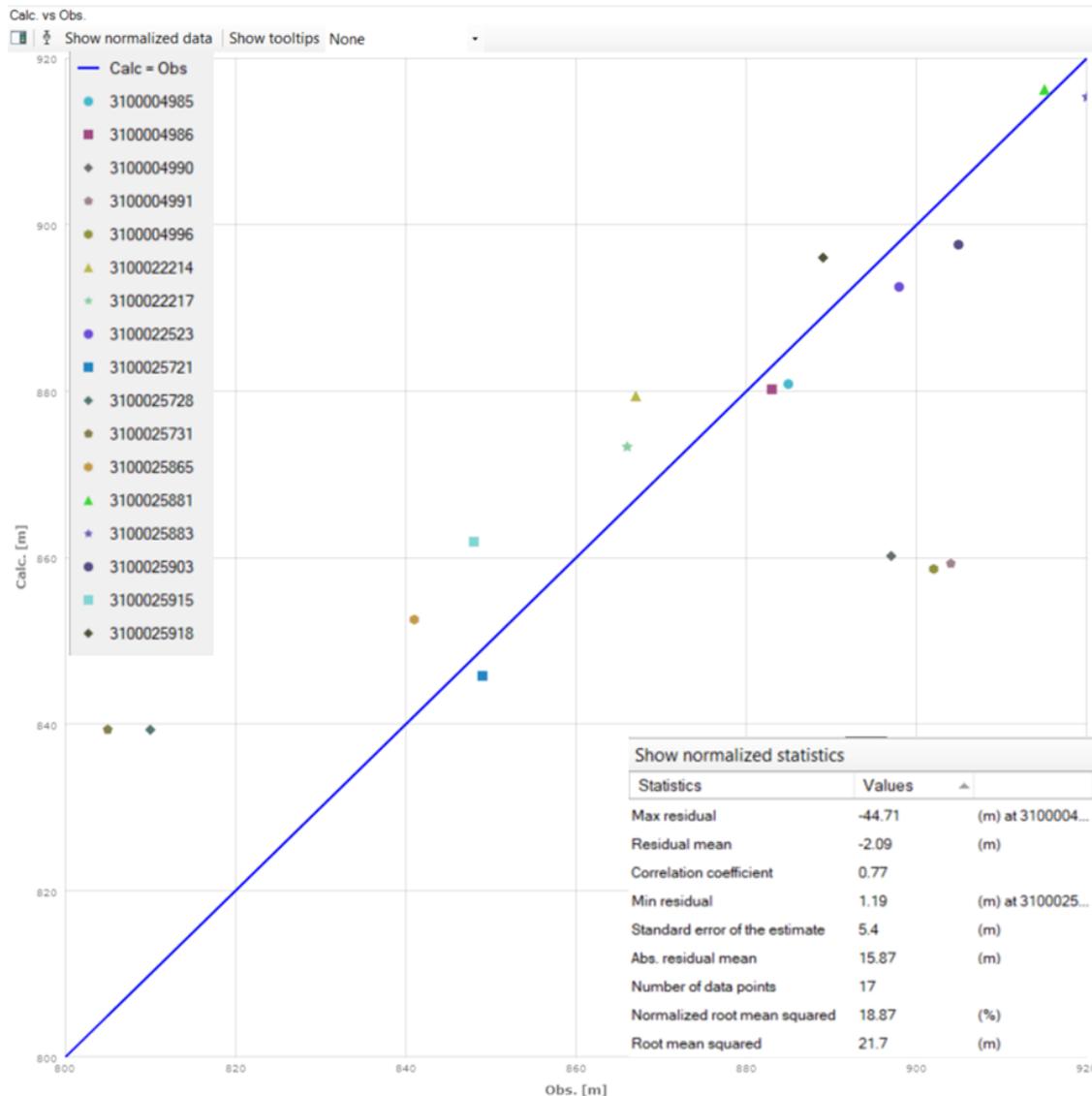
Estes valores encontram-se substancialmente próximos daqueles encontrados no **ANEXO 15 - RODOANEL METROPOLITANO BH MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEITUAL VARGEM DAS FLORES**, o que indica que os resultados obtidos em ambos os modelos são satisfatórios.

A **Figura 6.3-2** mostra a síntese do balanço hídrico, tendo por base os dados de carga hidráulica constante, drenos, GHBs e recarga inseridos na modelagem matemática. Observa-se que os volumes de água calculados para as entradas e saídas são iguais, indicando que o modelo é representativo com relação ao balanço de massa e a representação adequada dos fluxos superficiais e subterrâneos existentes, considerando um regime permanente proposto para essa etapa de modelagem.



**Figura 6.3-2 – Balanço Hídrico do modelo Hidrogeológico matemático do sistema aquífero granular e fraturado do complexo granito-gnáissico de Vargem das Flores.**

O Gráfico de dispersão Calculado vs. Observado representa a comparação entre os valores calculados e observados por meio de uma tabela de dados dinâmicos. Este gráfico indica os valores calculados pelo modelo (eixo Y) e os valores observados ou medidos em campo (eixo X). A situação em que todos os pontos de dados estão na linha Calc.=Obs., representariam um cenário de calibração ideal, mas geralmente não é provável que isso aconteça ao desenvolver modelos reais. Se os pontos de dados aparecerem acima da linha Calc.=Obs., então os valores calculados são maiores que os valores observados e o valor residual de calibração é positivo, indicando que o modelo apresenta cargas hidráulicas acima do esperado. Se os pontos de dados estiverem abaixo da linha Calc.=Obs., então os valores calculados são menores que os valores observados e o valor residual de calibração é negativo, indicando que o modelo está apresentando cargas hidráulicas subestimadas. A **Figura 6.3-3** indica o resultado obtido para a simulação do comportamento hidrogeológico do Sistema Aquífero granito-gnáissico da bacia Vargem das Flores, indicando que o modelo obtido está subestimando as cargas hidráulicas.



**Figura 6.3-3 – Gráfico de dispersão Calculado vs. do painel de calibração obtido após simulação do comportamento hidrogeológico considerando 17 (dezessete) poços de observação proveniente do cadastro do SIAGAS/CPRM.**

A raiz do erro quadrático médio (RMS) é uma medida da variância dos resíduos do modelo. Esse dado estatístico é capaz de mensurar se o modelo fornece um bom ajuste entre os valores calculados e observados. O RMS é definido pela Equação 3.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2}$$

Equação 4

onde:

n é o número de observações

R<sub>i</sub> é o i-ésimo residual

Já a Raiz Média Quadrática Normalizada (NRMS) é o RMS dividido pela diferença máxima nos valores de carga observados, é expresso como uma porcentagem e é uma medida de ajuste mais representativa do que o RMS padrão, pois leva em conta a escala do intervalo potencial de valores de dados. O NRMS é expresso pela Equação 4.

$$NRMS = \frac{RMS}{(X_{obs})_{max} - (X_{obs})_{min}} \cdot 100 \quad \text{Equação 5}$$

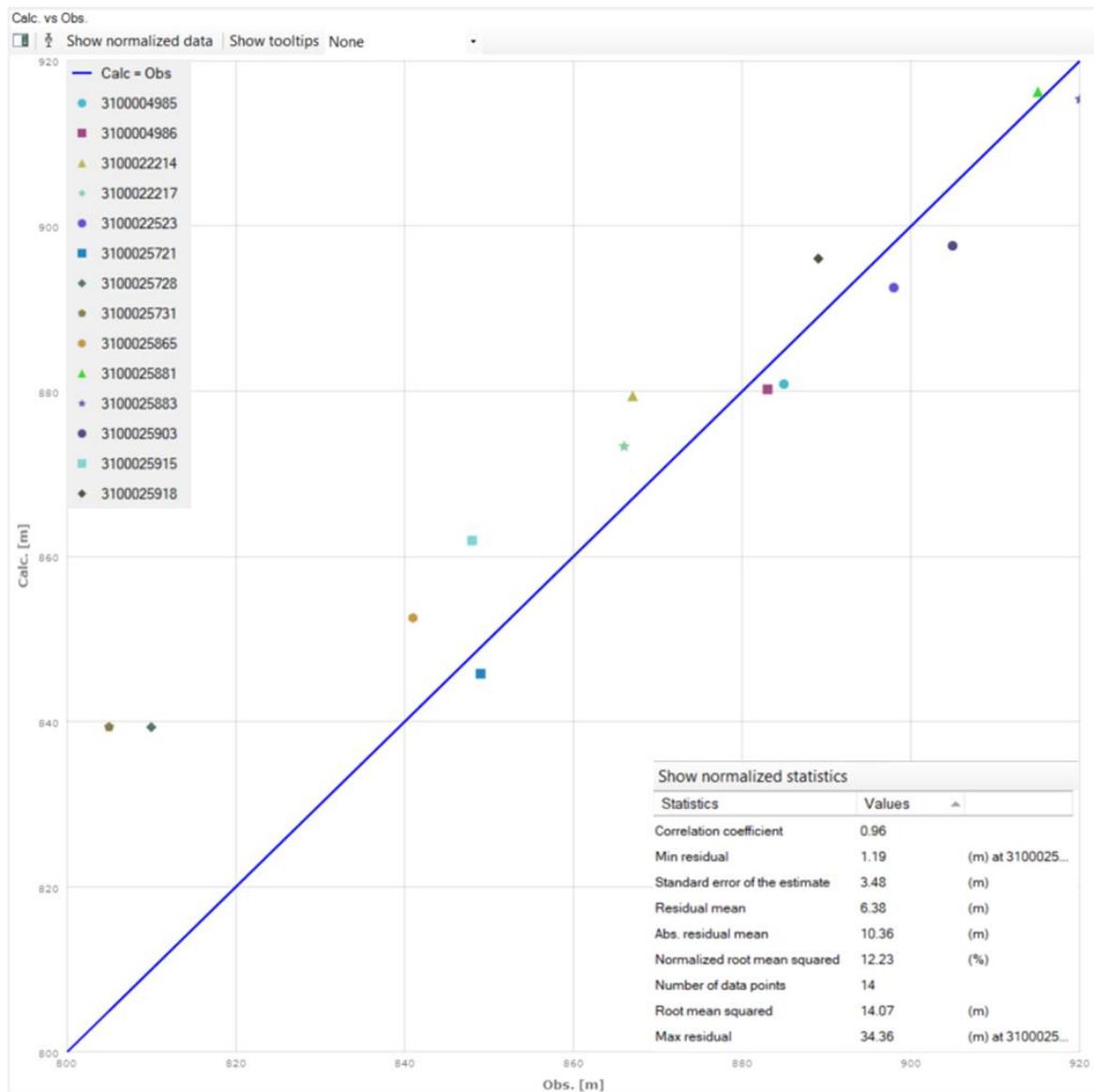
Onde,  
RMS é o erro quadrático médio (descrito acima);  
 $X_{obs}$  é o valor medido/observado.

Nota-se que o NRMS obtido para o gráfico de dispersão apresentado na **Figura 6.3-3** foi de 18.87%, evidenciando que os valores calculados apresentam diferenças significativas do observado para o cadastro dos poços tubulares do SIAGAS/CPRM.

Estima-se que, este resultado ocorreu em virtude da impossibilidade de adicionar condições de contorno do tipo General Head Boundary (GHB) para a calibração das cargas hidráulicas observadas nos poços 3100004990, 3100004991 e 3100004996 localizados na região central da bacia. No caso destes poços, as cargas hidráulicas estão abaixo das demais plotadas no modelo, indicando que na região central, as cargas hidráulicas apresentam estar menores do que o restante da bacia. Acredita-se que por estes poços terem sido instalados em data (1990 e 1988) muito diferente da maioria dos demais poços, os valores de carga hidráulica estejam subestimados em relação aos dados observados entre 2009 e 2016.

Além deste valor, é possível verificar a discrepância do modelo pelo resultado do coeficiente de correlação ( $R^2$ ), que representa a medida de ajuste de um modelo estatístico linear generalizado. O valor encontrado de 0,77 e está abaixo do esperado (>0,90).

Portanto, entende-se que esses poços de observação podem ser tratados como valores outliers no modelo matemático. Assim, ao desconsiderar os poços 3100004990, 3100004991 e 3100004996 do gráfico de dispersão, nota-se uma melhora significativa da estatística do modelo matemático, o novo resultado obtido segue apresentado na **Figura 6.3-4**.



**Figura 6.3-4 – Gráfico de dispersão Calculado vs. do painel de calibração obtido após simulação do comportamento hidrogeológico considerando 14 (quatorze) poços de observação proveniente do cadastro do SIAGAS/CPRM.**

A partir da **Figura 6.3-4**, observa-se que o NRMS obtido para o gráfico de dispersão apresentado foi de 12,23%, com coeficiente de correlação ( $R^2$ ) igual a 0,96, que está dentro do valor esperado para uma análise estatística.

Após atingir  $R^2$  representativo para o modelo matemático, entende-se que o modelo está adequado para a realização das próximas etapas de modelagem matemática. Ressalta-se que a falta de dados primários, como resultados de testes de bombeamento ou dados de poços de monitoramento, bem como a baixa quantidade de dados secundários, associado a discrepância de datas de teste entre os poços disponíveis, impedem a obtenção de um modelo com NRMS menor que 10%, que associado ao  $R^2$  seria considerada como situação ideal.

Uma vez calibrado, um modelo numérico hidrogeológico se apresenta como uma ferramenta apropriada à simulação de cenários diversos que venham a trazer alterações no comportamento

hidrogeológico de uma determinada área. Após o modelo numérico de fluxo subterrâneo estar concluído, a próxima etapa de consistirá em um modelo numérico de transporte de contaminantes considerando a simulação de diversos cenários.

## 6.4 Cenários do Transporte de Contaminantes

O fornecimento da condição inicial da distribuição da contaminação é uma etapa necessária para a construção de um modelo numérico de transporte. Conforme os resultados apresentados no item 4, inicialmente não foram encontradas nenhuma fonte de contaminação nos pontos de solo e água subterrânea amostrados no contexto da bacia Vargem das Flores.

Assim, a proposição de hipóteses de contaminação será considerada como uma possível situação futura, caso durante as fases de implantação e operação ocorra algum acidente que envolva derramamento de compostos químicos tais como óleos e graxas, hidrocarbonetos derivados de petróleo, pesticidas, dentre outros.

Para todos os cenários são avaliadas a propagação de contaminante dissolvido em período de 1 ano, 5 anos e 10 anos após ocorrência do acidente. Assim são considerados 18 cenários de simulação, a saber:

- Previsão de transporte de partículas pelo pacote MODPATH em duas possíveis fontes:
  - Traçado da rodovia;
  - Canteiro de Obras 03;
- Previsão de transporte de contaminante do tipo Benzeno pelo pacote MT3D em duas possíveis fontes:
  - Ponto 01 - traçado da rodovia onde há captura de partículas pelo dreno;
  - Ponto 02 - traçado da rodovia onde há captura de partículas pelo dreno;
  - Ponto 03 - traçado da rodovia onde há captura de partículas pelo dreno;
  - Canteiro de Obras 03;

O benzeno foi selecionado por estar presente na gasolina brasileira, que contém valor significativo de álcool etílico, conforme estabelecido pela Lei nº 13.033/2014, que fixa em 27% o percentual obrigatório de adição de álcool etílico anidro combustível à gasolina em todo território nacional. Assim uma contaminação por benzeno, será considerada proveniente de um acidente com caminhões-tanque de transporte e armazenamento de combustíveis.

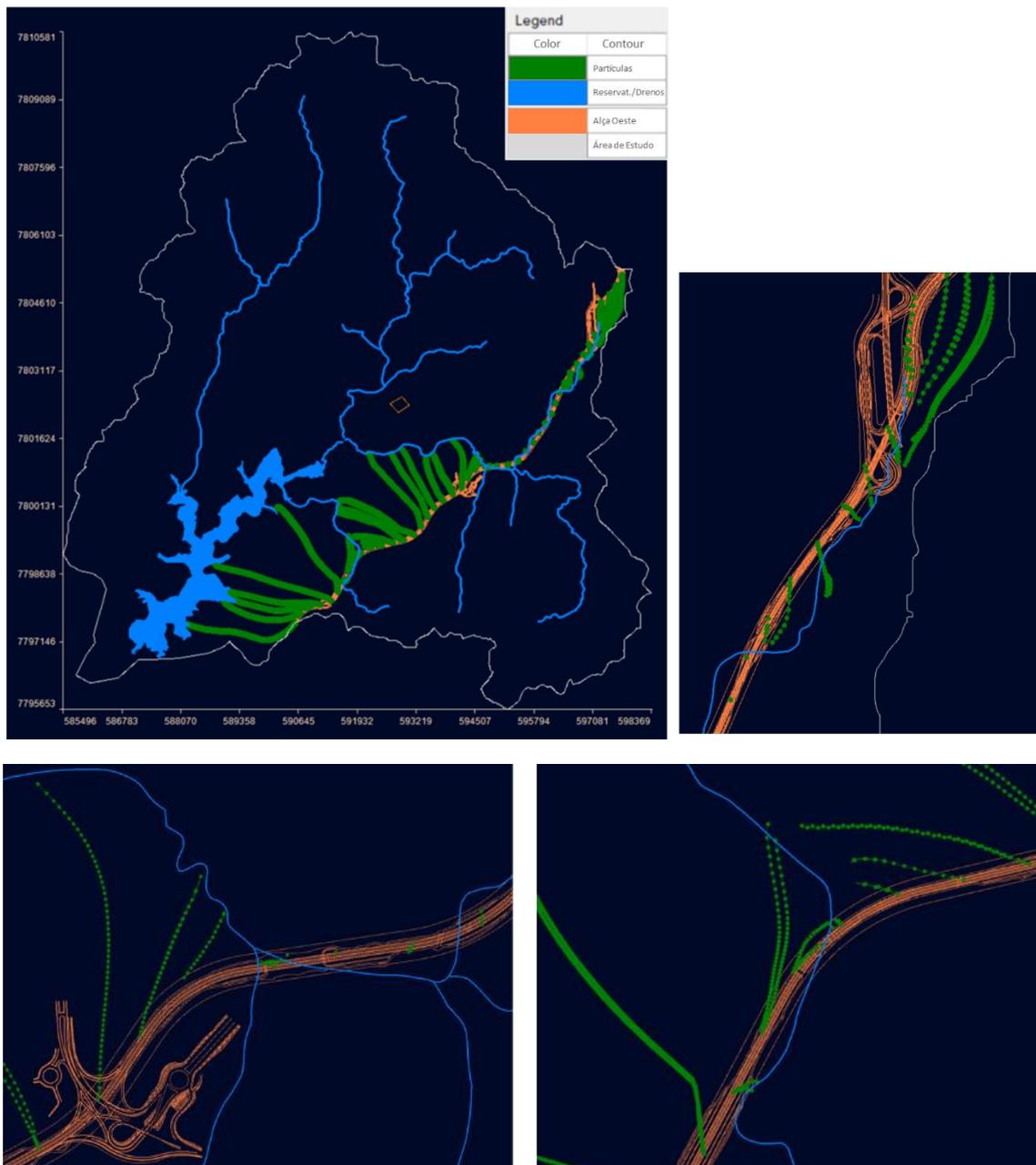
## 6.5 Resultados do Transporte de Partículas

O rastreamento de partículas é utilizado para traçar o fluxo preferencial, ou linhas de fluxo preferenciais através do rastreamento do movimento de partículas imaginárias infinitesimais posicionadas no meio poroso saturado. Assim, o *software* Visual MODFLOW Flex permite determinar os caminhos preferenciais de um composto genérico, de forma a estabelecer a evolução temporal e espacial das plumas (processo advectivo) nos fluxos de água subterrânea.

O rastreamento de partículas do transporte advectivo é considerada como uma boa alternativa para resolução de modelos de transporte, porque não envolvem os efeitos complicadores e as incertezas associadas a mecanismos como dispersão e reações químicas. Dessa forma, é possível traçar os

caminhos preferenciais para quaisquer tipos de compostos contaminantes e estimar os pontos de descarga.

Para estabelecer o caminho das partículas considerando um possível acidente/derramamento de composto químico no contexto das fases de construção e operação do empreendimento do Rodoanel Metropolitano de BH, foram inseridas duas fontes distintas, sendo a primeira no Canteiro de Obras 03 e a segunda na Alça Oeste. Foi selecionada a opção de soltar partículas de 10 em 10 metros (Figura 6.5-1) para o canteiro de 250 em 250 metros para a alça (Figura 6.5-2), respectivamente. Para o transporte de partículas apresentado, a distância de cada “marcador” representa um período de 1 ano (365 dias).



**Figura 6.5-1 – Transporte de partículas na região da Alça Oeste do Traçado do Rodoanel Metropolitano BH, que intercepta a bacia Vargem das Flores.**

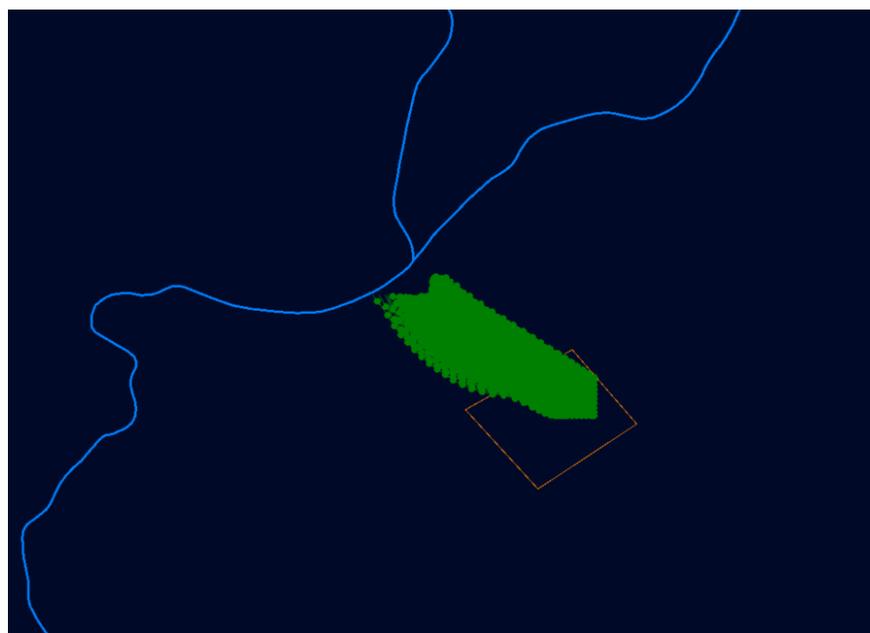
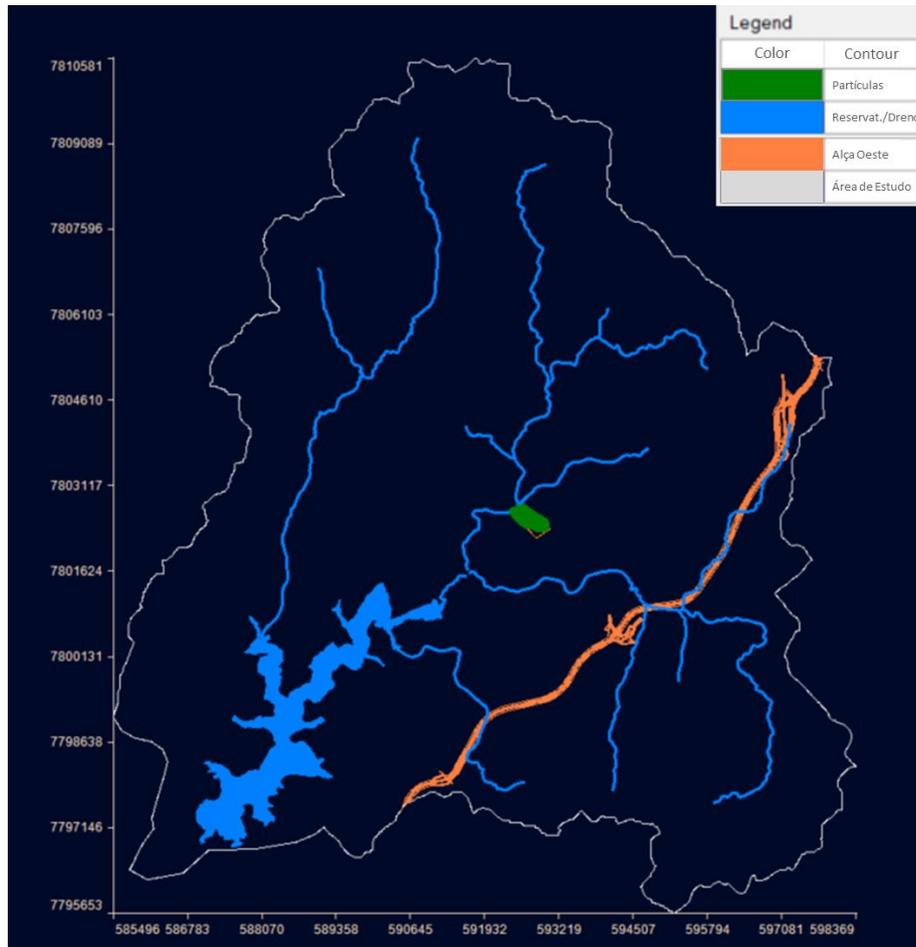


Figura 6.5-2 – Transporte de partículas na região do Canteiro de Obras 03 do Traçado do Rodoanel Metropolitano BH, que intercepta a bacia Vargem das Flores.

A partir dos resultados obtidos é possível observar que, a mobilidade longitudinal das partículas no fluxo subterrâneo tanto para o Canteiro de Obras 03, como para toda o traçado da Alça Oeste, é de 20 a 50 metros por ano, aproximadamente, condizente com as características hidrogeológicas da área. Em caso de acidente envolvendo derramamento de produtos perigosos, nos primeiros anos, a pluma poderá alcançar poços de captação de água no entorno, se existentes.

Um ponto de atenção importante, é a elevada quantidade de rios e cursos d'água superficiais existentes no entorno da Alça Oeste, que tendem a captar as partículas lançadas para dentro dessas drenagens, por meio do escoamento superficial. Observa-se pelo zoom aplicado na **Figura 6.5-1**, um fluxo hipotético superficial de partículas chegando ao reservatório Vargem das Flores no prazo de poucas horas, a depender do local onde ocorre o lançamento da partícula.

A partir dos resultados do transporte de partículas para a Alça Oeste, foram escolhidos três pontos principais para simular o transporte de contaminação por benzeno na água subterrânea. Estes pontos consistem em áreas de retorno, como cenários hipotéticos de possíveis acidentes envolvendo transporte de produtos perigosos, os quais permitem uma visualização da dispersão do contaminante escolhido para diferentes períodos.

## 6.6 Resultados do Transporte de Contaminantes

A hipótese inicial de uma fonte de contaminação de 146 litros de Benzeno, em virtude de um tombamento de caminhão-tanque que possui um total de 50 mil litros, conforme detalhado no item 5.3, é considerado como um cenário crítico por apresentar toxicidade crônica mesmo em pequenas concentrações.

Ressalta-se que, no caso da ocorrência de um acidente envolvendo derramamento de compostos químicos, será necessário um conhecimento mais detalhado acerca da composição química da fonte, uma vez que, irá proporcionar atualização do modelo hidrogeológico numérico e de transporte de contaminantes, além da proposição de medidas de remediação mais específicas.

Assim, os resultados apresentados neste documento vão permitir uma estimativa para o tempo de ação necessário para proposição de medidas definitivas e subsidiar os Relatórios de Análise de Risco e Programada de Gerenciamento de Risco, que apresentarão medidas emergenciais a serem tomadas no caso de uma situação real envolvendo derramamento de compostos químicos.

Para análise temporal, considera-se a propagação de uma concentração de contaminante já dissolvido na zona saturada, em período de 1 ano (365 dias), 5 anos (1825 dias) e 10 anos (3650 dias) após ocorrência do acidente. A fonte de contaminação poderá ocorrer em qualquer ponto da Alça Oeste ou no Canteiro de Obras 03. Entretanto, para efeitos de modelagem, considerou-se hipóteses de ocorrência de acidentes nas regiões próximas as áreas de retorno, que estão próximas aos cursos d'água superficiais.

A **Figura 6.6-1** apresenta a localização, em planta, das plumas de contaminação, para os pontos notáveis 01, 02 e 03 da Alça Oeste. A **Figura 6.6-2**, **Figura 6.6-3** e **Figura 6.6-4** mostram os resultados da simulação, evidenciando as vistas em planta e em seções verticais em relação a evolução no tempo das plumas simuladas para 1 ano (365 dias), 5 anos (1825 dias) e 10 anos (3650 dias).

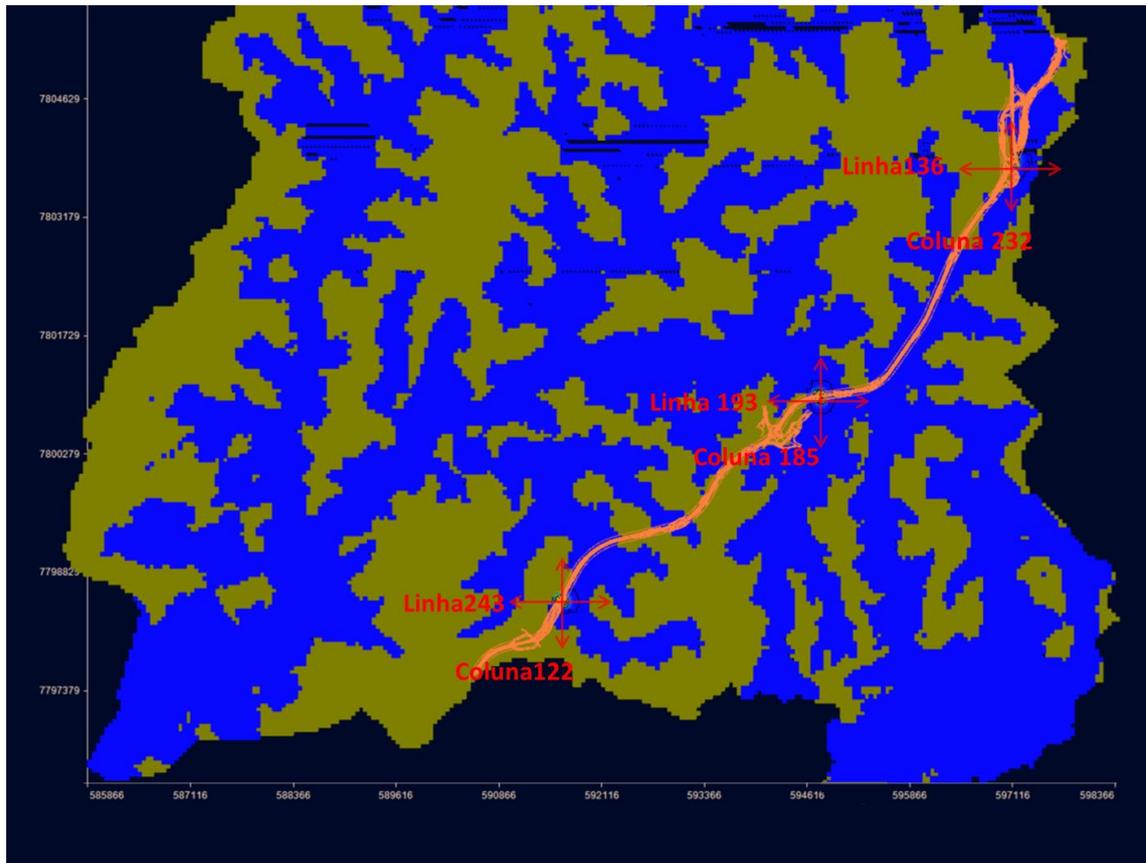


Figura 6.6-1 – Visualização em planta de três manchas de contaminação de Benzeno simuladas para o Traçado da Alça Oeste do Rodoanel Metropolitano BH, que intercepta a bacia Vargem das Flores.

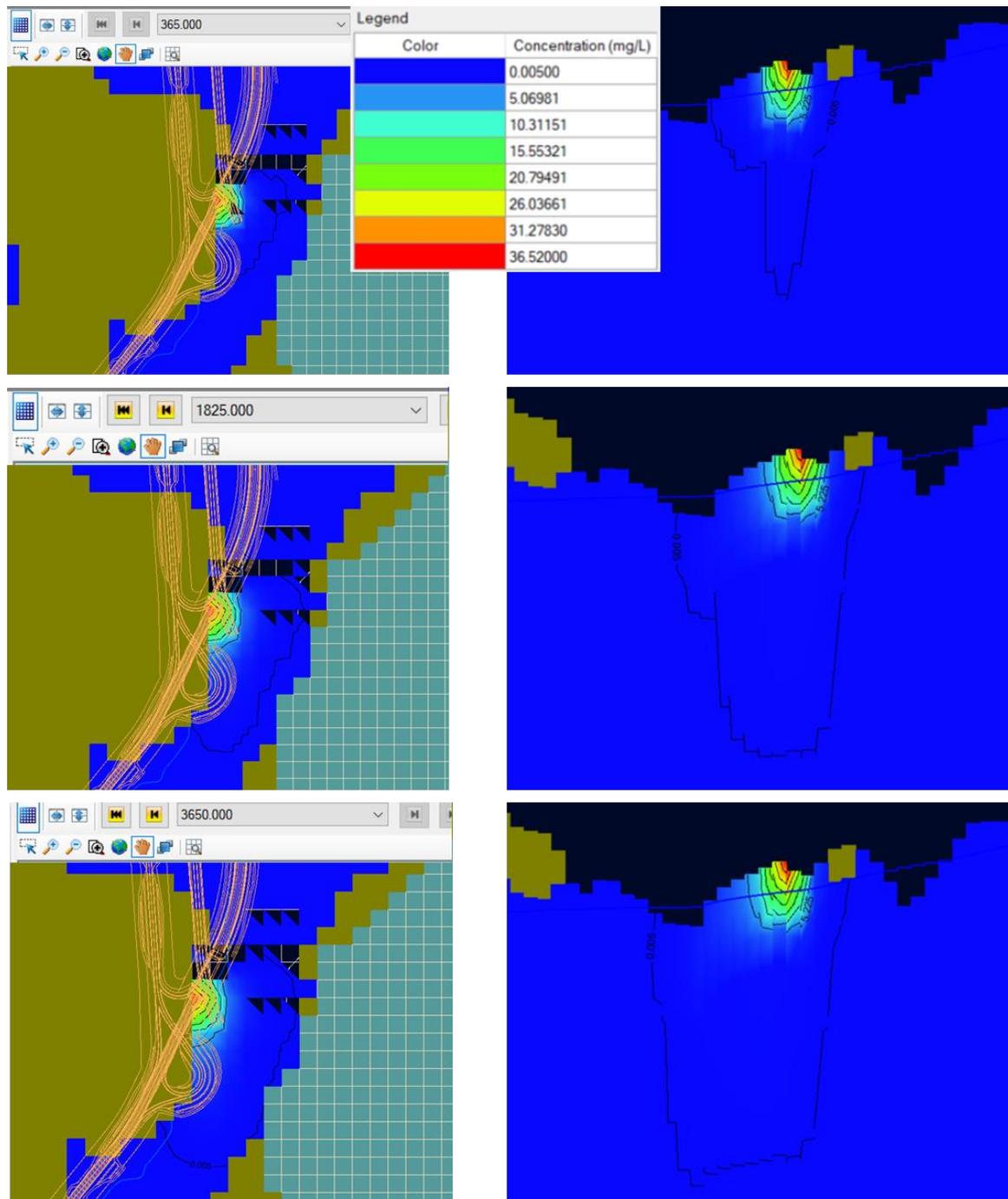


Figura 6.6-2 – Seção vertical - Ponto 01 de contaminação de Benzeno.

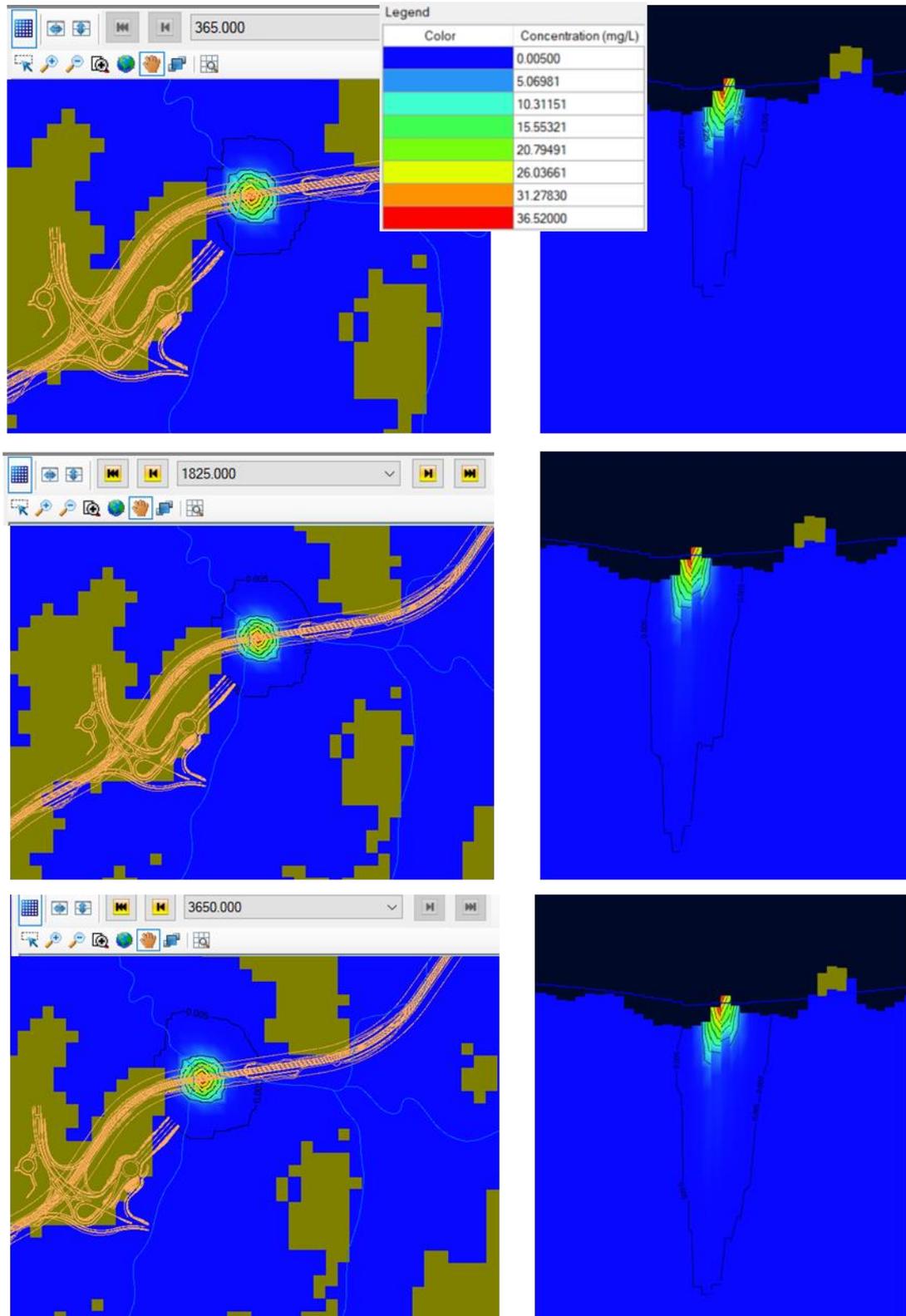


Figura 6.6-3 – Seção vertical - Ponto 02 de contaminação de Benzeno.

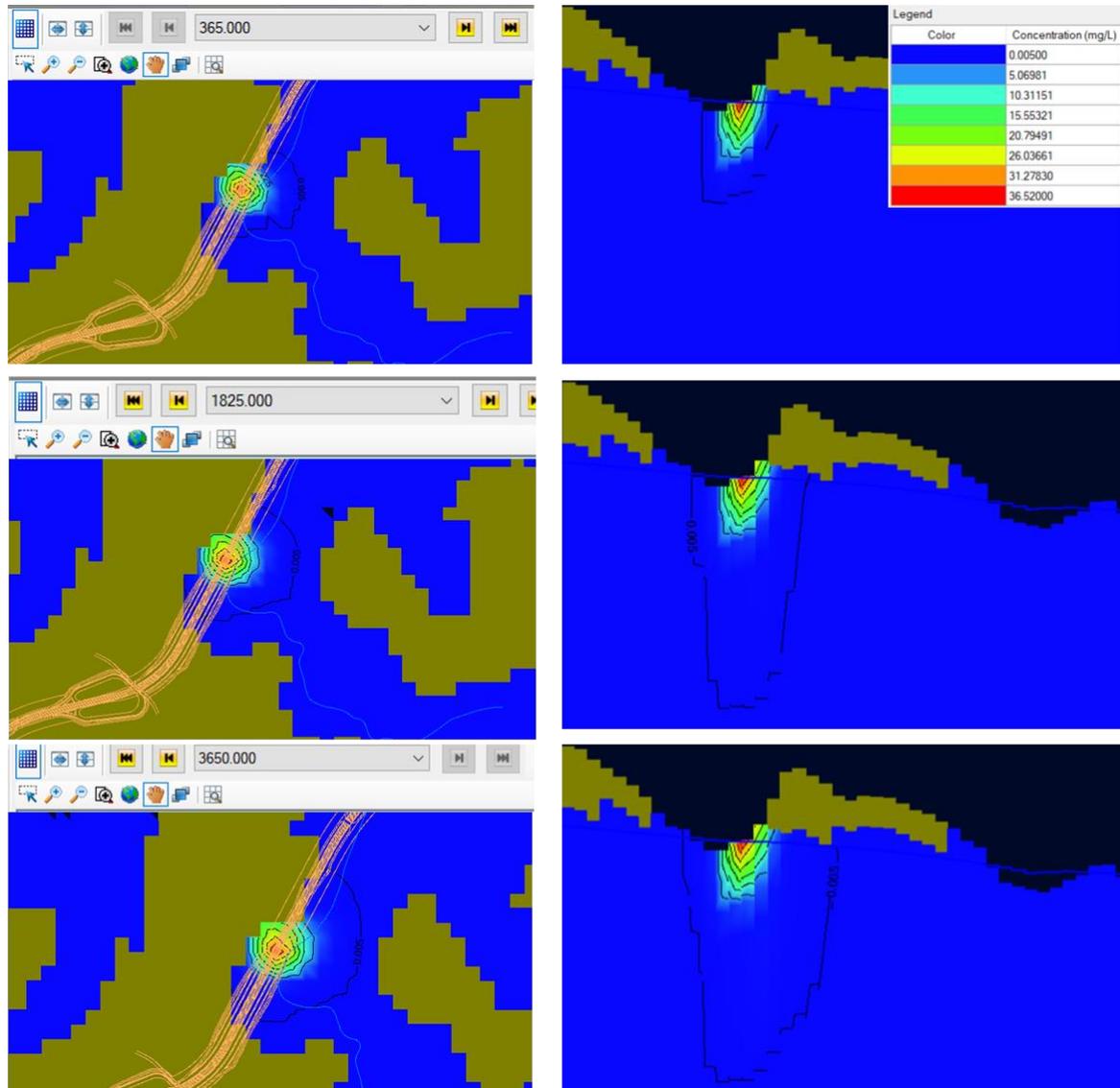


Figura 6.6-4 – Seção vertical - Ponto 03 de contaminação de Benzeno.

Analisando o alcance das plumas de contaminantes no aquífero subterrâneo, o Ponto Notável 01 (**Figura 6.6-2**), Ponto Notável 02 (**Figura 6.6-3**) e Ponto Notável 03 (**Figura 6.6-4**), no traçado da Alça Oeste do Rodoanel Metropolitano BH, apresentam dispersão longitudinal média de 222,00 metros em 1 ano (365 dias). Para 5 anos e 10 anos observa-se pequenas alterações na dispersão longitudinal das plumas hipotéticas de contaminação de Benzeno, quando comparado ao alcance de 1 ano. Portanto, conclui-se que ao longo dos anos, não haverá alteração substancial na expansão da pluma, que ocorre em virtude das baixas condutividades hidráulicas dos sistemas aquíferos granulares e fraturados granito-gnáissicos presentes na região.

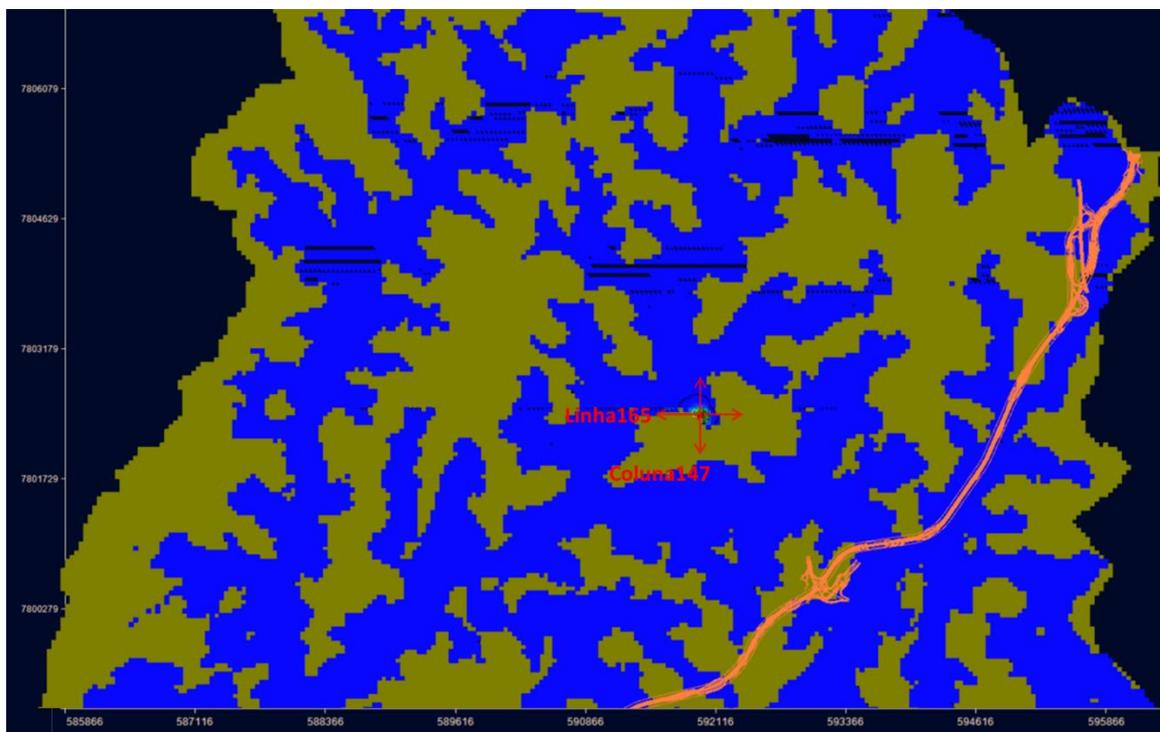
Em contrapartida, quando se observa a dispersão vertical para o período de 1 ano (365 dias) tem-se elevadas concentrações (até 20 µg/l) de Benzeno em até 11 metros de profundidade, variando para menores concentrações (até 5 µg/l) em até 90 metros de profundidade, mas que ainda se encontram fora dos padrões de potabilidade.

Pela evolução temporal das plumas em profundidade, pode-se concluir que uma concentração inicial de 36,52 mg/L de Benzeno na fonte de contaminação, apresenta elevada persistência nos sistemas aquíferos granulares e fraturado, uma vez que, a concentração máxima aceitável do Benzeno de 0,005 mg/L, definida por lei, poderá, inclusive, ultrapassar o tempo de 10 anos proposto nesse estudo hipotético.

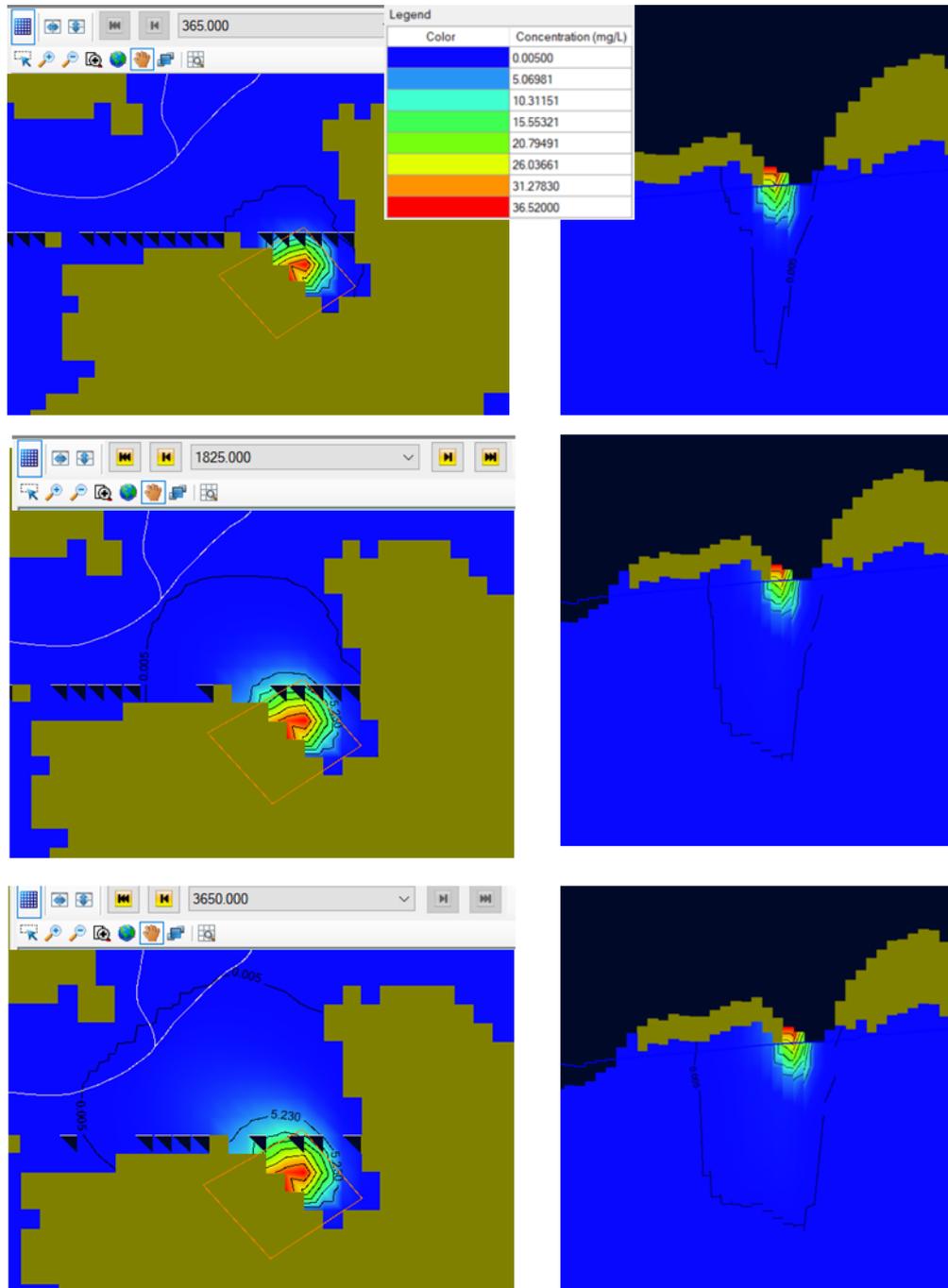
Observa-se que a distância média entre a pluma hipotética do Ponto Notável 03, que é o ponto mais próximo simulado, e o reservatório Vargem das Flores, é de 2,60 quilômetros de distância, para o período de 10 anos (3650 dias). Dessa maneira, pelos resultados obtidos e considerando as premissas adotadas, não é esperado que no caso de acidentes na rodovia envolvendo produtos perigosos nos pontos modelados, que o reservatório Vargem das Flores seja atingido por meio do transporte de contaminantes no fluxo da água subterrânea.

Ressalta-se que neste estudo não foram considerados efeitos de bombeamento de água, comumente executado por meio de poços tubulares, que por sua vez, podem elevar as velocidades de fluxo subterrâneo e influenciar no transporte de contaminantes.

Análise similar pode ser realizada para o Canteiro de Obras 03 do Rodoanel Metropolitano BH. A **Figura 6.6-5** apresenta a localização em planta da mancha de contaminação hipotética de Benzeno simulada para o Canteiro de Obras 03 do Rodoanel Metropolitano BH. A **Figura 6.6-6** mostra o resultado da simulação, evidenciando as vistas em planta e em seções verticais em relação a evolução no tempo das plumas simuladas para 1 ano (365 dias), 5 anos (1825 dias) e 10 anos (3650 dias).



**Figura 6.6-5 – Visualização em planta da mancha contaminação de Benzeno simulada para o Canteiro de Obras 03 do Rodoanel Metropolitano BH.**



**Figura 6.6-6 – Seção vertical - Pluma de contaminação de Benzeno no Canteiro de Obras 03 do Rodoanel Metropolitano BH.**

Analisando o alcance da pluma de contaminantes no aquífero subterrâneo na região do Canteiro de Obras 03 do traçado do Rodoanel Metropolitano BH (**Figura 6.6-6**), nota-se dispersão longitudinal média de 175,00 metros em 1 ano (365 dias), média de 225,00 metros em 5 anos e média de 275,00 metros em 10 anos. Os dados mostram que a dispersão longitudinal, das plumas hipotéticas de contaminação de Benzeno avançam, em média, 50 metros a cada 5 anos na região do Canteiro de Obras. Portanto, conclui-se que ao longo dos anos, poderá haver alteração expressiva na expansão da pluma nessa região.

Com relação a dispersão vertical, no período de 1 ano (365 dias) observa-se elevadas concentrações (até 20 µg/l) de Benzeno em até 21 metros de profundidade, variando para menores concentrações (até 5 µg/l) em até 76 metros de profundidade, mas que ainda se encontram fora dos padrões de potabilidade.

Pela evolução temporal das plumas em profundidade, pode-se concluir que uma concentração inicial de 36,52 mg/L de Benzeno na fonte de contaminação, apresenta elevada persistência nos sistemas aquíferos granulares e fraturado, uma vez que, a concentração máxima aceitável do Benzeno de 0,005 mg/L, definida por lei, poderá, inclusive, ultrapassar o tempo de 10 anos proposto nesse estudo hipotético.

Observa-se que a distância média entre a pluma hipotética no aquífero subterrâneo oriundo do Canteiro de Obras 03 e o reservatório Vargem das Flores, é de 2,50 quilômetros, no período de 10 anos (3650 dias). Dessa maneira, pelos resultados obtidos e considerando as premissas adotadas, não é esperado que no caso de acidentes na rodovia envolvendo produtos perigosos nos pontos modelados, que o reservatório Vargem das Flores seja atingido por meio do transporte de contaminantes no fluxo da água subterrânea.

Ressalta-se que neste estudo não foram considerados efeitos de bombeamento de água, comumente executado por meio de poços tubulares, que por sua vez, podem elevar as velocidades de fluxo subterrâneo e influenciar no transporte de contaminantes.

## 7 CONCLUSÕES

O modelo de transporte de contaminantes da bacia Vargem das Flores, no contexto do empreendimento Rodoanel Metropolitano BH, considerou cenários hipotéticos de transporte de partículas e de contaminação por Benzeno, visando complementar os estudos hidrogeológicos apresentados no **Volume 2 – Diagnóstico Meio Físico**, para região da bacia Vargem das Flores, que é considerada como prioritária em relação às demais sub-bacias que são interceptadas pelo Rodoanel Metropolitano BH.

Localizada na Alça Oeste do Rodoanel Metropolitano BH, a Área de Proteção Especial (APE) da bacia Vargem das Flores tem grande importância regional por desaguar no Rio Betim, o qual é represado e utilizado como fonte de abastecimento hídrico para região metropolitana de BH. Diante disso, essa região apresenta propensão de expor, com maior facilidade, os seres humanos e/ou ao meio ambiente à impactos por ações antrópicas.

Foram utilizados dados bibliográficos e históricos das regiões alvo de estudo, provenientes do estudo realizado no âmbito do **ANEXO 15 - RODOANEL METROPOLITANO BH MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL VARGEM DAS FLORES**, bem como dos resultados das campanhas de coleta de água subterrânea e solos, que por sua vez, não apresentam a presença de contaminação pré-existente.

Os resultados do modelo matemático em regime permanente indicaram que os níveis de água variam da Cota El. 953,0 m a El. 820,0 m, aproximadamente. Assim, estima-se encontrar lençol freático mais profundo a 80,0 m de profundidade nos aquíferos fraturados e, mais rasos a 10,0 m de profundidade nos aquíferos granulares, aproximadamente. O gradiente hidráulico obtido é de 1,16.

Considerou-se como premissa, o derramamento acidental do combustível gasolina contendo 27% de álcool etílico anidro, uma vez que as interações entre o etanol e os compostos BTEX presentes

na gasolina podem aumentar solubilidade, bem como a mobilidade dos BTEX em água subterrânea, além de dificultar a biodegradação natural dos BTEX, aumentando a persistência destes compostos na água subterrânea.

Dentre os BTEX, considerou-se o Benzeno como substância crítica em termos ambientais e sociais para realização de uma simulação hipotética por se tratar de uma substância comprovadamente carcinogênica (podendo causar leucemia, ou seja, câncer dos tecidos que formam os linfócitos do sangue). A partir disso, foram definidas plumas de contaminação fornecendo uma concentração de 36,52 mg/L de Benzeno continuamente, até que toda a massa da fonte fosse dissolvida.

Para estabelecer o caminho das partículas considerando um possível acidente/derramamento de composto químico no contexto das fases de construção e operação do empreendimento do Rodoanel Metropolitano de BH, foi realizada a modelagem de transporte de partículas no Canteiro de Obras 03 e em toda a Alça Oeste.

A partir dos resultados do transporte de partículas indicam que a mobilidade longitudinal das partículas no fluxo subterrâneo tanto para o Canteiro de Obras 03, como para toda o traçado da Alça Oeste, é de 20 a 50 metros por ano, aproximadamente. Em caso de acidente envolvendo derramamento de produtos perigosos, nos primeiros anos, a pluma poderá alcançar poços de captação de água no entorno, se existentes.

No transporte de partículas, observou-se que um fluxo hipotético superficial tende a chegar ao reservatório Vargem das Flores no prazo de poucas horas, a depender do local de lançamento da partícula, dada a elevada densidade de drenagem superficial existente na região.

Na análise de transporte de contaminação por Benzeno, observou-se que o alcance das plumas hipotéticas no contexto do empreendimento Rodoanel Metropolitano BH, poderá apresentar dispersão longitudinal, avançando, em média, 50 metros a cada 5 anos na região do Canteiro de Obras. Na região do traçado, as plumas apresentaram dispersão longitudinal média de 222,00 metros em 1 ano (365 dias) com pequenas alterações para os próximos 5 anos e 10 anos modelados.

O fluxo de contaminação no sentido vertical para o período de 1 ano (365 dias) tem-se elevadas concentrações (até 20,0 µg/l) de Benzeno em até 11,0 metros de profundidade para hipótese de contaminação no traçado e em até 21,0 metros de profundidade para hipótese de contaminação no canteiro. Menores concentrações (até 5 µg/l) pode atingir até 90 metros de profundidade, mas que ainda se encontram fora dos padrões de potabilidade.

Pela evolução temporal das plumas em profundidade, pode-se concluir que uma concentração inicial de 36,52 mg/L de Benzeno na fonte de contaminação, apresenta elevada persistência nos sistemas aquíferos granulares e fraturado, uma vez que, a concentração máxima aceitável do Benzeno de 0,005 mg/L, definida por lei, poderá, inclusive, ultrapassar o tempo de 10 anos proposto nesse estudo hipotético.

Observou-se que a distância média entre todas as plumas hipotéticas e o reservatório Vargem das Flores, são da ordem de 2,50 quilômetros de distância, para o período de 10 anos (3650 dias). Dessa maneira, pelos resultados obtidos e considerando as premissas adotadas, não é esperado que no caso de acidentes na rodovia envolvendo produtos perigosos nos pontos modelados, que o reservatório Vargem das Flores seja atingido por meio do transporte de contaminantes no fluxo da água subterrânea.

A Alça Oeste do Rodoanel Metropolitano BH, que será construída passando pela bacia Vargem as Flores, já possui no seu entorno uma região densamente urbanizada. Não somente, mas principalmente a sudeste da bacia, percebe-se um risco pré-existente de contaminação associada à disposição irregular de resíduos urbanos e/ou industriais e até mesmo efluentes no solo e nas águas superficiais, inerentes a atividades que ocorrem nessa região. Por isso, recomenda-se realizar levantamento junto aos órgãos ambientais das Áreas Potencialmente Contaminadas previamente à execução do Rodoanel, objetivando se precaver de potenciais ações futuras.

Em função da vulnerabilidade da região, está sendo previsto no **Volume 7 – Programas Ambientais**, a realização Subprograma de Monitoramento de Qualidade de Águas Subterrâneas e Solos, conforme preconizado na DD038/2017 CETESB em seu Anexo I, nos pontos de áreas de retorno, de interceptação de cursos d'água superficiais, bem como no Canteiro de Obras 03, com a finalidade de propiciar a delimitação total tridimensional de todas possíveis plumas de contaminação de águas subterrâneas, relacionadas às possíveis contaminações já existentes. Além disso, esse subprograma visa o monitoramento preventivo, bem como o conhecimento concentração máxima aceitável (CMA) de uma SQI em contato com o bem a proteger, no caso de acidentes com vazamentos e/ou derramamentos de produtos perigosos na região da bacia Vargem das Flores. Os dados de monitoramento ambientais deverão ser utilizados para o aprimoramento e desenvolvimento de estratégias, bem como para proporcionar continuamente a atualização do modelo de transporte de contaminantes apresentado nesse documento.

Ressalta-se que, já existe cadastramento de área contaminada na região da bacia Vargem das Flores, conforme apontamento do **ANEXO 17 - RODOANEL METROPOLITANO BH QUADRO ÁREAS CONTAMINADAS** (Ponto ACI 03). Entretanto, conforme mencionado, estima-se que nessa região já existem outras possíveis fontes de contaminação, devido ao próprio tipo de adensamento de empreendimentos, que estão ali presentes.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR nº 6458, de 29 de setembro de 2016 – versão corrigida de 09 de agosto de 2017. **Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2017.

ABNT NBR nº 6459, de 07 de abril de 2016 – versão corrigida de 24 de abril de 2017. **Solo – Determinação do Limite de Liquidez.** Rio de Janeiro, 2017.

ABNT NBR nº 7180, de 30 de março de 2016. **Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016.

BRASIL. Ministério da Saúde. **PORTARIA GM/MS Nº 888 de 2021.** Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. 2021.

BRASIL. **Decreto nº 20.793, de 8 de setembro de 1980.** Define como de interesse especial, para proteção de mananciais, terrenos situados na bacia hidrográfica do reservatório de Vargem das Flores. 1980.

ALASKA DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL CONSERVATION. **How to Interpret my PFAS Laboratory Report and Understand how my Results Compare to DEC's Action Levels.** Spill Prevention and Response Division Contaminated Sites Program, 2019. Disponível em:

<https://dot.alaska.gov/airportwater/docs/Interpreting-PFAS-lab-reports.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2023.

ATSDR – Agência for Toxic Substances and Disease Registry. **Toxicological Profile for Total Petroleum Hydrocarbons**. Toxic Substances Portal, Estados Unidos, 2014.

BATISTA, M. L. C. **Modelagem do fluxo subterrâneo na bacia sedimentar costeira do baixo curso do rio Paraíba**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/4031>. Acesso em: 18 jan. 2024

BATISTA, M. L. C.; REGO, J. C.; RIBEIRO, M. M. R.; ALBUQUERQUE, J. P. T. **Determinação dos parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero confinado através de modelagem matemática**. XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, São Luís, 2016. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23089/15204>. Acesso em: 19 dez. 2023

BERGER, T. **Biorremediação de solos contaminados com Hidrocarbonetos Totais de Petróleo – enfoque na aplicação do processo Terraferm**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/10900/000590396.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 11 nov. 2023

BOSQUE, R. M. **Oxidação Química Avançada em área contaminada com hidrocarboneto de petróleo (BTEX e TPH): aplicação de peróxido de hidrogênio e persulfato de sódio**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/970999>. Acesso em: 11 nov. 2023

BRASIL. **Lei nº 8.723, de 28 de outubro de 1993**. Dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L8723.htm#art9](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8723.htm#art9). Acesso em: 08 nov. 2023

BRASIL. **Lei nº 10.203, de 22 de fevereiro de 2001**. Dá nova redação aos Arts. 9º e 12º da Lei no 8.723, de 28 de outubro de 1993, que dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores, e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/leis\\_2001/l10203.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10203.htm). Acesso em: 08 nov. 2023

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: [https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res\\_conama\\_357\\_2005\\_classificacao\\_corpos\\_agua\\_rtfcd\\_a\\_altrd\\_res\\_393\\_2007\\_397\\_2008\\_410\\_2009\\_430\\_2011.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf). Acesso em: 08 nov. 2023

CABRAL, J. J. P.; DEMETRIO, J. G. A. Aplicação de modelos em hidrogeologia. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C. DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3 ed, Rio de Janeiro, CPRM: LABHID, 812 p. cap. 7.3, p.687-707, 2008.

CAFER, C. R. **Exposição ao BTEX e riscos à saúde em postos de combustível: revisão integrativa**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível

em: [https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/37616/1/Exposi%  
Acesso em: 08 nov. 2023](https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/37616/1/Exposi%c3%a7%c3%a3oAoBtexpdf)

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas.** Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2009.

CAIRO, F. M. **Avaliação das Técnicas de Remediação de Solos e Águas Contaminados por Combustíveis Fósseis.** Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/14480/1/FMCairo.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2023

CÂNDIDO, E. G. DA SILVA. **Modelagem hidrogeológica aplicada à análise de transporte de contaminantes: estudo prospectivo da propagação de contaminação em aquífero livre poroso.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2018. 153 p.

CASTRO, P. T. A.; ENDO, I.; GANDINI, A. L. **Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos.** Belo Horizonte: 3i editora, 2020. 480 p.

CHIARANDA, H. S. **Volatilização dos compostos BETEX em ambientes subsuperficiais contaminados com gasolina e etanol: Comparação entre concentrações medidas e simuladas.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/88559/229186.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 nov. 2023

COPAM - CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. **Deliberação Normativa Copam nº 166, de 29 de junho de 2011.** Altera o Anexo I da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 02 de 06 de setembro de 2010 estabelecendo os valores de Referência de Qualidade dos Solos. Diário Executivo – Minas Gerais, 27 de julho de 2011.

COPAM - CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL; CERH – Conselho Estadual de Política Ambiental. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 02, de 08 de setembro de 2010.** Institui o Programa Estadual de Gestão de Áreas Contaminadas, que estabelece as diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por substâncias químicas. Diário Executivo – Minas Gerais, 29 de dezembro de 2010.

CORSEUIL, H. X.; MARINS, M. D. M. **Contaminação de águas subterrâneas por derramamentos de gasolina: o problema é grave?** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.2, n.2, p.50-54, 1997. Disponível em: <http://3ambiental.com.br/wp-content/uploads/2017/01/Contaminacao-de-Aguas.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2023

EPA - Environmental Protection Agency. **Using Qualified Data to Document na Observed Release and Observed Contamination.** Office of Emergency and Remedial Respons, 1966.

FETTER, C.W; KREAMER, D. **Applied Hydrogeology.** Fifth Edition. Waveland Press, Inc, Long Grove, United States of America. 647 p., 2022

FIUME, Bruna; SENHORINHO, Eliel Martins; NASCIMENTO, Flávia Maria de Fátima; MIRANDA, Janaína Simone Neves; ABREU, Márcio Costa; PAULA, Thiago Luiz Feijó de. **Mapa hidrogeológico**

**do estado de Minas Gerais: área Sudeste (SE).** [S.l.]: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2022. 1 mapa, color. Escala 1:500.000.

GARCIA, M. V. C.; LEITE, E. C. P.; PEDE, M. A. Z.; SHINZATO, M. C.; FREITAS, J. G. **Avaliação do parâmetro transmissividade de LNAPLs para caracterização de áreas contaminadas no estado de São Paulo.** Revista Eng Sanit Ambient, v.26 n.6, p. 1085-1095, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/WvCwJtpH8mrm6vDGpYr8xWR/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 08 nov. 2023

GONÇALVES, L. G. M. **Modelagem hidrogeológica de fluxo e transporte advectivo na bacia do córrego do Engenho Nogueira no campus Pampulha da UFMG, Belo Horizonte, MG.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/IGCC-B52RXJ/1/disserta\\_\\_o\\_rev\\_laila\\_final.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/IGCC-B52RXJ/1/disserta__o_rev_laila_final.pdf). Acesso em: 20 dez. 2023

HIRATA, R.C.A., & FERREIRA, L.M.R. **Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição:** Revista Brasileira de Geociências, v. 31, p. 43–50, 2001.

LINO, F. R; ECKS, J; SOKACHESKI, J. **Limites de Atterberg na Caracterização de Solos Para Obras de Engenharia.** Enaproc – UNIUV, 2015

LI, Y.; LI, J.; CHEN, S.; DIAO, W. **Establishing indices for groundwater contamination risk assessment in the vicinity of hazardous waste landfills in China.** Environmental Pollution, 165, 77-90, 2012

MATEUS, C. **Radônio como indicador de contaminação ambiental por hidrocarbonetos em fase livre.** Dissertação de mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2016. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-25072016-130633/pt-br.php.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2023

MENESCAL, G. C.; CASTRO, M. A. H. Simulação computacional do transporte de contaminantes em aquíferos livres – estudo de caso. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. p.13, 2004.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 02, de 08 de setembro de 2010.** Altera o Anexo I da Deliberação Normativa Conjunta COPAM CERH nº 2 de 6 de setembro de 2010, estabelecendo os Valores de Referência de Qualidade dos Solos. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=18414>. Acesso em: 08 nov. 2023

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 14, de 28 de dezembro de 1995.** Dispõe sobre o enquadramento das águas da Bacia do rio Paraopeba. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=112>. Acesso em: 08 nov. 2023

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011.** Institui o Programa Estadual de Gestão de Áreas Contaminadas, que estabelece as diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por substâncias químicas. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=14670>. Acesso em: 08 nov. 2023

NEWELL, C. J.; ACREE, S. D.; ROSS, R. R.; HULLING, S. G. **Ground water issue: light nonaqueous phase liquids.** Washington: EPA, 1995. Acesso em: 08 nov. 2023

NOBRE, R. C. M., ROTUNNO FILHO, O. C., MANSUR, W. J., NOBRE, M. M. M., COSENZA, C. A. N. **Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool.** Journal of Contaminant Hydrology, 94(3-4), 277-292.

NOCE, C. M.; TEIXEIRA, W.; MACHADO, N. **Geoquímica dos gnaisses TTGse granitoides neoraqueanos do Complexo Belo Horizonte, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.** Revista Brasileira de Geociências, vol. 27 (1), p. 25-32, 1997. Disponível em: <http://bjg.siteoficial.ws/1997/n.1/3.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2023

O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, J. D.; POHN, J. A. **Lineament linear lineation: some proposed new standards for old terms.** Bulletin of Geological Society of America, v.87, n.10, p. 1463-1476. 1976

PARKER, J. C.; ISLAM, M. **Inverse modeling to estimate LNAPL plume release timing.** Journal of Contaminant Hydrology, v. 45, n. 3, p. 303-327, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169772200001054>. Acesso em: 08 nov. 2023

PEIXINHO, M. A. L. **Hidrogeologia do sistema aquífero Marizal/São Sebastião na sub-bacia do tucano central, estado da Bahia.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/22501>. Acesso em: 19 dez. 2023

PEIXOTO, F. S.; CAVALCATE, I. N. **Vulnerabilidade aquífera e risco de contaminação da água subterrânea em meio urbano.** Revista do Instituto de Geociências USP, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 29-40, 2019. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/guspssc/article/view/142384/153907>. Acesso em: 23 nov. 2023

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas.** 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PROJETO MAPBIOMAS – Coleção **2022** da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>. Acesso 03/05/2023.

RAMPONI, F. F. Modelo matemático de fluxo de águas subterrâneas na região do horto florestal de Rio Claro – SP. Monografia. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/6328974b-201b-4cd5-ad1a-ad6981e001e3>. Acesso em: 18 jan. 2024

RAIMUNDO, J. R. L. **Remediação de solos contaminados com fases líquidas não aquosas (NAPL's) através de oxidação química in situ.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Química da Faculdade de Ciências Químicas da Universidade Complutense de Madrid. 74p, 2013.

SANTOS, S. S. **Remediação de solos contaminados por derivados de petróleo utilizando processo foto-fenton.** Dissertação de mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005. Disponível em: [https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/6753/1/arquivo7920\\_1.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/6753/1/arquivo7920_1.pdf). Acesso em: 16 nov. 2023

SILVA, A.B. **Análise Morfoestrutural, Hidrogeológica e Hidroquímica no Estudo do Aquífero Cárstico do Jaíba, Norte de Minas Gerais.** 1984. 198 f. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

SIMÕES, M. **Estimativa da Condutividade Hidráulica Pela Curva de Distribuição Granulométrica do Aquífero Plúio-Quaternário da Bacia do Baixo Tejo, em Belverde (Portugal).** UNESP, Geociências, v. 29, n. 3, p. 375-387, São Paulo, 2010. Disponível em:

[https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/29\\_3/09\\_Simoes.pdf](https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/29_3/09_Simoes.pdf). Acesso em: 14 dez. 2023.

TÁVORA, B. E. **Estudo da contaminação do lençol freático por hidrocarbonetos utilizando modelagem computacional**. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, 2010. Disponível em: <http://ptarh.unb.br/dissertacoes/estudo-da-contaminacao-do-lencol-freatico-por-hidrocarbonetos-utilizando-modelagem-computacional/>. Acesso em: 07 nov. 2023.

TEIXEIRA, P. C; DONAGEMMA, G. K; FONTANA, A; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, ed. 3, Rio de Janeiro, 2017.

TOMLINSON, D. W.; RIVETT, M. O.; WEALTHALL, G. P.; SWEENEY, R. E. H. **Understanding complex LNAPL sites: illustrated handbook of LNAPL transport and fate in the subsurface**. Journal of Environmental Management, v. 204, p. 748-756, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/WvCwJtpH8mrm6vDGpYr8xWR/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 08 nov. 2023

USEPA - U.S ENVIRONMENTAL AGENCY PROTECTION. **Method 8015D - Nonhalogenated Organics Using GC/FID**. Estados Unidos, 2003.