

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
tractebel-engie.com.br

ANEXO 15

RODOANEL METROPOLITANO BH

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

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

SETEMBRO DE 2023

00	28.09.2023	A	A. Simplicio, I. Silva	A. Canhoto, G. Eger	L. Melo, V. Magalhães
----	------------	---	------------------------	---------------------	-----------------------

REV.	DD.MM.AA	NATUREZA DAS REVISÕES	ELABORAÇÃO	VERIFICAÇÃO	APROVAÇÃO
------	----------	-----------------------	------------	-------------	-----------

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	3
2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO LOCAL (AEL)	3
2.1	Contexto Hidrográfico	5
2.2	Contexto Geológico Local	8
2.3	Geomorfologia	11
2.3.1	Hipsometria e Declividade	11
2.3.2	Unidades Geomorfológicas	13
3	ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PRETÉRITOS	16
3.1	Nascentes Cadastradas	16
3.2	Unidades Hidrogeológicas	17
3.3	Perfil Litológico	19
4	MONITORAMENTO HIDROGEOLÓGICO	21
4.1	Dados Fluviométricos	21
4.1.1	Escoamento de Base	24
4.1.2	Separação do Escoamento de Base	25
4.1.3	Regionalização de Vazões	30
4.2	Dados Pluviométricos	32
4.3	Piezometria	35
5	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL	37
5.1	Conceitos	38
5.2	Resultados e Discussões	39
6	CONCLUSÕES	42
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Este documento apresenta o modelo hidrogeológico conceitual do aquífero granito-gnáissico da bacia Vargem das Flores, desenvolvido no âmbito dos Estudos Ambientais para Obtenção da Licença Prévia e da Licença de Instalação do Rodoanel Metropolitan BH.

O modelo hidrogeológico conceitual irá subsidiar parte dos estudos de Análise de Risco (**ANEXO 19 - RODOANEL METROPOLITANO BH ANÁLISE DE RISCO VARGEM DAS FLORES**) da operação da rodovia, onde prevê-se a passagem da via nas proximidades do reservatório de Vargem das Flores, utilizado para abastecimento hídrico urbano e que apresenta cursos d'água a montante enquadrados como de classe 1. Destaca-se que a referida bacia compreende Área de Proteção Especial (APE).

O modelo conceitual é uma representação do sistema hidrogeológico de uma determinada região, incluindo: a geologia, os parâmetros hidrogeológicos, a hidrologia, os sistemas de fluxo da água subterrânea, os caminhos que a água percorre desde sua entrada no aquífero na zona de recarga até sua descarga no exutório, além dos demais aspectos intervenientes. Esta representação será realizada sob a forma de um bloco diagrama ou de uma seção vertical, indicando as principais características dos sistemas aquíferos.

Para subsidiar o modelo, foram realizados levantamentos de campo para caracterização de aspectos do meio físico (recursos hídricos, geologia, geomorfologia e pedologia) e pesquisa bibliográfica para a estimativa da condutividade hidráulica para as diferentes classes de solos e rochas, que são devidamente discutidos neste documento.

Os modelos conceituais compõem uma simplificação das condições naturais de circulação das águas ou representam o entendimento das condições hidrogeológicas possibilitando explicar a localização, tempo e magnitude das respostas hidrológicas a eventos naturais ou induzidos pelo homem. Segundo Rosen & LeGran (2000), tais modelos podem ser imprecisos ou conter simplificações, no entanto, apresentam subsídios para o conhecimento dos aquíferos e para uma adequada gestão dos recursos hídricos da área de interesse.

Os resultados das campanhas de levantamento de dados primários dos períodos seco e chuvoso, são discutidas no âmbito do **ANEXO 18 - RODOANEL METROPOLITANO BH TRANSPORTE DE CONTAMINANTES VARGEM DAS FLORES**, que teve como objetivos simular o fluxo de água e o comportamento hidrogeológico da região, bem como avaliar efeitos de possíveis contaminantes em virtude da operação da rodovia, como óleos e graxas, hidrocarbonetos derivados de petróleo, pesticidas, dentre outros.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO LOCAL (AEL)

A área de estudo específica consiste na bacia Vargem das Flores, definida como uma Área de Proteção Especial (APE). As APEs são consideradas áreas protegidas de interesse especial no contexto da Lei Federal nº 6.766, de 1979, que dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano.

A Alça Oeste, a partir da divisa de Betim e Contagem, encontra-se na APA/APE de Vargem das Flores, que está totalmente inserida em terrenos do Complexo Metamórfico de Belo Horizonte.

A área de estudo compreende ainda a represa Vargem das Flores. A construção do reservatório Vargem das Flores foi aprovada em 1968, visando suprir a crescente demanda urbana de água. Após cinco anos de construção, o reservatório entrou em funcionamento. A inauguração do sistema de captação de água foi uma resposta à crise de desabastecimento hídrico, mostrando-se como uma forma de proteção da disponibilidade hídrica da RMBH.

O reservatório de Vargem das Flores está inserido nos municípios de Betim (13% da bacia de contribuição) e Contagem (87%) e recebe diversos cursos d'água, sendo o principal deles o ribeirão Betim. Nesse contexto, as águas do referido reservatório afluem para o rio Betim, que se localiza a montante da represa. Este último é um afluente do rio Paraopeba, na bacia do rio São Francisco, enquadrado como de classe 1 conforme Deliberação Normativa COPAM nº 14 de 1995.

A **Figura 2.1-1** apresenta a bacia de contribuição hídrica da represa Vargem das Flores e os principais cursos d'água da bacia. O sistema de drenagem do Rodoanel Metropolitano BH verterá parte de suas águas para essa região.

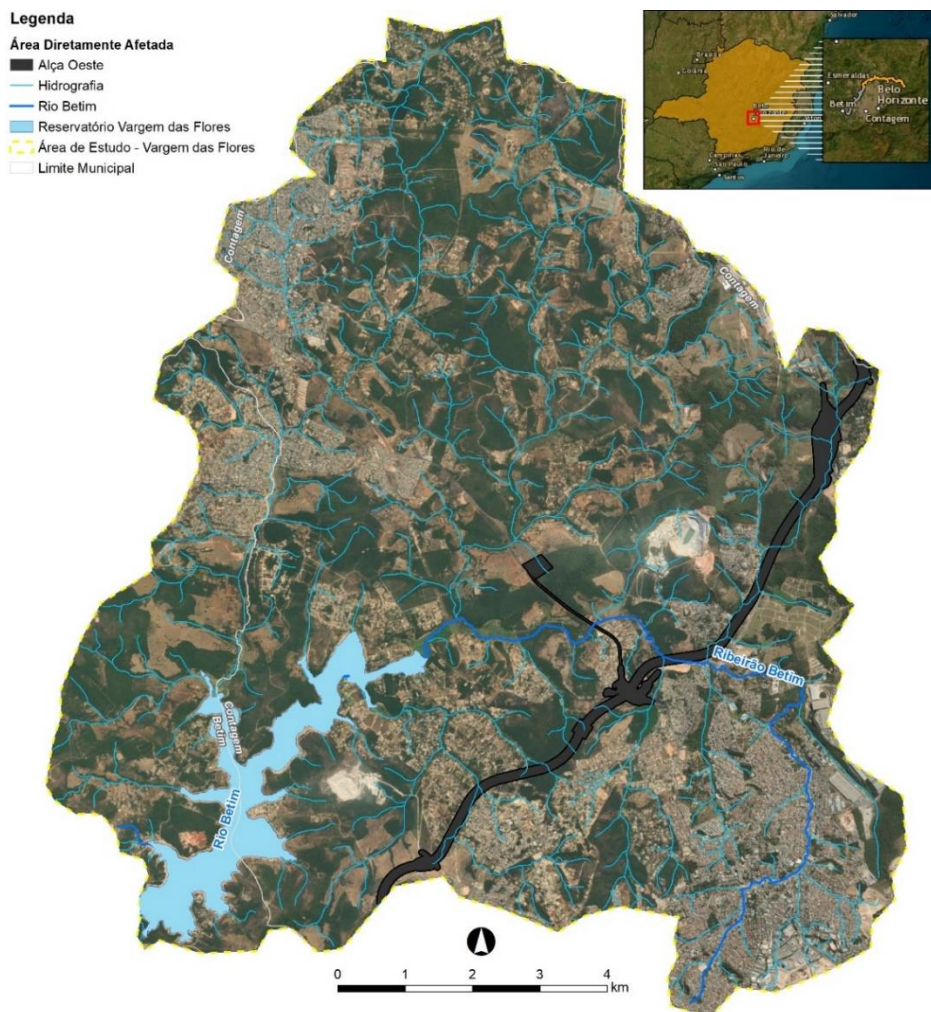


Figura 2.1-1 - Mapa da Inserção do Traçado na Bacia de Contribuição Hídrica do Reservatório Vargem das Flores.

O **Quadro 2.1-1** apresenta a relação da interação do traçado proposto em relação a Área de Proteção Especial do Reservatório Vargem das Flores.

Quadro 2.1-1 - Relação da interação do traçado proposto em relação a Área de Proteção Especial.

ALÇA	NOME	ÁREA INTERCEPTADA (Ha)	EXTENSÃO DA SOBREPOSIÇÃO (km)
Alça Oeste	Bacia Hidrográfica do Reservatório Vargem das Flores	125,31	13,22

Fonte: Anexo 13 – Diretrizes Ambientais (2022).

2.1 Contexto Hidrográfico

Como apresentado no Estudo de Impacto Ambiental (EIA), o traçado do Rodoanel Metropolitano BH está totalmente inserido na Região Hidrográfica do rio São Francisco, que por sua vez, engloba a sub-bacia do médio rio Paraopeba, além das sub-bacias do médio e alto rio das Velhas, anteriormente definidas como área de estudo. Mais especificamente, este documento trata acerca da área de estudo do modelo hidrogeológico conceitual da região que compreende o sistema aquífero granito-gnássico pertencente a bacia Vargem das Flores.

A bacia hidrográfica Vargem das Flores (**Figura 2.1-1**) é composta pelo conjunto de ottobacias de nível 7, que em escala macro está localizada na ottobacia nível 6, correspondente ao rio Betim, afluente do rio Paraopeba, possui uma área de drenagem de aproximadamente 123 km², abrangendo de forma majoritária o município de Contagem e uma parte do município de Betim. O traçado do Rodoanel Metropolitano BH, com destaque para a Alça Oeste, passa diretamente sobre a bacia onde há interface com o município de Contagem.

Nesse contexto, visando maior simplificação dos termos, para a área de estudo da bacia Vargem das Flores os termos “sub-bacias” e “ottobacia”, são denominados neste documento simplesmente de “bacias”, dado que os estudos possuem abrangência local.

Inserido na bacia, encontra-se o reservatório homônimo construído no ribeirão Betim na década de 60, com a principal finalidade de garantir água para consumo, solucionando o problema de escassez hídrica enfrentado pelo município de Contagem, frente ao seu crescimento urbano/industrial (SOUZA, 2003). Além da finalidade de abastecimento, este reservatório possui outros usos múltiplos, como recreação e lazer. O reservatório é administrado pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

Dentre os principais tributários que compõem a região hidrográfica na qual o escoamento converge para o reservatório Vargem das Flores, pode-se citar o ribeirão Betim e os córregos Morro Redondo, Água Suja e Bela Vista, todos de acordo com Santos (2016) de quarta ordem, com exceção do córrego Bela Vista, que apresenta terceira ordem segundo classificação de Strahler (1957).

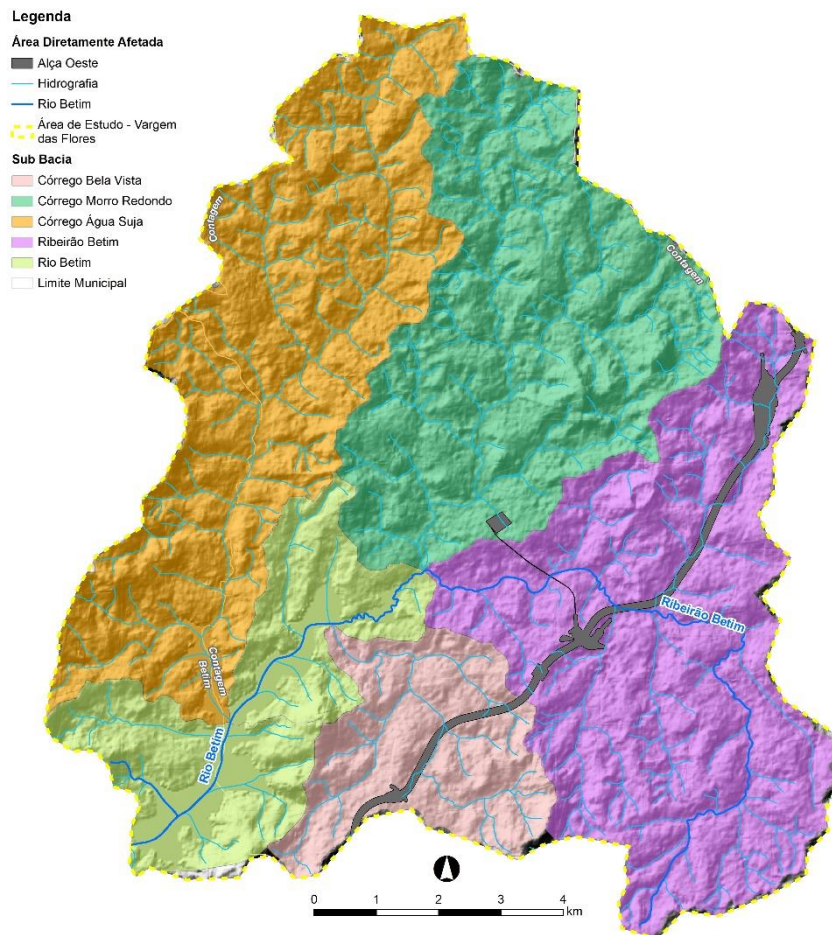


Figura 2.1-1 – Bacias hidrográficas Vargem das Flores.

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, nas quais são permitidos usos como abastecimento (após tratamento simplificado), recreação de contato primário e irrigação, desde que os parâmetros físico-químicos e biológicos não ultrapassem os limites de referência definidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

Adicionalmente, a bacia encontra-se ainda próxima a duas unidades de conservação, como a Floresta Estadual São Judas Tadeu e o Parque Natural Municipal Felisberto Neves, localizado na área urbana de Betim, e que possui vegetação de Cerrado, Mata Tropical e Mata de Galeria, conforme descrito por Lopes et al. (2007).

Em 1980, a extensão territorial da região hidrográfica que escoar para o reservatório de Vargem das Flores foi instituída por meio do Decreto 20.793 como APE Vargem das Flores, devido a sua relevância para o abastecimento hídrico da RMBH. Ademais, a Lei Estadual nº 16.197 de 2006 delimita a área como uma Unidade de Conservação de Uso Sustentável, categorizada por Área de Proteção Ambiental (APA) Vargem das Flores, que é gerida pelo Instituto Estadual de Florestas em articulação com as Prefeituras Municipais de Contagem e Betim.

De acordo com Pena (2018), dentre as bacias que integram Vargem das Flores (**Figura 2.1-2**), a do ribeirão Betim é considerada a de maior em extensão e ocupação, subdividida em áreas com e sem reversão de esgoto.



Figura 2.1-2 – Vista Geral da região da bacia Vargem das Flores. Ponto amostral EAF-06D.

Parte da bacia Vargem das Flores encontra-se em área urbanizada, com ocupações densas e regulares (**Figura 2.1-3** e **Figura 2.1-4**).



Figura 2.1-3 – Reconhecimento de campo da bacia Vargem das Flores. Localização de uma mineradora de brita e areia no contexto da área de estudo. Ponto amostral EAF-21.



Figura 2.1-4 – Reconhecimento de campo da bacia Vargem das Flores, com vista da região predominantemente urbana. Ponto amostral EAF-21.

A partir da base de dados da ANA, foram identificadas na área da bacia cinco estações de monitoramento pluviométrico, porém, no local não foi observada a existência de nenhuma estação de monitoramento de fluviométrico.

2.2 Contexto Geológico Local

No presente estudo evidencia-se o Complexo Belo Horizonte como uma unidade de significativa expressão na região onde está localizada a bacia Vargem das Flores. Consoante com o tema de Geologia inserido no Estudo de Impacto Ambiental (EIA), utiliza-se a denominação Complexo Belo Horizonte de Noce et al. (1994), além deste cita-se os estudos desenvolvidos pelos autores Doce, Teixeira e Machado (1997), que abordaram a geoquímica dos gnaisses TTGS e granitóides neoarqueanos do Complexo Belo Horizonte.

Segundo Doce, Teixeira e Machado (1997), o litotipo amplamente dominante no Complexo Belo Horizonte é um gnaiss cinza-claro, frequentemente exibindo bandamento composicional e feições de migmatização. As características do Gnaiss Belo Horizonte podem apresentar feições bastante variáveis. Entretanto, o tipo mais frequente exibe 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 $2860 \pm 14/-10$ Ma (NOCE, 1995), varia sua intensidade de forma muito irregular dentro da área investigada.

Nos estudos desenvolvidos por Doce, 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 anfibolitos, 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).

As **Figura 2.2-1 a Figura 2.2-4** apresentam afloramentos do gnaiss identificado em campo, que são possíveis de serem encontrados apenas em terrenos mais elevados. As **Figura 2.2-5 e Figura 2.2-6** evidenciam alguns dos mantos de intemperismo identificados na região, que ocorrem em toda região da bacia.



Figura 2.2-1 – Vista geral do afloramento de gnaisse observado em terrenos mais elevados da Bacia Vargem das Flores. Ao fundo observa-se o reservatório Vargem das Flores. Ponto amostral EAF-25.



Figura 2.2-2 – Detalhe do afloramento de gnaisse, que apresenta bandamento fino. Ponto amostral EAF-25.



Figura 2.2-3 – (A) Afloramento de rocha gnáissica observada em terrenos mais elevados da Bacia Vargem das Flores. Ponto amostral EAF-22.



Figura 2.2-4 – Dimensão dos grãos (média a grossa) e arranjo mineral típico. Ponto amostral EAF-22.



Figura 2.2-5 – Alterações e mantos de intemperismo (A) Material argilo-siltoso com cores brancas e alaranjada. Ponto amostral EAF-23.



Figura 2.2-6 – Solo residual de granito/gnaisse com textura silto-arenosa, coloração marrom alaranjada, sem estrutura reliquiar preservada. Ponto amostral EAF-23.

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 sub-superfície 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 2.2-7** 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).

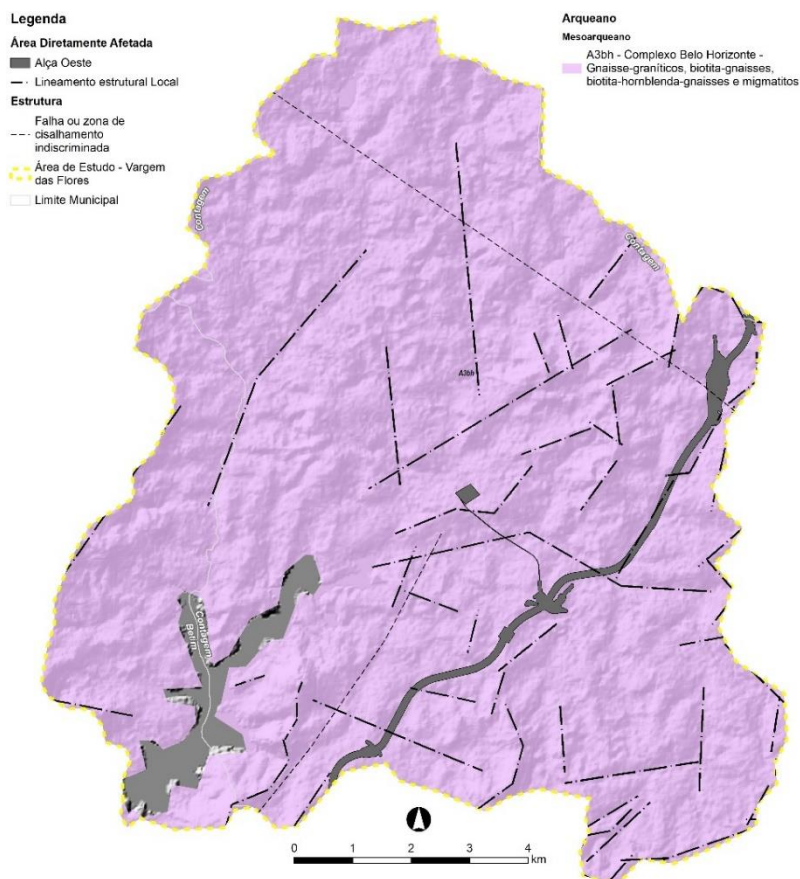


Figura 2.2-7 – Falhas Regionais e Lineamentos Estruturais Pertencentes ao Sistema Aquífero Granito-gnáissico da Bacia Vargem das Flores.

2.3 Geomorfologia

Segundo Santos et al. (2004), o relevo resulta da interação de processos que têm origem no interior da terra (processos endógenos) com processos que ocorrem na porção superficial (processos exógenos), a exemplo tem-se atuação dos agentes climáticos, ação fluvial, etc. Estes processos não são estáticos, continuando ao longo do tempo, ora construindo, ora destruindo as formas de relevo. Neste item será descrito aspectos da área de estudo relacionados aos compartimentos geomorfológicos definidos em função dos diferentes padrões de relevo, graus de dissecação do relevo, hipsometria, amplitude topográfica e declividade.

2.3.1 Hipsometria e Declividade

A geomorfologia da bacia hidrográfica Vargem das Flores está totalmente inserida no compartimento da depressão de Belo Horizonte, tendo atuação dos rios das Velhas e Paraopeba (afluentes do São Francisco) para sua formação. O relevo é esculpido, principalmente, por ação dos rios e seus tributários associada com a precipitação pluviométrica, principalmente nos meses chuvosos.

Para avaliação topográfica utilizou-se um Modelo Digital de Elevação (MDE) da Bacia Vargem das Flores, obtido através do satélite ALOS-PALSAR de junho de 2022 (Advanced Land Observing Satellite Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar). A partir da imagem, com resolução espacial de 12,5 m, identificou-se um intervalo altimétrico de 800 – 1050 m e um intervalo de declividade de 0 – 45%.

Para fins de caracterização topográfica, foram elaborados os mapas hipsométrico e de declividade (**Figura 2.3-1** e **Figura 2.3-2**). Os mapas são ferramentas de grande potencial para determinação de áreas críticas no que se refere à possibilidade de deslizamentos de encostas, de erodibilidade, análises de terreno para definição do planejamento de obras, traçados de perfis ecodinâmicos da paisagem, entre outros.

A bacia Vargem das Flores tem como característica áreas mais elevadas, que estão concentradas nos divisores de água que delimitam a bacia e nas áreas de nascentes dos córregos que abastecem o reservatório. As áreas de menor elevação se concentram, principalmente, no reservatório e no leito dos rios tributários. Como a área está integralmente inserida na litologia Complexo Belo Horizonte, constituída por rochas graníticas e gnáissicas, a variação topográfica é produto da ação dos rios, o que não foi capaz de produzir um relevo muito íngreme. Nesse sentido, as superfícies de aplainamento remetem a uma área de transição entre as colinas côncavo-convexas com vertentes não muito íngremes e pontões graníticos circundando a bacia Vargem das Flores.

Em vales amplos de fundo chato, a drenagem chega a formar meandros nas porções mais baixas demonstrando a dissecação do relevo por ação da água. Ainda nessa porção, observa-se mudanças significativas na direção dos rios, que reflete o padrão de estruturação do substrato gnáissico. Os divisores de água apresentam-se alongados e plano abaulados. Em alguns trechos ocorre uma interrupção provocada por pontões graníticos de grande declividade (SANTOS, 1999).

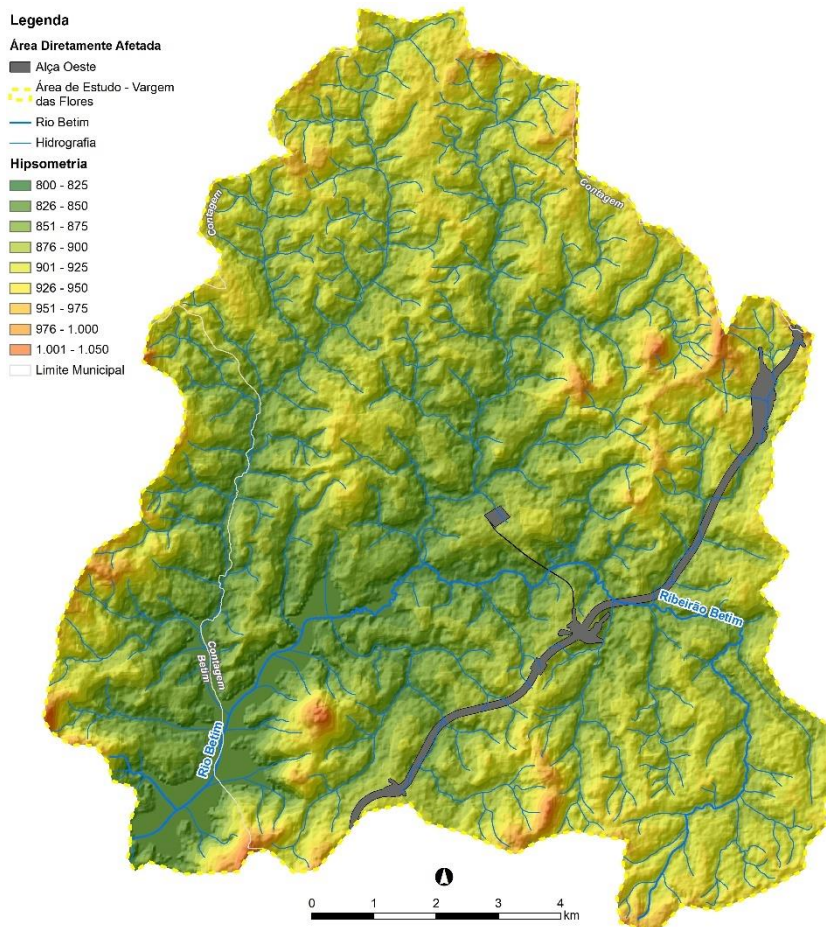


Figura 2.3-1 - Mapa Hipsométrico da Bacia Vargem das Flores.

No contexto da classificação dos tipos de relevo que Vargem das Flores apresenta utilizou-se a classificação da EMBRAPA (2006) que estabelece cinco classes de relevo contendo também o percentual representativo desse relevo na área, conforme **Quadro 2.3-1**. Os percentuais foram extraídos através do mapa.

Quadro 2.3-1 - Classificação de relevo conforme intervalos declividade

RELEVO	INTERVALOS – DECLIVIDADE (%)	PERCENTUAL NA ÁREA (%)
Plano	0 – 3	5,66
Suave Ondulado	3 – 8	22,52
Ondulado	8 – 20	51,49
Forte Ondulado	20 – 45	19,64
Montanhoso/ Escarpado	>45	0,70

Fonte: EMBRAPA (2006).

Para fins de caracterização da declividade do relevo foi elaborado o mapa (**Figura 2.3-2**). Na bacia Vargem das Flores há o predomínio do relevo ondulado de declividade entre 8 – 20% que é refletido com formas côncavas convexas.

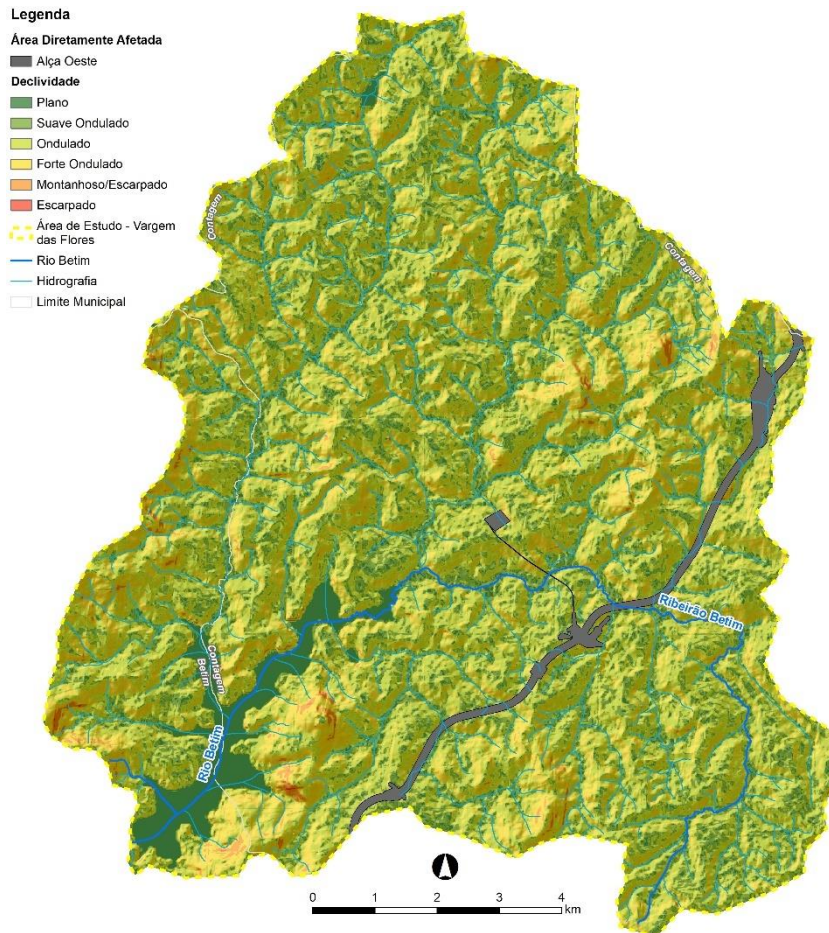


Figura 2.3-2 – Declividade Bacia Vargem das Flores.

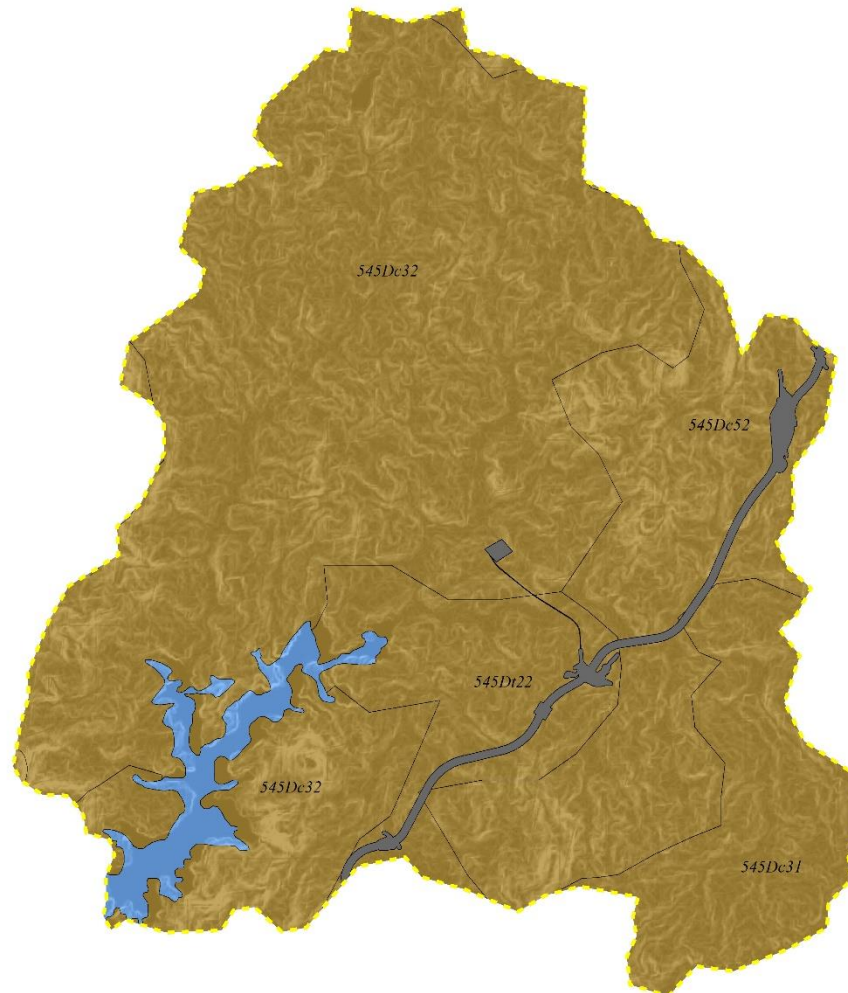
2.3.2 Unidades Geomorfológicas

Geomorfologicamente, a área de estudo está totalmente inserida na unidade geomorfológica Patamares de Belo Horizonte (545), definida por vales pouco profundos, apresentando vertentes de declividade suave, entalhadas por sulcos e cabeceiras de drenagem de primeira ordem em rochas granito-gnáissicas. Os relevos desta unidade geomorfológica possuem uma área de transição entre as colinas côncavo-convexas com vertentes não muito íngremes e pontões graníticos, localmente aflorantes, recobertos de vegetação da Mata Atlântica e Cerrado e são classificados por densidade fraca de drenagem a muito fraca.

A unidade Patamares de Belo Horizonte é descrita por Barbosa e Rodrigues (1965), como depressão do tipo periférica, correspondendo aos trechos de formas colinosas desenvolvidas entre a borda setentrional das estruturas pré-cambrianas do Quadrilátero Ferrífero e da Bacia Sedimentar do São Francisco, sendo caracterizada por vales pouco profundos, apresentando vertentes de declividade suave, entalhadas por sulcos e cabeceiras de drenagem de primeira ordem em rochas granito-gnáissicas. Constitui uma área de transição entre as colinas côncavo-convexas, com vertentes não muito íngremes e pontões graníticos, localmente aflorantes, recobertos de vegetação da Mata Atlântica, e as Chapadas Sedimentares do São Francisco, com vegetação de Cerrado.

A classificação da unidade Patamares de Belo Horizonte, foi realizada com base no arranjo de formas altimétricas e fisionomicamente semelhantes em seus diversos tipos de modelados, segundo o padrão descrito por Monteiro Filho (2009). Tais conjuntos de formas de relevo compõem compartimentos identificados como planícies, depressões, tabuleiros, chapadas, patamares, planaltos e serras. Por sua vez, os compartimentos, também, podem ser diferenciados pelos seus modelados, que abrangem um padrão de formas de relevo com definição geométrica similar em função de uma gênese comum e dos processos morfogenéticos atuantes, que podem ser: acumulação, aplanamento, dissolução e dissecação.

Assim, na bacia Vargem das Flores foram identificados os modelados de dissecação homogênea (D), caracterizado por dissecação fluvial, em geral, esculpido em rochas cristalinas e, eventualmente, também em sedimentos. Não apresenta controle estrutural marcante, caracterizado por colinas, morros e interflúvios tabulares, sendo classificado por fina densidade de drenagem tabular e fraca aprofundamento das incisões (Dt22) e por fina densidade de drenagem e médio aprofundamento das incisões (Dc32), conforme **Figura 2.3-3**.



MODELADOS DE ACUMULAÇÃO:

Planície Fluvial (Apf) – Área plana resultante de acumulação fluvial sujeita a inundações periódicas, correspondendo às várzeas atuais. Ocorre nos vales com preenchimento aluvial.

MODELADOS DE DISSECAÇÃO:

Homogênea Ou Diferencial (D) – Dissecação fluvial em litologias diversas que não apresenta controle estrutural marcante caracterizada predominantemente por colinas, morros e interflúvios tabulares, que é definida pela combinação das variáveis formas de topo, densidade de drenagem e aprofundamento das incisões.

Estrutural (DE) – Dissecação fluvial, marcada por evidente controle estrutural, em rochas muito deformadas, caracterizada por inúmeras cristas, vales e sulcos estruturais, comumente encontradas em rochas metamórficas. Apresenta formas de relevo irregulares enquadrando planos desnudados, com sulcos e ravinas entalhados na rocha são ou pouco alterada.

• **Formas de Topo:**

a – Conjunto de formas de relevo de topos estreitos e alongados, de aparência aguçada e que são esculpidas em rochas do embasamento cristalino, definidas por vales encaixados.

c – Conjunto de formas de relevo de topos convexos, esculpidas em rochas sedimentares e do embasamento cristalino, as vezes denotando controle estrutural. Definidas por vales pouco profundos, apresentando vertentes de declividade inclinação mediana, entalhada por sulcos e cabeceiras de drenagem de 1ª ordem.

t – Conjunto de formas de relevo de topos tabulares, conformando feições de rampas inclinadas e lombadas, esculpidas em rochas sedimentares e do embasamento cristalino, denotando eventualmente controle estrutural. Em geral definidas por vales rasos, apresentando vertentes de pequena e média declividade.

• **Índices de Dissecação do Relevo:**

Aprofundamento das Incisões (2º Dígito)	Densidade de Drenagem (1º Dígito)				
	Muito grosseira	Grosseira	Média	Fina	Muito Fina
Muito Fraco	11	21	31	41	51
Fraco	12	22	32	42	52
Médio	13	23	33	43	53
Forte	14	24	34	44	54
Muito Forte	15	25	35	45	55

Legenda

Área Diretamente Afetada

- Alça Oeste
- ▬ Área de Estudo - Vargem das Flores

Geomorfologia (IBGE)

- Patamares de Belo Horizonte
- Corpo d'água continental



Figura 2.3-3 - Mapa Geomorfológico da Bacia Vargem das Flores.

3 ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PRETÉRITOS

O item que se segue consolida o conhecimento já existente acerca do contexto hidrogeológico na área do aquífero granito-gnássico da região de Vargem das Flores. São apresentadas as nascentes cadastradas, as unidades hidrogeológicas já definidas para a área de estudo, dados de qualidade de água subterrânea existentes e perfis litológicos provenientes do cadastro de poços tubulares.

3.1 Nascentes Cadastradas

De acordo com o Código Florestal brasileiro, Lei nº 12.651/2012, Artigo 3º, XVII, nascente é um “afloramento natural do lençol freático que apresenta perenidade e dá início a um curso d’água”.

Adiante, o Código Florestal brasileiro, Artigo 4º, IV, atualizado pela Redação dada pela Lei nº 12.727, de 2012 define as Áreas de Preservação Permanente – APP no contexto das nascentes como “áreas no entorno das nascentes e dos olhos d’água perenes, qualquer que seja sua situação topográfica, no raio mínimo de 50 (cinquenta) metros.

Na área de estudo da bacia Vargem das Flores, tem-se o projeto “Contagem das Nascentes” criado pela Prefeitura de Contagem/MG em conjunto com a Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade – SEMAD, com objetivo de cadastrar todas as nascentes da cidade, de forma a possibilitar um planejamento para a recuperação e conservação das águas do município. O projeto se encontra em andamento e seus dados coletados até junho/2023 para a área de interesse é apresentado na **Figura 3.1-1**.

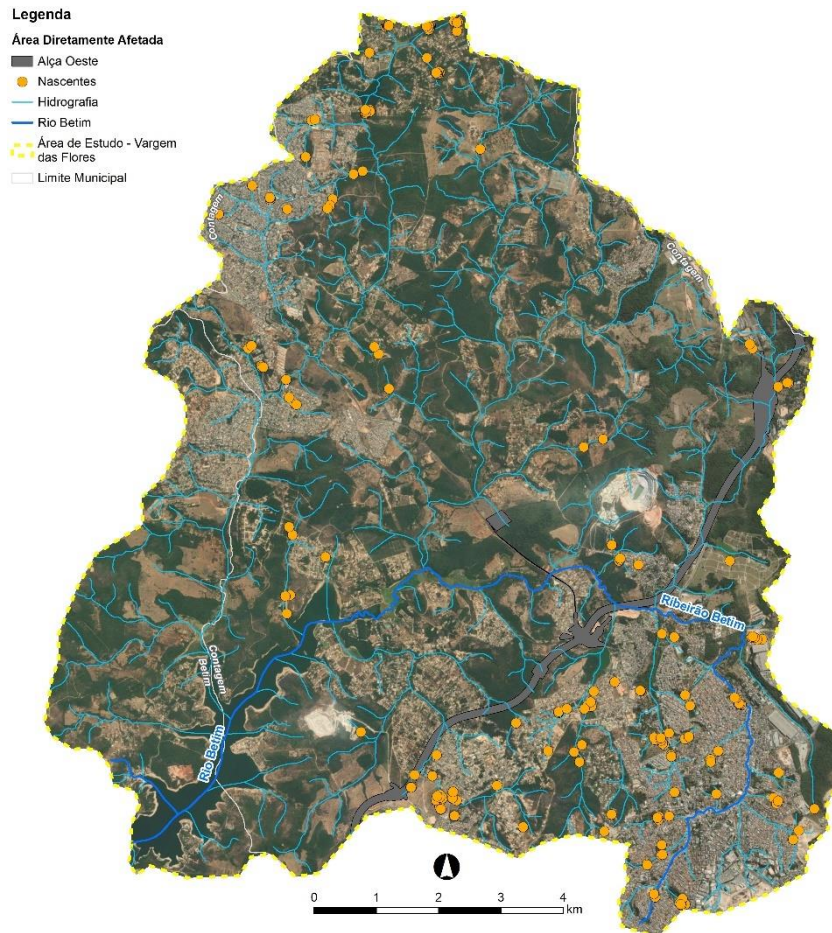


Figura 3.1-1 – Cadastro de Nascentes Bacia Vargem das Flores.
Fonte: Prefeitura de Contagem/MG & SEMAD (2023).

3.2 Unidades Hidrogeológicas

As unidades hidrogeológicas são definidas por Diniz et al. (2014), pelo agrupamento de unidades geológicas que armazenam e transmitem águas subterrâneas de forma semelhante. Neste caso, considera-se tão somente o tipo litológico predominante, resultando nas unidades hidrolitológicas que podem ser fraturadas, porosas ou cársticas.

A caracterização e delimitação do sistema aquífero pertencente a bacia Vargem das Flores ocorre principalmente 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, conforme observado na **Figura 3.2-1**.

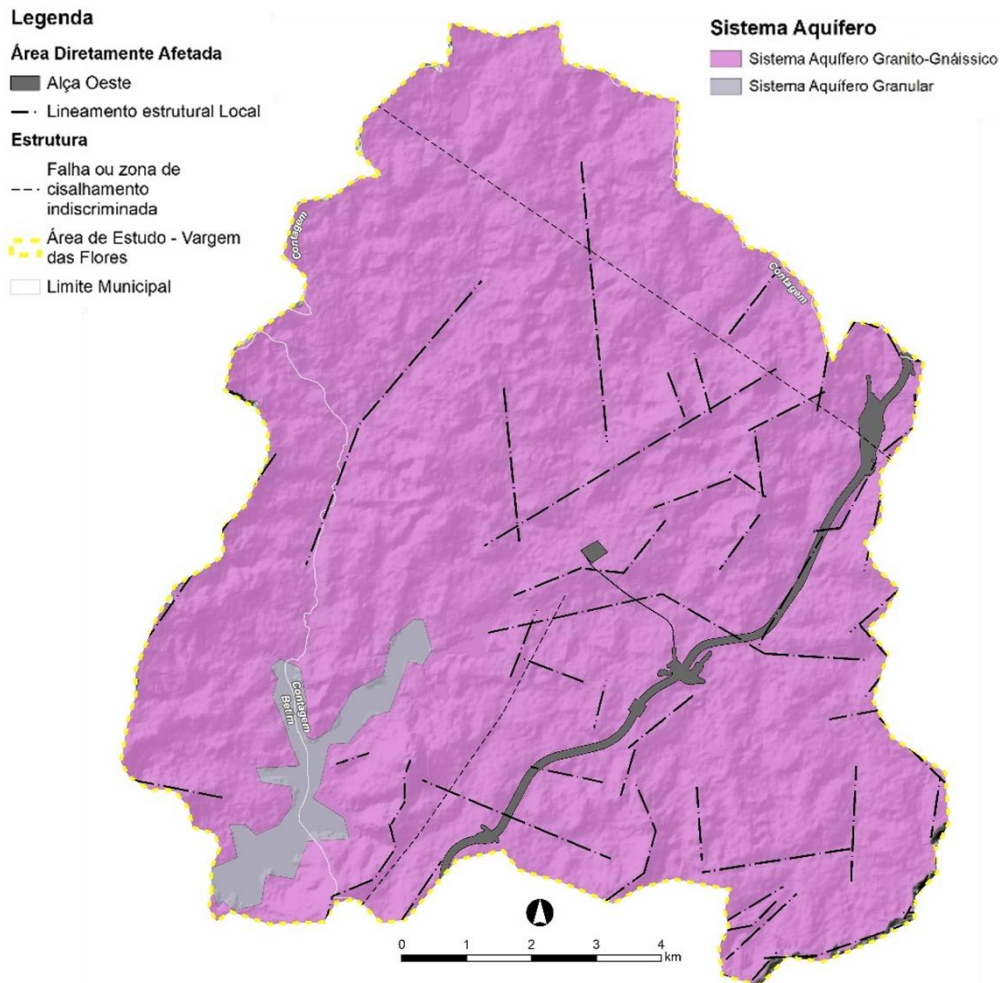


Figura 3.2-1 – Sistema Aquífero da bacia Vargem das Flores.

Fonte: Adaptado de Fiume et al. (2022).

Segundo Fiume et al. (2022) o Embasamento Indiferenciado, onde a bacia Vargem das Flores está inserida apresenta uma grande variedade de litotipos: gnaisse, xisto, granito, quartzito, migmatito, mármore, além de rochas metapelíticas, vulcânicas e metavulcânicas.

Segundo o autor supracitado, a região apresenta produtividade de “classe 4”, sendo predominantemente baixa, porém localmente moderada, com vazões de 10 m³/h a 25 m³/h em algumas áreas.

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.

Como a ocorrência e a distribuição das fraturas ocorre de modo aleatório, o aquífero é marcado por ter arranjo estrutural e morfológico muito heterogêneo. A unidade hidrogeológica fraturada é aquela com porosidade secundária, originada do fraturamento ou falhamento das rochas cristalinas, que apresenta canais de fluxo de água representados por fraturas de diversas origens, tamanhos e aberturas. São unidades restritas, descontínuas e localizadas, nas quais cada fenda ou um conjunto

restrito delas representam um aquífero, que nesse caso, pode ser denominado de sistema aquífero granito-gnáissico (DINIZ et al., 2014).

O sistema aquífero granito-gnáissico caracteriza-se por ser descontínuo, anisotrópico, heterogêneo, fraturado e livre a semiconfinado, devido à rocha alterada das formações superficiais. O embasamento granito-gnáissico é um aquífero de espessura de centenas de metros e sua produtividade está diretamente associada ao desenvolvimento do manto de alteração: quanto mais desenvolvido, melhor sua capacidade de recarga. A recarga se dá principalmente através dos cursos d'água encaixados em sistemas de fraturamento e a drenança a partir do manto de cobertura colúvio-eluvionar (DINIZ et al., 2014).

Conforme descrito por Beato et al., 2005, a rocha são, geralmente, encontra-se recoberta por um espesso manto de intemperismo que pode atingir algumas dezenas de metros. Beato et al. (2001), cita espessuras da ordem de 120 metros nas rochas granito-gnáissicas do Complexo Belo Horizonte, na região de Contagem. A circulação de água subterrânea neste aquíferos ocorre nas fraturas da rocha são e o fluxo tende aos baixos topográficos, onde se encontram os cursos d'água perenes que drenam o sistema. A capacidade de armazenamento é limitada e restrita às zonas de fraturamento, de onde é aproveitada por poços escavados e poços tubulares profundos com mediana de 78 metros. Todavia, quando ocorre um espesso manto de intemperismo argilo-arenoso pode favorecer significativamente o armazenamento, sendo frequente o uso de filtros no revestimento para captar as águas da rocha alterada – aquífero granular (BEATO et al., 2005).

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 e a rocha são e fraturada 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. O **Quadro 3.2-1** está apresentado uma descrição sucinta do sistema hidrogeológico identificado, caracterizados conforme Beato et al. (2005) modificado por Castro et al. (2020) e Fiume et al. (2022).

Quadro 3.2-1 - Classificação da Unidade Hidrogeológica Granito-gnáissica. S_y – Porosidade Efetiva; Q – Vazão; K – condutividade Hidráulica; Q/s – Capacidade Específica; T – Transmissividade; R – Recarga (% da precipitação média).

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

Fonte: Fiume et al. (2022); ¹ Castro et al. (2020).

3.3 Perfil Litológico

Para efeitos deste projeto, foram levantados dados de perfis litológicos de poços tubulares cadastrados no banco de dados do SIAGAS/CPRM para a descrição litológica do aquífero de interesse. Este conjunto de dados é necessário, uma vez que não há informações de perfis de

sondagens ou levantamento primário de dados disponíveis para a composição do banco de dados necessário para o estudo.

Com relação ao uso de dados de poços tubulares, a descrição física dos materiais interceptados pode gerar incertezas, pois ao contrário dos furos de sondagem com a recuperação de testemunhos, aqueles apresentam amostras de calha, sedimentos gerados pela perfuração que chegam à superfície por meio da circulação de fluidos (lama de perfuração). Por outro lado, ainda assim é possível gerar informações das profundidades das camadas existentes a partir de amostras de calha, podendo fornecer qualidade de informação suficiente para compor um banco de dados e subsidiar a elaboração de um modelo hidrogeológico conceitual representativo da área de estudo.

Os dados de 34 poços tubulares, provenientes do banco de dados do SIAGAS/CPRM, estão concentrados no Complexo Belo Horizonte, nas proximidades da área de estudo. As profundidades definidas para os diferentes tipos de solos argilosos ou arenosos, saprólitos e rocha gnáissicas ou graníticas são apresentadas na **Quadro 4.3-1** e **Figura 3.3-1**.

Quadro 3.3-1 - Síntese dos dados de 34 poços tubulares, provenientes do banco de dados do SIAGAS/CPRM. Estes dados são aplicados para a descrição das camadas para composição do modelo hidrogeológico conceitual.

Litologia	Profund. adotada (m)	Profund. Mínima (m)	Profund. Média (m)	Profund. Mediana (m)	Profund. Máxima (m)	Desv. Pad. (m)
Solo argilo-arenoso ou areno-argiloso	0,00 - 20,00	0,00	19,84	20,00	45,00	11,08
Saprolito granito-gnáissico	20,00 - 36,00	20,00*	37,02	36,00	54,00	11,80
Rocha granito-gnáissica ou indiferenciada	36,00 - 132,00	36,00*	109,75	113,00	132,00	15,96

*Definido com base na litologia anterior

Como os dados apresentam grande variabilidade e, ainda, foi necessário retirar alguns valores *outliers* do banco de dados relacionado aos solos, foi considerada uma espessura mediana do manto de intemperismo de 16 metros, o que é bastante coerente com as demais litologias observadas e o relevo da região.

A **Figura 3.3-1** apresenta o perfil litológico típico da região de estudo, definido com base na avaliação do banco de dados do SIAGAS/CPRM.



Figura 3.3-1 - Perfil litológico da Bacia Vargem das Flores. Ponto amostral EAF-06, ponto amostral EAF-01 e ponto amostral EAF-25.

4 MONITORAMENTO HIDROGEOLÓGICO

A avaliação dos dados disponíveis da rede de monitoramento hidrogeológico existente antes da implantação do Rodoanel Metropolitano BH possui o objetivo de caracterização geral do fluxo de base do aquífero de interesse e o entendimento dos principais fluxos das águas subterrâneas. Tais estudos auxiliam na definição dos possíveis impactos qualitativos e quantitativos, bem como nas consequências das modificações no lençol freático induzidos pela implantação da rodovia.

A caracterização apresentada neste item inclui dados coletados de estações fluviométricas e pluviométricas, bem como dados piezométricos medidos em poços tubulares e cadastros de nascentes (item 3.1).

4.1 Dados Fluviométricos

A caracterização do regime fluviométrico foi realizada para a região da bacia Vargem das Flores, interceptada pela Alça Oeste do traçado do Rodoanel Metropolitano BH. Para tanto, foi realizada consulta ao banco de dados da ANA, plataforma *Hidroweb*. A partir das coordenadas das estações fluviométricas presentes no inventário da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), disponível tanto em meio de banco de dados, formato *Microsoft Access*, quanto em *plugin* desenvolvido pela própria agência compatível com *software* QGIS, foi feito um levantamento de dados na bacia, porém, não foram identificadas estações nela inscritas.

Dessa forma, recorreu-se a técnica de regionalização de vazões para delinear o comportamento da vazão dessas bacias, tendo como base estações fluviométricas situadas no curso principal e em tributários do rio Paraopeba.

Após análise das séries, foram selecionados os dados de seis estações fluviométricas de responsabilidade da ANA. Para a escolha das estações utilizou-se como critérios a localização das estações na bacia do rio Paraopeba, nas proximidades de Vargem das Flores, com áreas de drenagem distintas, de forma a capturar comportamentos hidrológicos distintos entre bacias com áreas de drenagem variadas. Adicionalmente, atentou-se a representatividade temporal dos dados de vazões disponíveis, ou seja, registros de níveis e vazões com minimamente 30 anos de dados de monitoramento contínuo.

Cabe pontuar que o período de análise das estações restringiu-se aos anos de 1992 a 2021, de forma a se estabelecer um período comum entre as estações fluviométricas. Anos posteriores ou anteriores a este período apresentavam falhas, o que poderia trazer prejuízos às análises aqui pretendidas.

As principais informações acerca das estações selecionadas encontram-se sumariadas no **Quadro 4.1-1**. Já a **Figura 4.1-1** apresenta a distribuição espacial das estações analisadas, onde se destacam as estações que foram selecionadas para análise e caracterização hidrológica (triângulo roxo).

Quadro 4.1-1 - Lista das estações fluviométricas utilizadas para a caracterização da região de interesse.

ESTAÇÃO	CURSO D'ÁGUA	UTM E	UTM N	MUNICÍPIO	ÁREA DE DRENAGEM (km ²)	PERÍODO DE DADOS ANALISADOS
		SIRGAS 2000 UTM 23 S				
Ponte Nova do Paraopeba (40800001)	rio Paraopeba	572725.5	7794022.7	Betim	5680	1992 a 2021
Alberto Flores (40740000)	rio Paraopeba	587716.2	7769848.6	Brumadinho	4120	1992 a 2021
Suzana (40823500)	ribeirão Mateus Leme	566326.4	7792664.9	Juatuba	154	1992 a 2021
Jardim (40811100)	ribeirão Serra Azul	561814.4	7783153.0	Mateus Leme	113	1992 a 2021
Mateus Leme Aldeia (40822995)	ribeirão Mateus Leme	558700.3	7790080.4	Mateus Leme	113	1992 a 2021
Fazenda Pasto Grande (40810800)	ribeirão Serra Azul	558746.1	7778803.4	Mateus Leme	54,7	1992 a 2021

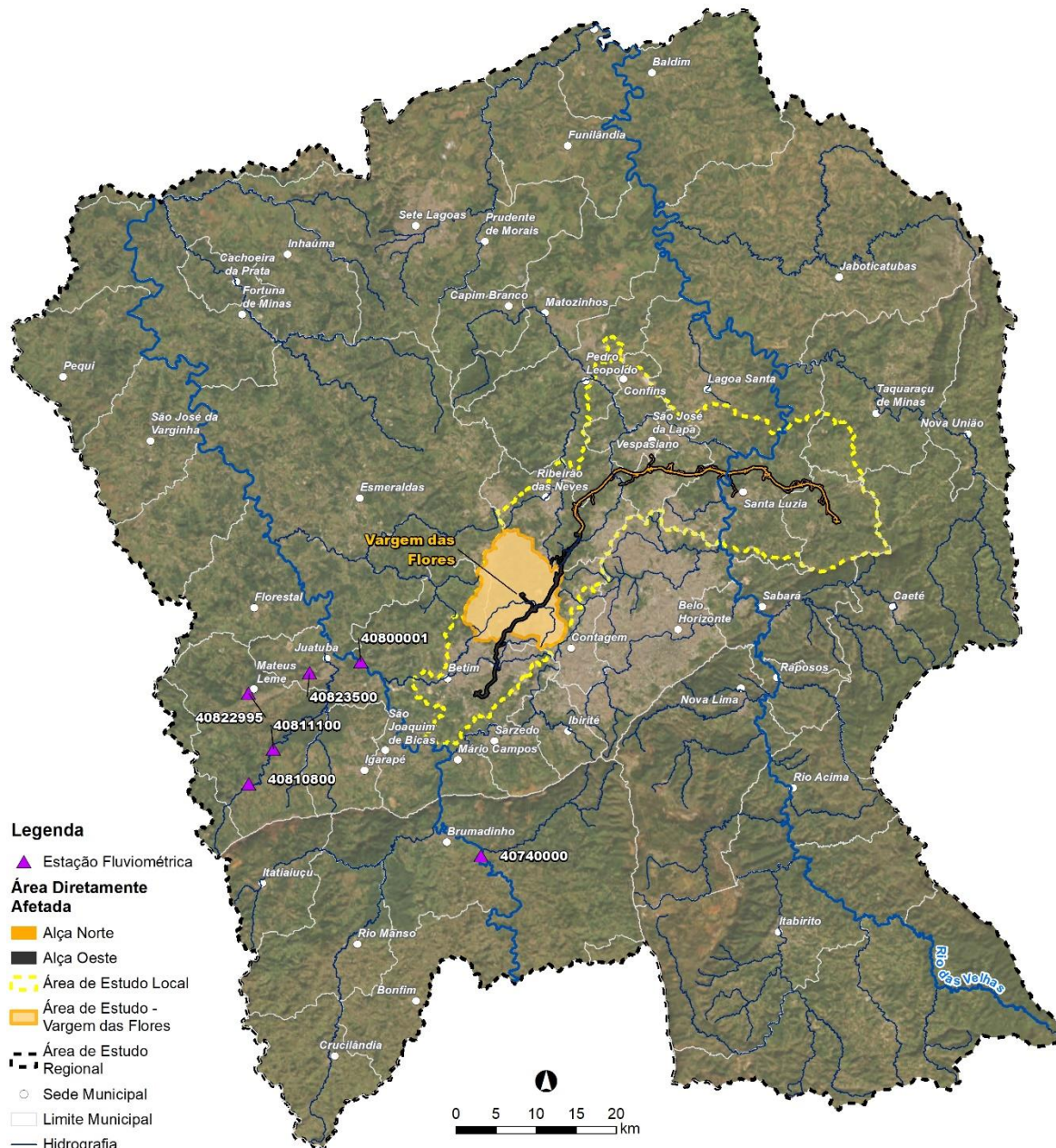


Figura 4.1-1 - Distribuição espacial da rede hidrométrica da Agência Nacional de Águas – ANA, na região do empreendimento.

Os dados das estações dispostas no **Quadro 4.1-2** possuem, regionalmente, comportamento homogêneo, demonstrando períodos de estiagem e de chuvas bem definidos. A **Figura 4.1-2** ilustra esse comportamento, tendo como exemplo as vazões médias mensais máximas, mínimas e médias registradas na estação Ponte Nova do Paraopeba (40800001). Devido a extensão da sua área de drenagem e pelo fato de estar localizada no curso principal do rio Paraopeba, a estação foi eleita para ilustrar o comportamento hidrológico médio na região.

Observa-se que os entre os meses maio a outubro tendem a ser os meses mais secos. Setembro é o mês de menor vazão na estação em questão com média mensal 34,8 m³/s, podendo variar entre

8,0 m³/s e 82,6 m³/s. De maneira oposta, janeiro apresenta a maior média mensal, 165,8 m³/s, podendo variar entre 24,4 m³/s e 496,4 m³/s, conforme série histórica de dados.

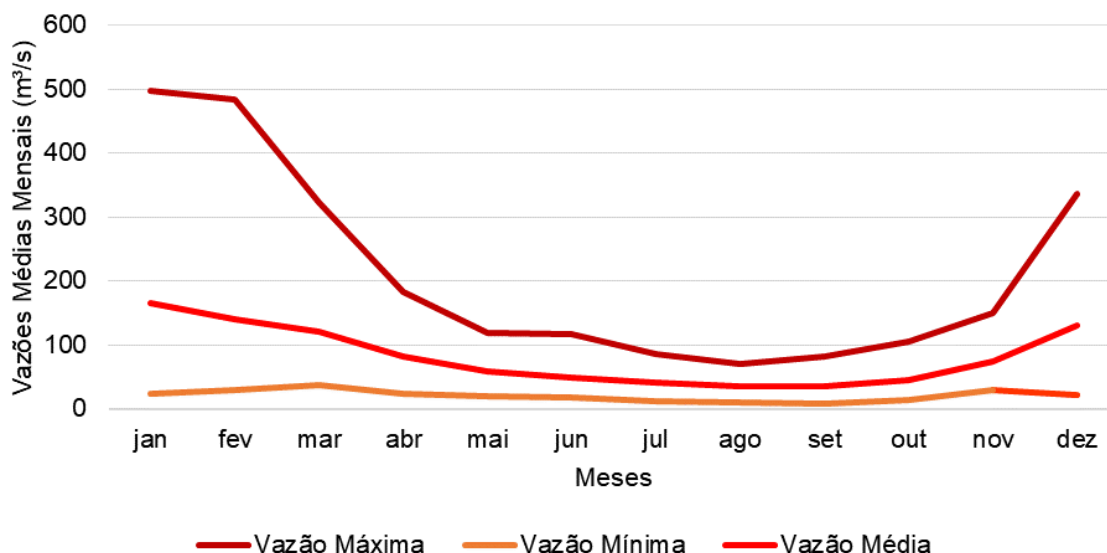


Figura 4.1-2 – Vazões mínimas, médias e máximas mensais na estação Ponte Nova do Paraopeba (40800001).

Quadro 4.1-2 - Vazões médias mensais na estação Ponte Nova do Paraopeba (40800001).

VAZÕES MENSAIS	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Máxima	496,4	484,4	321,8	182,6	118,3	117,1	86,3	69,6	82,6	105,4	150,4	336,8
Mínima	24,4	29,1	37,4	23,2	19,6	17,7	12,4	9,3	8,0	14,1	28,9	20,8
Média	165,8	139,9	121,5	81,2	58,7	49,1	41,3	35,0	34,8	44,3	73,2	130,4

Apesar de as discussões aqui apresentadas terem como base a estação Ponte Nova do Paraopeba, cabe pontuar que as demais estações listadas no **Quadro 4.1-1** possuem comportamento hidrológico semelhante, entretanto, apresentam menores vazões médias mensais devido a menor área de bacia que possuem.

O objetivo da seleção e da análise dessas estações fluviométricas é proporcionar uma caracterização em termos médios das vazões da região, bem como propiciar a quantificação do escoamento base. Essas duas vazões de referência suportam o modelo hidrogeológico da bacia de interesse. Nesse sentido, os itens a seguir oferecem uma caracterização do escoamento de base, propõem metodologia e apresenta resultados da quantificação deste a partir de técnica de separação do escoamento.

4.1.1 Escoamento de Base

A vazão medida no exutório de um curso d'água pode ser decomposta em três compartimentos: escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo. A proporção do volume de cada um desses componentes corresponde a vazão medida em uma seção qualquer de um curso d'água que

depende da interação da distribuição espaço-temporal da precipitação com as características fisiográficas, geomorfológicas, capacidade de infiltração e percolação do solo, uso ocupação da bacia dentre outros aspectos físicos da bacia (TUCCI, 1998). A **Figura 4.1-3** ilustra cada um desses componentes a partir de um hidrograma hipotético.

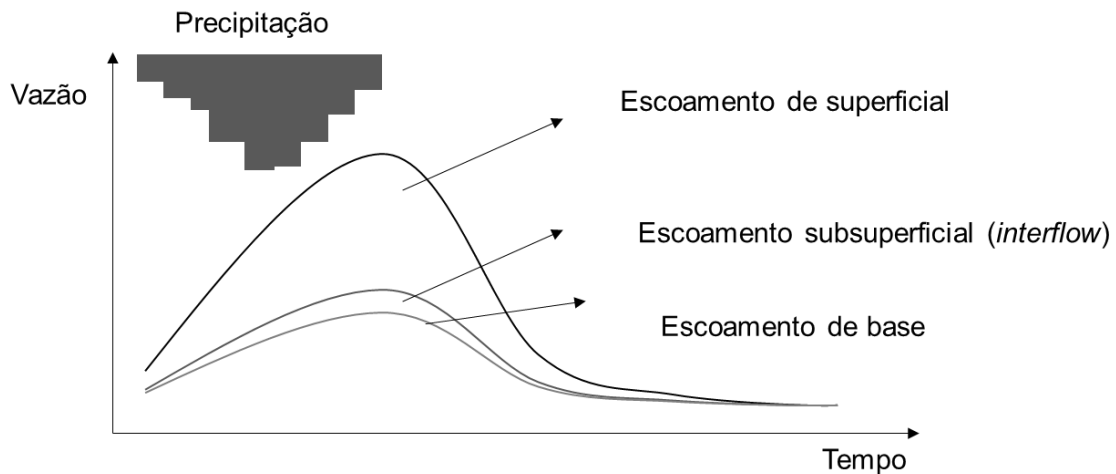


Figura 4.1-3 – Composição do escoamento.

Os três componentes do escoamento podem ser classificados e definidos da seguinte forma:

- **Escoamento superficial:** é uma consequência direta do excedente de chuva que cai sobre uma determinada bacia hidrográfica e flui livremente pelo terreno pelas linhas de maior declive (GARCEZ e ALVAREZ, 1988). Esse excedente, também chamado de chuva efetiva, corresponde à quantidade total de precipitação subtraída pelas perdas de água devido à interceptação pela vegetação e depressões no terreno, evapotranspiração e infiltração no solo. A dinâmica desse escoamento é influenciada por diversas características fisiográficas da bacia e desempenham um papel crucial na forma como o escoamento se propaga pela bacia, afetando a intensidade das cheias e o tempo necessário para atingir o pico (MAIDMENT, 1993).
- **Escoamento subsuperficial:** frequentemente denominado *interflow*, é gerado pela porção da precipitação que infiltra no solo e percola rapidamente pelas camadas superficiais. Este tipo de escoamento tem uma velocidade de propagação menor quando comparado ao escoamento superficial. Ambos o escoamento superficial e subsuperficial contribuem significativamente para a vazão de cheia observada em uma saída específica da bacia e são usualmente categorizados como componentes do escoamento direto (RIGGS, 1964).
- **Escoamento de base:** conhecido também como escoamento subterrâneo ou *baseflow*, corresponde à parcela da precipitação que infiltra no solo e atinge o lençol freático, contribuindo para a vazão constante dos rios durante períodos de estiagem.

4.1.2 Separação do Escoamento de Base

Durante os períodos de estiagem, o escoamento natural dos rios é quase por completo abastecido pela água subterrânea, visto que apresenta uma variação muito menor do que a variação observada durante as épocas chuvosas. Esse escoamento proveniente das águas subterrâneas é denominado

por escoamento de base e é crucial para sustentar os ecossistemas aquáticos e fornecer água para usos humanos, como agricultura e abastecimento público (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

No entanto, as atividades humanas e as mudanças climáticas podem impactar esse processo, ressaltando a importância de práticas sustentáveis de gerenciamento de recursos hídricos para garantir a disponibilidade contínua de água subterrânea. Na modelagem hidrogeológica, a determinação desse escoamento é essencial para calibração dos modelos, sendo feita a verificação da aderência deste à valores observados.

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.

Nesse sentido, tem-se que após a cessão do evento de precipitação e do escoamento direto, as vazões dos cursos d'água tendem a ser mantida somente pelo lençol freático. O comportamento temporal das vazões nesse período tende a seguir uma equação exponencial do tipo:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-t/k} \quad \text{Equação 1}$$

Onde t é o tempo, Q_0 é a vazão num instante t_0 , $Q(t)$ é a vazão num instante t e k é a constante de recessão do escoamento.

A constante é utilizada como parâmetro de entrada no filtro proposto por Eckhardt, dando sentido físico ao equacionamento matemático do filtro. Observando o período de recessão de uma série de vazões de uma estação fluviométrica, é possível observar o comportamento exponencial após a cessão do escoamento superficial. Ao se logaritimizarem os pares de dados de vazão e tempo, tem-se um comportamento linear desses, sendo que o coeficiente angular da reta ajustada descreve o inverso da constante k . Essa conclusão é bastante intuitiva, visto que ao se logaritimar a Equação 1, nota-se que essa torna-se a equação de uma reta, cujo valor da constante k exprime justamente o inverso do coeficiente angular desta equação.

Nesse sentido, foi estimado o valor k por meio da separação do período de recessão nos anos em que não ocorreram precipitações significativas no período de estiagem de cada uma das estações fluviométricas definidas no **Quadro 4.1-1**. O k foi estimado por meio do ajuste da Equação 1 aos dados observados por meio da função *solver* do Excel. Para isso, define-se uma função objetivo onde procura-se minimizar os desvios entre o dado observado e o ajuste da Equação 01, variando-se os valores de k .

A **Figura 4.1-4** ilustra a determinação dos valores de k por meio do ajuste da Equação 1 para a estação Alberto Flores (40704000), exemplificada para os anos de 2015 e 2016.

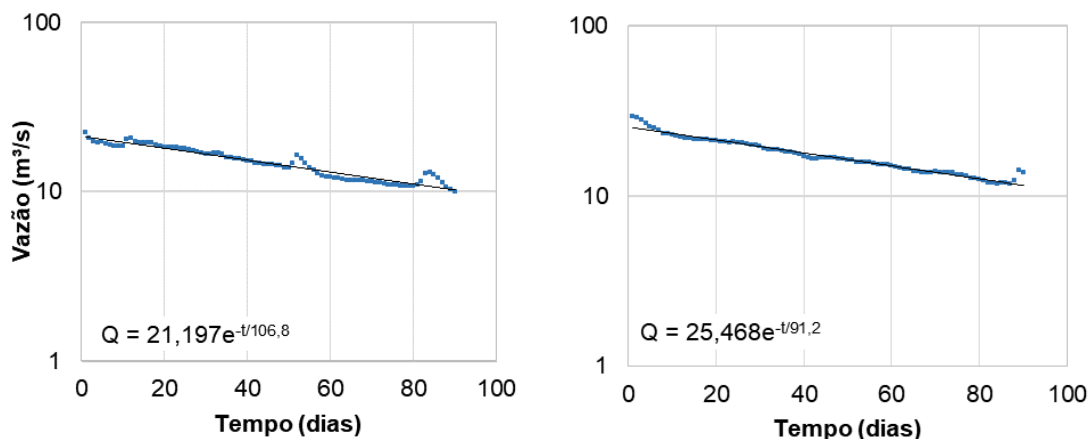


Figura 4.1-4 – Ajuste de equação exponencial para a determinação da constante k. Exemplo dos anos de 2015 (esquerda) e 2016 (direita) para a estação Alberto Flores (40704000).

A Figura 4.1-5 resume a variação dos valores médios de k obtidos nos períodos de estiagem entre os anos de 1992-2021 nas estações fluviométricas contempladas no estudo.

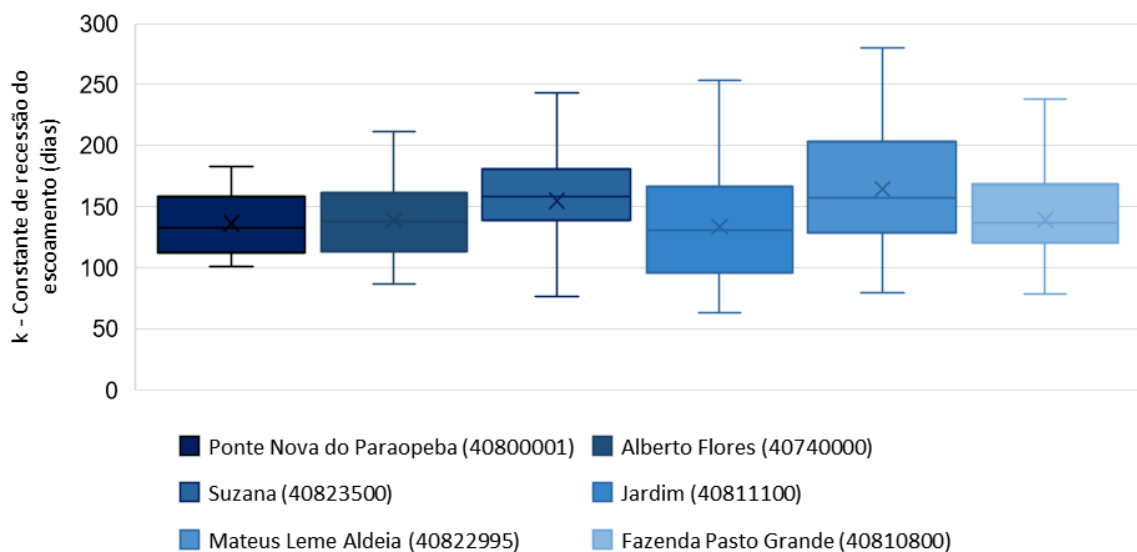


Figura 4.1-5 – Box-plot dos valores de k para as estações selecionadas.

Quadro 4.1-3 – Estatísticas dos valores de k para as estações selecionadas.

ESTATÍSTICA	PONTE NOVA DO PARAOPEBA (40800001)	ALBERTO FLORES (40740000)	SUZANA (40823500)	JARDIM (40811100)	MATEUS LEME ALDEIA (40822995)	FAZENDA PASTO GRANDE (40810800)
Média	136,3	139,2	154,8	134,0	164,8	139,3
Mediana	132,8	137,7	158,1	130,6	157,4	136,8
Desvio-Padrão	26,7	34,1	38,8	45,6	47,9	48,8

O próximo passo se encontra no Índice de Fluxo de Base (BFI), que relaciona o fluxo de base com a vazão total ao longo do tempo (**Equação 2**). O parâmetro BFI_{max} , que influencia o BFI e pode ser influenciado pela geologia local, é determinado conforme as propostas de Eckhardt (2005) ou por meio da relação Q_{90}/Q_{50} sugerida por Collischonn e Fan (2013).

$$BFI_{max} = 0,8344 \frac{Q_{90}}{Q_{50}} + 0,2146 \quad \text{Equação 2}$$

As ordenadas das vazões do escoamento de base podem ser definidas pela seguinte equação:

$$b_i = \frac{(1-BFI_{max})ab_{i-1} + (1-a)BFI_{max}}{1-aBFI_{max}} \quad \text{Equação 3}$$

Sendo b_i o escoamento de base no tempo i . A variável a é dada por:

$$a = e^{-\Delta t/k} \quad \text{Equação 4}$$

A partir aplicação da **Equação 3**, foi possível realizar a separação do escoamento de base para todas as estações selecionadas, conforme ilustrado da **Figura 4.1-6** a **Figura 4.1-11**.

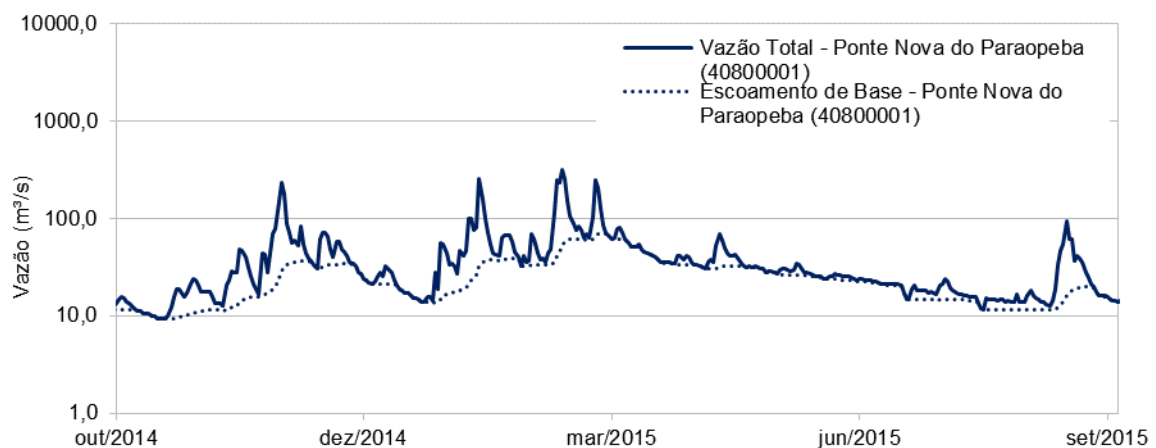


Figura 4.1-6 – Exemplificação da separação do escoamento de base na estação Ponte Nova do Paraopeba (40800001).

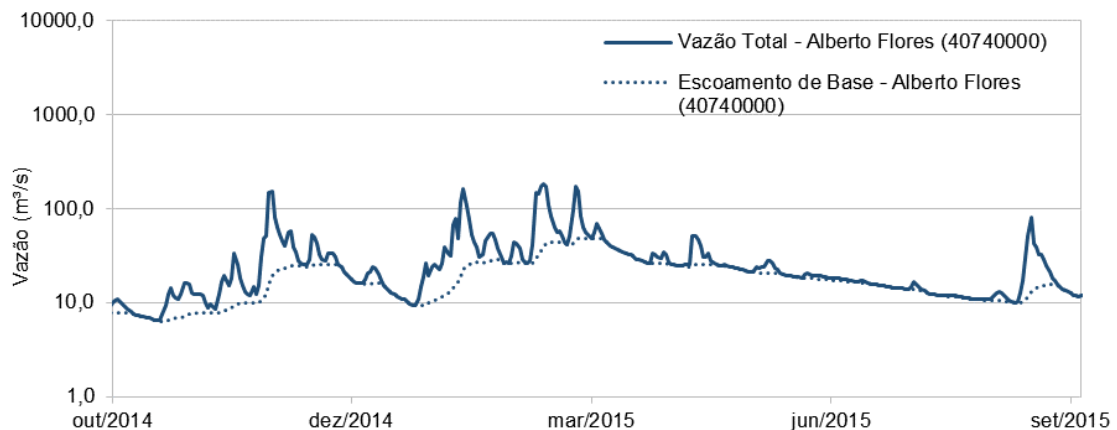


Figura 4.1-7 – Exemplificação da separação do escoamento de base na estação Alberto Flores (40740000).

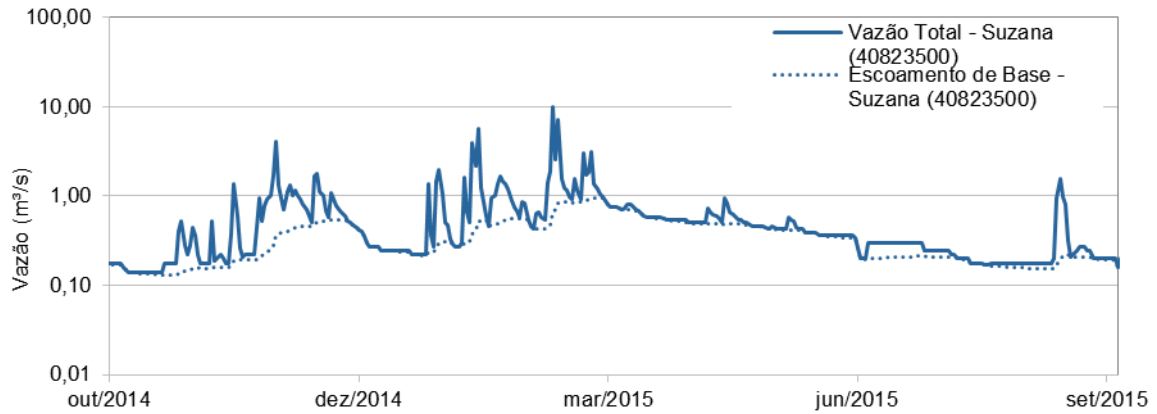


Figura 4.1-8 – Exemplificação da separação do escoamento de base na estação Suzana (40823500).

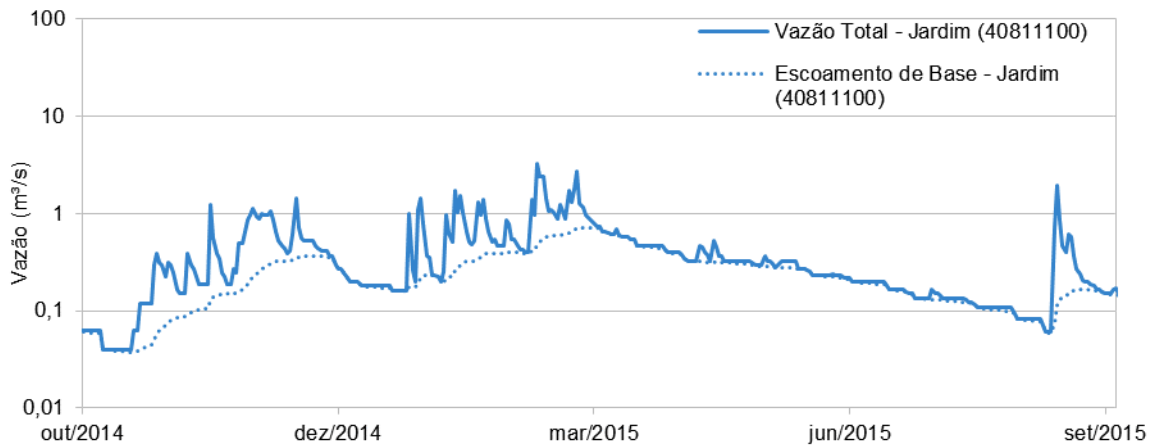


Figura 4.1-9 – Exemplificação da separação do escoamento de base na estação Jardim (40811100).

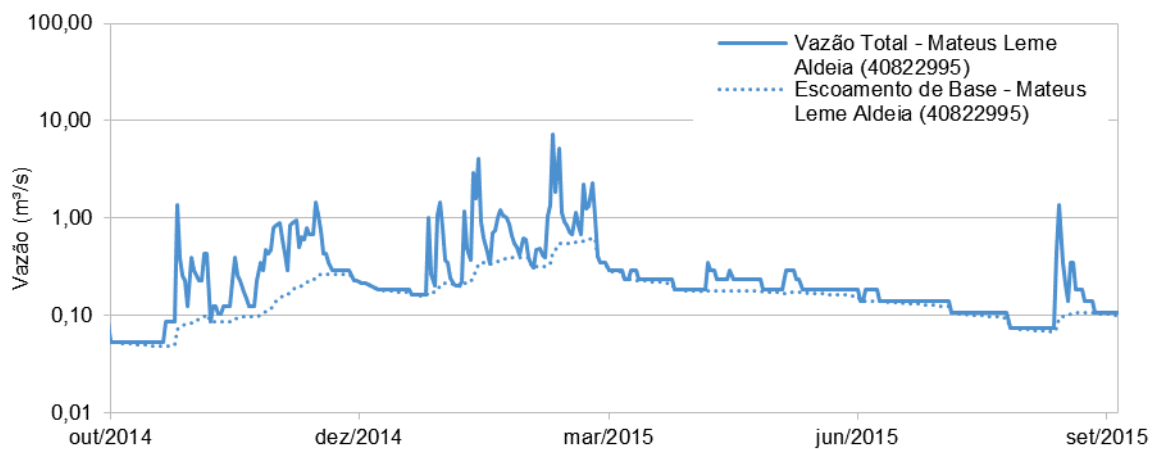


Figura 4.1-10 – Exemplificação da separação do escoamento de base na estação Mateus Leme de Aldeia (40822995).

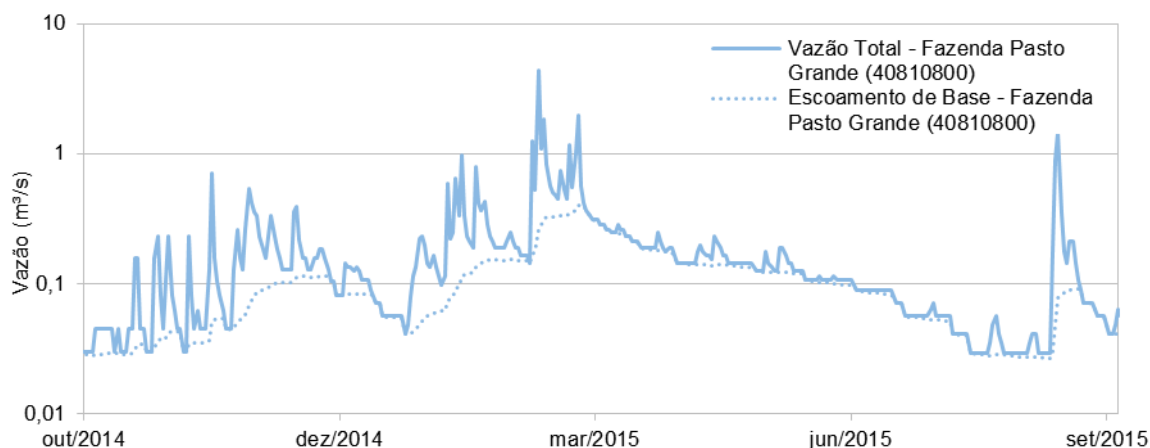


Figura 4.1-11 – Exemplificação da separação do escoamento de base na estação Fazenda Pasto Grande (40810800).

Os resultados da aplicação do filtro de Eckhardt sobre as séries históricas de vazões das estações selecionadas encontram-se resumidos no **Quadro 4.1-4**.

Quadro 4.1-4 - Resultados após aplicação Filtro Eckhardt.

ESTAÇÕES	AD (km ²)	CONSTANTE K	Q _{MLT} (m ³ /s)*	ESCOAMENTO DE BASE MÉDIO (m ³ /s)*	BFI _{MÁ} x	% FLUXO DE BASE**
Ponte Nova do Paraopeba (40800001)	5.680	136,3	74,78	50,42	0,79	67,4%
Alberto Flores (40740000)	4.120	139,2	56,81	38,57	0,79	67,9%
Suzana (40823500)	154	154,8	1,81	1,14	0,77	62,6%
Jardim (40811100)	113	134,0	1,20	0,80	0,76	66,1%
Mateus Leme Aldeia (40822995)	113	164,8	0,96	0,58	0,73	60,2%
Fazenda Pasto Grande (40810800)	54,7	139,3	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.

4.1.3 Regionalização de Vazões

A ausência de dados hidrológicos em grande parte das bacias no Brasil, é um grande obstáculo nos estudos dos impactos ambientais que podem ser causados a partir de atividades humanas. Portanto, a prática da regionalização de bacias, processo no qual se utiliza dados de bacias próximas e adapta através de métodos estatísticos, é extremamente comum e necessária para prosseguir com esses estudos, a fim de apresentar a melhor alternativa possível.

Visto que o estudo se propõe a analisar o comportamento hidrogeológico da bacia Vargem das Flores faz-se necessário regionalizar os valores encontrados de vazões médias mensais à bacia. Em estudos hidrológicos é usual aplicar uma regionalização simples, baseada no método de transferência de vazões por proporção de área de drenagens. Entretanto, esse método pressupõe que a vazão específica (m³/s.km⁻²) mantém-se a mesma tanto para a bacia a ser regionalizada quanto para a bacia da estação fluviométrica de referência. Essa manutenção da mesma vazão específica em bacias hidrográficas tende a ser verdadeira quanto menor for a diferença entre as

áreas de drenagem. Tucci (2002) pontua que quanto maior for a diferença entre as áreas de drenagem, maior tenderá ser o erro utilizando essa técnica, especialmente em bacias com drenagens menores que 50 km². Conforme discutido anteriormente, a área de drenagem do rio Betim, correspondente a bacia Vargem das Flores, possui 123 km², a utilização da vazão específica como forma de se regionalizar vazões às bacias de interesse poderia acarretar imprecisões e erros indesejados.

Uma alternativa a essa técnica mais simplificada é o uso da regressão com a área da bacia. Tucci (2002) sugere que vazões possuem boa correlação com a área da bacia, sendo essa correlação expressa de maneira satisfatória por meio de uma função de potência dada pela equação abaixo:

$$Q = a \cdot A^b \quad \text{Equação 5}$$

Sendo *a* e *b* coeficientes determinados por ajuste da equação aos dados observados por meio do método dos mínimos quadrados.

Nesse sentido, aos pares de área de drenagem das estações fluviométricas Ponte Nova do Paraopeba (40800001), Alberto Flores (40740000), Suzana (40823500), Jardim (40811100), Mateus Leme Aldeia (40822995), Fazenda Pasto Grande (40810800) e das suas respectivas vazões médias de longo termo e da vazão resultante média do escoamento de base foram ajustadas regressões lineares do tipo potência, sendo o resultado desses ajustes ilustrados na **Figura 4.1-12** e na **Figura 4.1-13**.

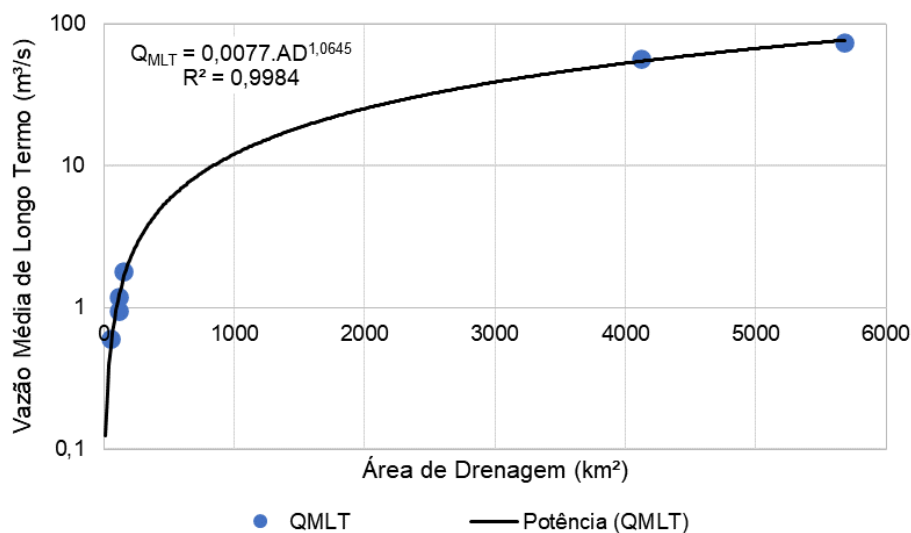


Figura 4.1-12 – Ajuste dos pares área de drenagem e Q_{MLT} das estações fluviométricas a função de potência.

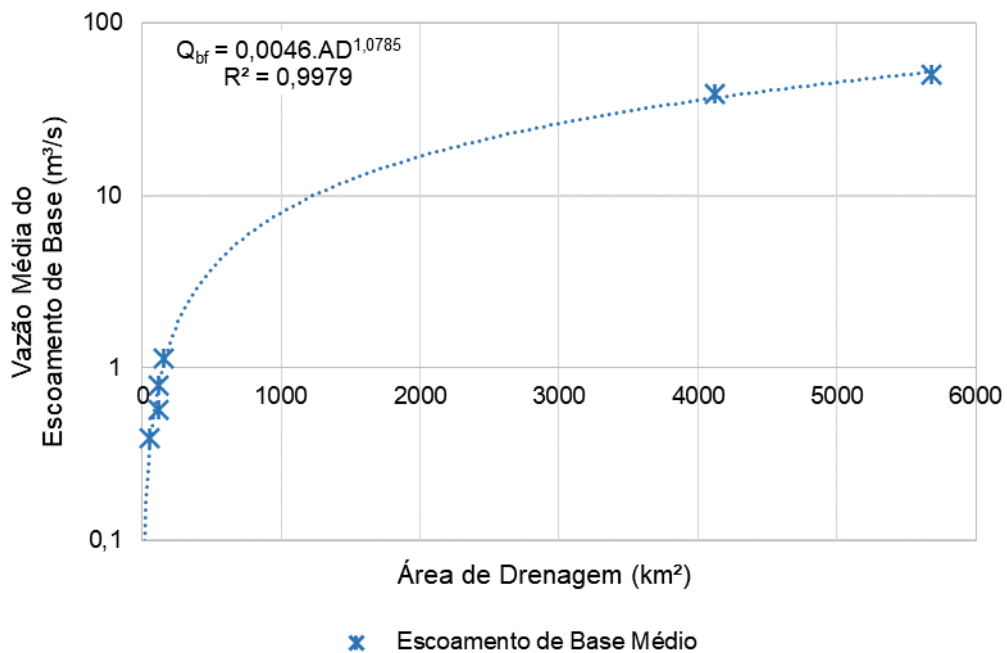


Figura 4.1-13 – Ajuste dos pares área de drenagem e o escoamento de base médio (Q_{bf}) das estações fluviométricas a função de potência.

Observa-se pelos valores dos coeficientes de determinação (R^2) que as equações do tipo potência proporcionaram excelente ajuste aos dados observados, habilitando-as como modelos de regionalização. Dessa forma, as vazões médias de longo termo e o escoamento de base médio na bacia Vargem das Flores podem ser estimados em função de sua área de drenagem a partir dessas equações, tal como resumido no **Quadro 4.1-5**.

Quadro 4.1-5 – Vazões regionalizadas para a bacia Vargem das Flores.

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

4.2 Dados Pluviométricos

A caracterização da pluviometria da região da bacia Vargem das Flores, que é interceptada pela Alça Oeste do Rodoanel Metropolitano BH, foi realizada por meio de consulta ao banco de dados da ANA, através da plataforma *Hidroweb* e de dados do *plugin* da própria agência no QGIS, além do bando de dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A partir da busca, não foram identificadas estações pluviométricas inseridas na área da bacia de interesse, que possuíssem registro de aproximadamente 30 anos de dados.

Dessa forma, com vistas a atender ao período de dados necessários e observando ainda a proximidade da área, a qualidade e disponibilidade de dados, foi selecionada a estação Belo

Horizonte (83587), localizada a aproximadamente 12 km da bacia Vargem das Flores, como mais representativa para a área. O **Quadro 4.2-1** apresenta as principais informações sobre a referida estação selecionada, enquanto a **Figura 4.2-1** apresenta a sua localização em relação à área de estudo para análise estatística de sua série de dados.

Quadro 4.2-1 - Estação pluviométrica utilizada na caracterização da região da bacia Vargem das Flores.

CÓDIGO	NOME DA ESTAÇÃO	UTM N	UTM N	MUNICÍPIO	ALTITUDE (m)	PERÍODO DE DADOS
		SIRGAS 2000				
83587	Belo Horizonte	2511775	4817694	Belo Horizonte	915,47	1992 a 2021

Observa-se, pela **Figura 4.2-1**, que tanto a estação Belo Horizonte (83587), quanto a bacia Vargem das Flores estão inseridas na zona climática subquente (temperatura entre 15 e 18 °C em pelo menos 1 mês, conforme descrito no Diagnóstico do Meio Físico).

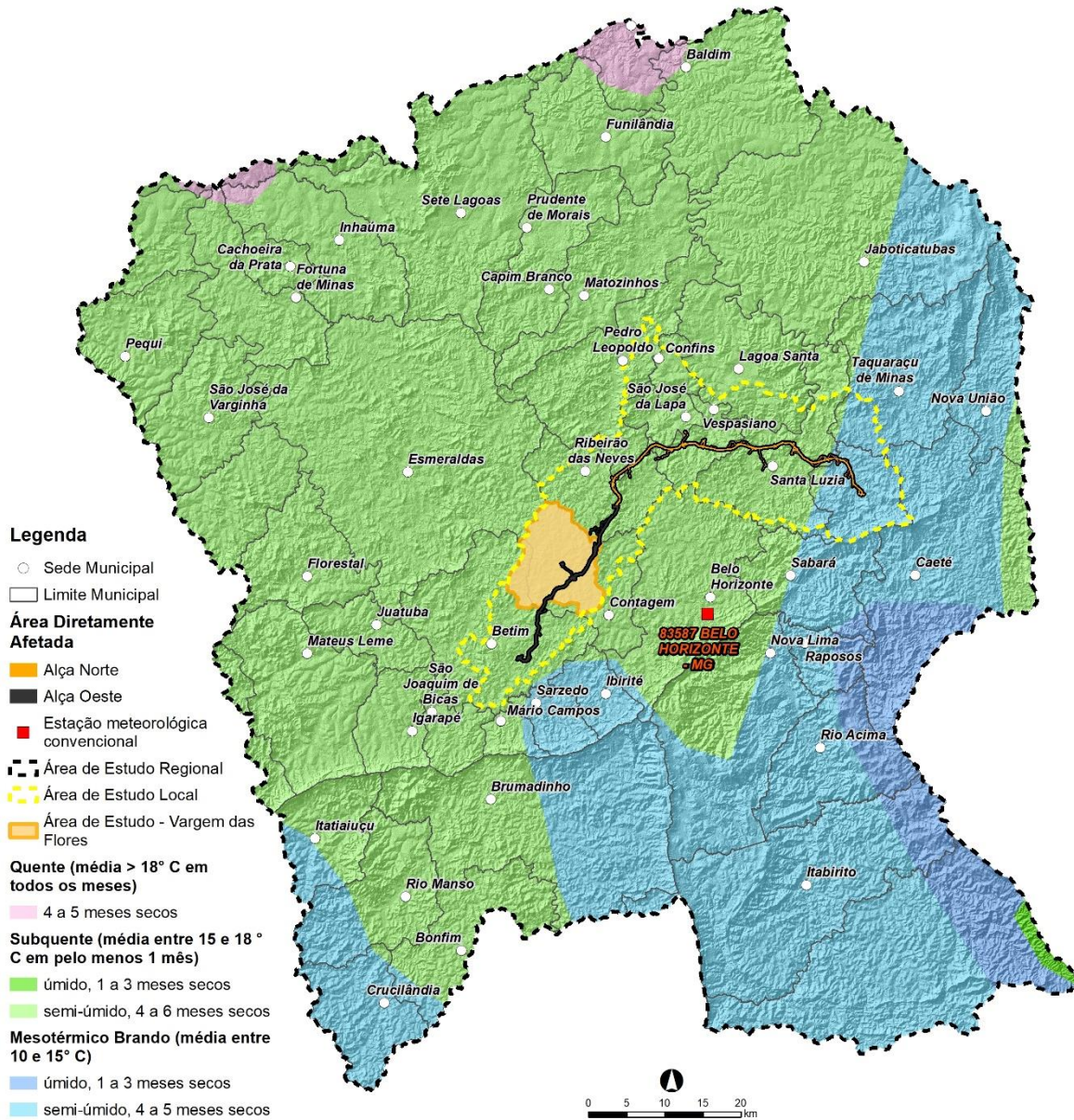


Figura 4.2-1 – Estação selecionada para a caracterização pluviométrica na bacia Vargem das Flores

Já o **Quadro 4.2-2** apresenta a variabilidade mensal da precipitação, através dos valores mínimos, médios e máximos durante o período de 1992 a 2021. 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, define-se o período seco, sendo observadas as médias de 5,6 a 11,0 mm, em julho e agosto, respectivamente.

Quadro 4.2-2 – 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

A **Figura 4.2-2** indica a precipitação anual acumulada durante os últimos 30 anos, de 1992 a 2021, além da média pluviométrica, que foi de 1575,82 mm para o período.

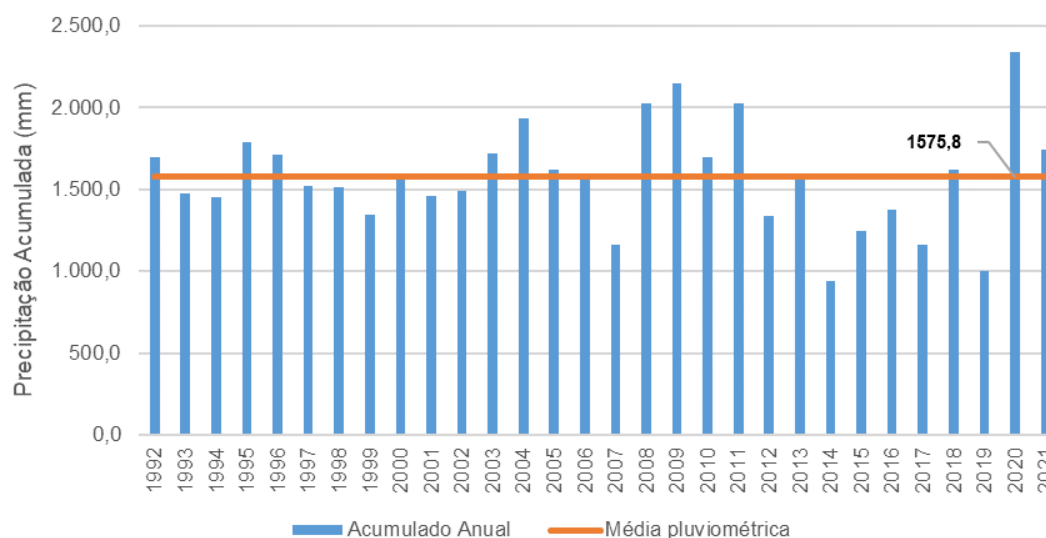


Figura 4.2-2 – Comportamento da precipitação anual durante o período de 1992 a 2021.

4.3 Piezometria

Uma superfície potenciométrica ou um mapa potenciométrico indica linhas equipotenciais de gradiente hidráulico, sendo muito utilizados para avaliação da direção do fluxo das águas subterrâneas e/ou para verificação de tendências a receber cargas contaminantes em determinados locais (DINIZ & MICHALUATE, 2002; BARROS et al., 2016).

As informações utilizadas foram nível estático, nível dinâmico, vazão estabilizada e capacidade específica provenientes do cadastro de poços tubulares profundos do banco de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS-CPRM). Os valores dos níveis estáticos selecionados foram subtraídos da cota altimétrica da boca do poço tubular, conforme Modelo Digital de Elevação (MDE) da Bacia Vargem das Flores, obtido através do satélite ALOS-PALSAR de junho de 2022 (Advanced Land Observing Satellite Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar).

A avaliação estatística do conjunto de 18 poços tubulares resultou na distribuição apresentada no **Quadro 4.3-1** para Nível Estático (m), Nível Dinâmico (m), Vazão de Teste (m³/h) e Capacidade Específica (m³/h/m). Estes dados foram obtidos do cadastro o SIAGAS do Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

Quadro 4.3-1 - Síntese dos dados de poços produtivos localizados no contexto geológico do Complexo Belo Horizonte.

ESTATÍSTICA	COTA NÍVEL ESTÁTICO (m)	COTA NÍVEL DINÂMICO (m)	VAZÃO DE ESTABILIZAÇÃO (m ³ /h)	CAPACIDADE ESPECÍFICA (m ³ /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

A média dos valores das cotas do nível estático (NE) e nível dinâmico (ND) foram 875,72 m e 835,89 m, respectivamente. A menor variabilidade da capacidade específica é coerente com o tipo de aquífero característico de um sistema fraturado, classificado como homogêneo. Vazões dos poços são diretamente proporcionais à densidade, abertura, conexão e tamanho das fraturas que interceptam o maciço rochoso onde o poço foi instalado. Observa-se que na média (11,29 m³/h) as vazões não são muito altas, entretanto podem ser encontrados valores que chegam a 37,87 m³/h, reforçando a ideia de que o maciço rochoso se apresenta fraturado.

A partir das cotas potenciométricas estabelecidas dos poços tubulares, adicionados mais 25 pontos de nascentes, com suas respectivas cotas topográficas, o tratamento de dados foi desenvolvido no *software* QGIS 3.28.8 aplicando o interpolador *Inverse Distance Weighted* (IDW) escolhido para este estudo. A **Figura 4.3-1** apresenta os resultados obtidos.

O mapa potenciométrico apresentado na **Figura 4.3-1**, indica a direção preferencial de fluxo da água subterrânea, que tende a acompanhar os fluxos dos cursos d'água superficiais, se iniciando em cotas mais elevadas com, aproximadamente, 920 m e, vai em direção ao exutório da bacia com 807,00 m.

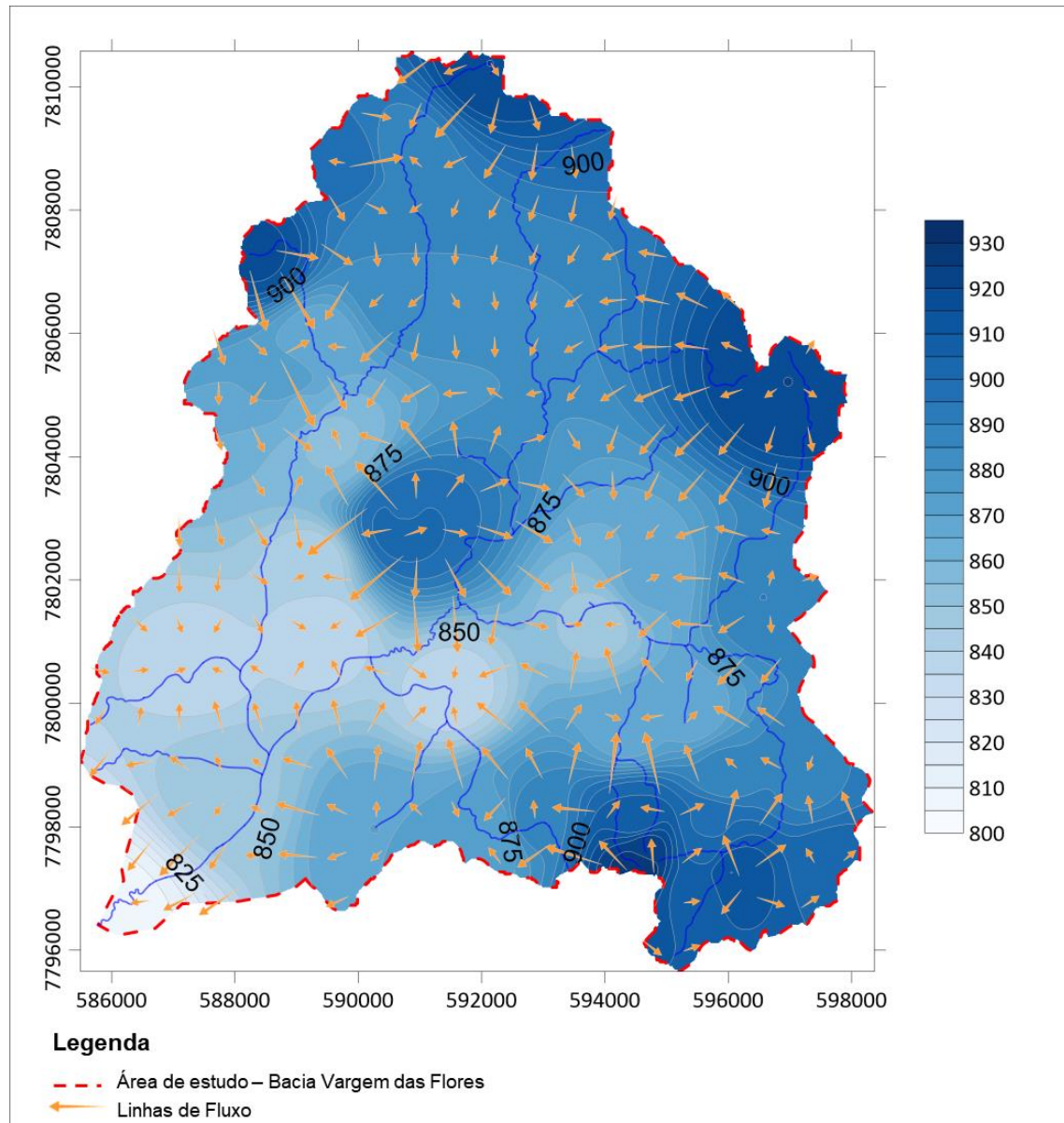


Figura 4.3-1 – Mapa Potenciométrico da bacia Vargem das Flores, gerado com valores de Nível Estático (m) dos poços tubulares cadastrados no SIAGAS/CPRM e cadastro de nascentes.

5 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

A modelagem hidrogeológica conceitual descreve, de forma simplificada, o movimento das águas subterrâneas em sistemas aquíferos, considerando diversas características importantes. Essas características englobam a direção do fluxo, as fontes de recarga e descarga hídrica, as condições de contorno do fluxo (como a compartimentalização do aquífero) e os caminhos preferenciais pelos quais a água se desloca (CÂNDIDO, 2018).

Estes modelos são chamados de "conceituais" dado que não são modelos matemáticos complexos e detalhados, mas sim representações qualitativas ou semi-quantitativas que usam diagramas, esquemas e mapas para ilustrar a estrutura e o funcionamento do sistema hidrogeológico. Com isso, os modelos conceituais têm importância adicional, uma vez que são as bases para a elaboração dos modelos matemáticos e computacionais, em geral, mais robustos e complexos (LOUSADA; CAMPOS, 2005).

5.1 Conceitos

De acordo com Cândido (2018), uma modelagem conceitual realizada a partir de métodos hidrogeológicos convencionais requer uma compreensão do meio físico da região de interesse, do uso e ocupação do solo, taxas de bombeamento e, até mesmo, da hidroquímica das águas subterrâneas quando disponíveis.

A realização de levantamento de campo da área de estudo é necessária, dado que cada contexto hidrogeológico deve ser analisado de forma independente. Dessa maneira, é indispensável uma caracterização das unidades hidrogeológicas, bem como a determinação das entradas e saídas hídricas e a definição dos parâmetros hidrodinâmicos de cada litologia a ser estudada (CÂNDIDO, 2018).

Em se tratando das unidades hidrogeológicas, as mesmas são identificadas e caracterizadas com base na litologia (composição geológica) e no comportamento hidráulico dessas unidades. São considerados diferentes tipos de sistemas hidrogeológicos, como aquíferos, aquícludes, aquíardos e aquífugos, dependendo de suas características.

No que tange as entradas e saídas hídricas, estas são as fontes de água que abastecem verticalmente os aquíferos, atingindo a região saturada, que podem ser estimados com base em levantamento de dados primários ou secundários. Os dados incluem, principalmente, a infiltração por parte da precipitação e descargas que ocorrem em rios e/ou cursos d'água, também chamados de fluxo de base.

Já os parâmetros hidrodinâmicos são fundamentais para entender a dinâmica das águas subterrâneas e são baseados nas características hidráulicas e hidrogeológicas dos sistemas aquíferos. Esses parâmetros podem ser estimados a partir de dados de campo, como testes de bombeamento e ensaios de permeabilidade, ou com base na literatura de regiões com características semelhantes e com base em levantamento de dados secundários em sites como da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

Os principais resultados resumem os modelos hidrogeológicos conceituais, que explicam as direções de escoamento, a circulação dos fluidos de acordo com as características litológicas e topográficas das regiões estudadas, como pode-se observar em trabalhos como os de Lopes et al. (2019) e Santarozza e Manzione (2017).

Os modelos hidrogeológicos conceituais desempenham um papel essencial na contribuição para os modelos de transporte de contaminantes, que podem estar correlacionados à recarga de aquíferos tanto na zona saturada quanto na não saturada. Esse estudo foi desenvolvido ainda no âmbito do Projeto de Licenciamento do Rodoanel Metropolitano BH e apresentado no **ANEXO 18** -

RODOANEL METROPOLITANO BH TRANSPORTE DE CONTAMINANTES VARGEM DAS FLORES.

5.2 Resultados e Discussões

A representação dos fluxos subterrâneos na região da bacia Vargem das Flores, pode ser dividida em dois tipos sistemas aquíferos, que são o aquífero granular, representado por solos e saprólitos que possuem uma espessura na faixa de 0,00 a 36,00 m e; aquífero fraturado, representado pelas formações granito-gnáissicas que se inicia após o horizonte de solos e saprólitos e vai até profundidades superiores a 132,00 m, como condição de contorno do modelo.

De forma geral, a recarga se dá principalmente através dos cursos d'água encaixados em sistemas de fraturamento e a drenança a partir do manto de cobertura colúvio-eluvionar. Sua produtividade está diretamente associada ao desenvolvimento do manto de alteração: quanto mais desenvolvido, melhor sua capacidade de recarga (DINIZ et al., 2014).

A bacia Vargem das Flores será interceptada pela alça oeste do traçado do Rodoanel Metropolitano BH e, pode passar por possíveis impactos qualitativos e quantitativos, bem como consequências das modificações no lençol freático induzidos pela implantação da rodovia.

A entrada da água na área de estudo é exclusivamente vinculada à precipitação pluvial representada, em média, por 1.575,70 mm/ano (conforme valores da normal de 1992 a 2021). A maior ocorrência de chuvas se dá durante o período chuvoso (dezembro a março) e menor precipitação ocorre durante o período seco (abril a novembro).

A água que incide na superfície do terreno tem dois destinos iniciais: infiltração e escoamento superficial. A parcela que é escoada como fluxo superficial é significativa e converge para os cursos d'água bacia, equivalendo a uma vazão média de 1,29 m³/s.

A outra parcela das águas, proveniente das chuvas, se infiltra na zona não saturada dos aquíferos granulares. A infiltração é um importante processo hidrológico, uma vez que, essa parcela representa o processo precursor da reposição da água na zona saturada, os 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 sudeste da bacia Vargem das Flores, a quantidade de nascentes cadastrada é elevada. Entretanto, a ocupação urbana excessiva na região, vem reduzindo a quantidade destas nascentes.

A partir da infiltração de água na zona não saturada do aquífero granular, a água tem três destinos: uma parte é usada para repor a umidade dos solos (principalmente na retomada do período chuvoso), outra parte migra lateralmente compondo o fluxo interno (*interflow*) e uma terceira parcela alcança a zona saturada definindo a própria recarga dos aquíferos.

A parcela correspondente ao fluxo interno, comumente irá apresentar curta duração, ocorrendo, exclusivamente durante os períodos chuvosos e quando a umidade se apresentar elevada. Essa parcela será direcionada para os cursos d'água próximos.

A terceira parcela, que alcança a zona saturada, por sua vez, terá dois caminhos distintos:

- Uma parte que ocupa o topo da zona saturada migra lateralmente em função do gradiente hidráulico, compondo o chamado fluxo de base. Essa parcela da água do aquífero é a principal responsável pela perenização dos cursos d'água da região. O fluxo ou escoamento de base é responsável pelo retorno da água subterrânea ao ambiente superficial, por descarga em nascentes ou diretamente nos cursos de água principais. Nesse caso, o cálculo do fluxo de base médio (B_f médio), apresentou valor equivalente a $0,83 \text{ m}^3/\text{s}$ para a bacia.
- Outra parte que ocupa a base da zona saturada migra para zonas de fraturas nas rochas sotopostas por drenança vertical, resultando em recarga dos aquíferos fraturados da rocha sã.

A **Figura 5.2-1** sintetiza o modelo hidrogeológico conceitual aplicado à região em estudo, que agrega a bacia hidrográfica Vargem das Flores. Essa ilustração esquemática objetiva representar os principais processos hidrológicos com ênfase à circulação das águas subterrâneas. Para a confecção da síntese do modelo conceitual foi utilizado o módulo *Hydrology* do ArcGis 10.6.

Modelo Hidrogeológico Conceitual

Sistema Aquífero Granular

■ Solo Residual / Saprolito de Granito-gnássise

Sistema Aquífero Fraturado

■ Granito-gnássise

— Traços de Fraturas

— Fraturas Subhorizontais

— Fratura Regional Indiscriminada

Altimetria (m)

■ 926

■ 802

Ciclo Hidrológico

1 Precipitação

2 Escoamento Superficial

3 Infiltração

4 Escoamento Interno

5 Percolação através das Fraturas

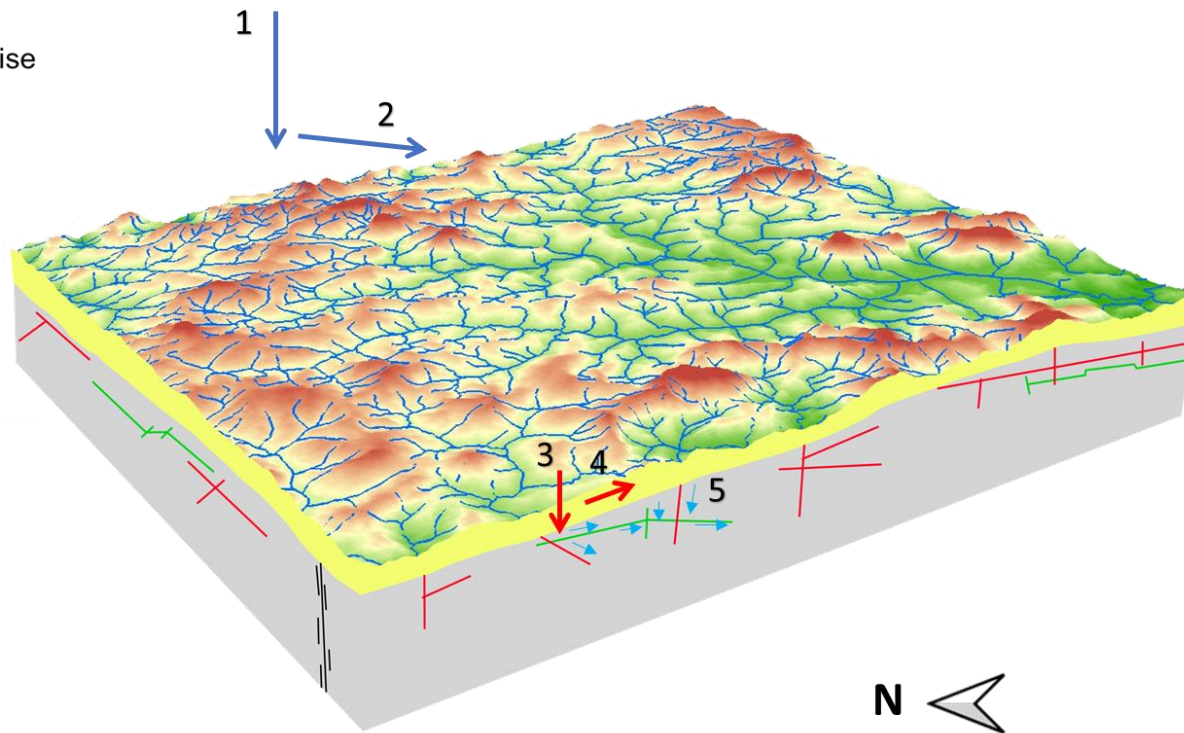


Figura 5.2-1 - Síntese do modelo hidrogeológico conceitual aplicado à área de estudo.

Os maciços rochosos se apresentam pouco fraturados. Geralmente apresentam locais com fraturas simples, isoladas ou com pequena abertura, que demonstram condutividades hidráulicas muito baixas (da ordem de grandeza de 10^{-8} ou 10^{-9} 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 m³/h/m, em espessuras médias inferiores a 50m.

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 e, vai em direção ao exutório da bacia com 807,00 m. O gradiente hidráulico calculado é de 1,06%.

A água que migra através das redes de fraturas dos maciços rochosos também pode alimentar a rede de cursos d'água superficial. Neste caso, devem formar nascentes classificadas como de fratura ou de falha. Ao contrário dos aquíferos freáticos responsáveis pela maior descarga para a rede superficial, os sistemas fraturados apenas contribuem com restritas vazões e mais comumente em locais com maiores amplitudes de relevos e onde os vales são mais encaixados.

As relações entre as chuvas (e sua distribuição temporal), o escoamento superficial, o escoamento interno e o escoamento de base explicam o comportamento sazonal dos cursos d'água da região. Nesse sentido, o escoamento de base é importante, pois mantém a perenidade dos córregos e cursos d'água. Ao longo do ciclo hidrológico, a região apresenta dois contrastes principais: cursos d'água secos ou com baixa vazão (período seco) e cursos d'água com fluxo rápido (período chuvoso). Os efeitos hidrológicos sazonais representam a resposta da interação dos aquíferos com os cursos d'água superficiais com a eficiência dos aquíferos freáticos na regularização das vazões superficiais.

As regiões que compreendem solo e saprolito apresentam permeabilidade mais alta e possuem maior eficiência para infiltrar e transmitir água, quando comparado com a porção fissural. No aquífero fissural a capacidade de infiltração e transmissão vai depender da densidade de fraturas, espaçamento dessas fraturas e da conectividade entre elas. Conforme Castro et al. (2020); Fiume et al. (2022), o embasamento granito-gnáissico do Complexo Belo Horizonte pode ser caracterizado como anisotrópico, de produtividade muito baixa, porém, localmente baixa, com baixo grau de fraturamento e, portanto, sua capacidade de infiltração e transmissão de água subterrânea é baixa.

6 CONCLUSÕES

Este estudo contemplou o desenvolvimento de um modelo hidrogeológico conceitual para a bacia de Vargem das Flores, na região em que será implantado o Rodoanel Metropolitano BH – MG. Este modelo tem como objetivo a caracterização do fluxo subterrâneo e o levantamento de informações de qualidade da água subterrânea em condições prévias à implantação do supracitado empreendimento.

Este trabalho contou com o levantamento de dados secundários e visitas de campo para confirmação e levantamento de dados primários. Como fonte de dados secundários, foram utilizadas as bases de dados do Serviço Geológico do Brasil, da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais (SEMAD-MG) e da Agência Nacional de Águas (ANA).

O traçado do Rodoanel Metropolitano BH intercepta diretamente tributários do rio Betim, que contribuem para a formação do reservatório de Vargem das Flores, um dos principais mananciais para abastecimento público da região metropolitana de Belo Horizonte.

Neste trecho, o Rodoanel Metropolitano BH está geologicamente inserido no contexto do Complexo Belo Horizonte, composto predominantemente por gnaisses e granitoides Neoarqueanos. Neste contexto, verifica-se a formação de dois sistemas aquíferos, um sistema poroso e granular formado pelo solo e manto de alteração das rochas parentais e outro sistema fissural, formado pelo sistema de fraturas, falhas e outras estruturas regionais do embasamento cristalino existente que favorecem o armazenamento e a circulação da água subterrânea.

Nestes sistemas, a recarga ocorre através da infiltração da água da chuva através do solo e pela contribuição da rede de drenagem da região inseridas em lineamentos, associada ao próprio relevo da área em tela. As principais zonas de descarga são caracterizadas pelas nascentes e da rede de drenagem. Pelo estudo hidrológico realizado observou-se que na bacia Vargem das Flores o fluxo de base representa um percentual superior a 60% da vazão dos rios e córregos locais.

O mapa potenciométrico elaborado com base nos poços presentes na bacia indicam que o nível d'água subterrâneo tende a acompanhar a superfície topográfica e o fluxo ocorre acompanhando a direção das drenagens principais da bacia. A direção de fluxo ocorre predominantemente de NE para SW, em direção ao exutório da bacia após a barragem.

Com base no que foi exposto, foi possível a elaboração do modelo hidrogeológico conceitual que indica os principais processos hidrológicos da região da bacia Vargem das Flores com ênfase à circulação das águas subterrâneas. Nesse contexto, foram apresentados dois sistemas aquíferos: granular e fraturado. O primeiro relacionado aos materiais de solo residual e saprolito, apresentando espessura média até 36 m de profundidade, e o segundo relacionado aos maciços rochosos, que se apresentam pouco fraturados, limitados a 132 m de profundidade pelos perfis litológicos avaliados.

Os maciços rochosos, geralmente, apresentam fraturas simples, isoladas ou com pequena abertura, que demonstram condutividades hidráulicas muito baixas (da ordem de grandeza de 10^{-8} ou 10^{-9} cm/s). Em contrapartida, regiões que compreendem solo e saprolito irão apresentar permeabilidade mais alta e, por isso, irão possuir maior eficiência para infiltrar e transmitir água, quando comparado com a porção fissural.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA, Agência Nacional das Águas. **Sistema Paraopeba**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/outros-sistemas-hidricos/paraopeba>

BEATO, Décio A. C. Coord.; DUTRA, Georgete M. Estudo hidrogeológico da Bacia da Lagoa da Pampulha. Belo Horizonte: CPRM/PBH, 2001. 151p

BEATO, D.A.C.; MONSORES, A.L.M.; BERTACHINI, A. C. **Hidrogeologia**. In: Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico: área de proteção ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005.v.9.

BRANDALISE, Luiz Alberto; HEINECK, Carlos Alberto (Orgs.). **Belo Horizonte: folha SE.23-Z-C-VI: estado de Minas Gerais. Brasília: CPRM, 1999. Escala 1:100.000.** Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB.

BRASIL. **LEI Nº 12.651, DE 25 DE MAIO DE 2012.** Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Acessado em 19 de junho de 2023.

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.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. **Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, p. 336, 2013.

COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. **Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter.** Hydrological Processes, v. 27, n. 18, p. 2614-2622, 2013.

DEODORO, S. C. **O uso de Macroinvertebrados Bentônicos como bioindicadores de qualidade das águas de uma lagoa artificial em parque urbano: uma ferramenta para a gestão de recursos hídricos.** Monografia de Especialização. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-99WG9Z>

DINIZ, H. N.; MICHALUATE, W. J. 2002. Interpretação de Testes de Vazão em Poços Tubulares Profundos, Dimensionamento e Especificações de Bombas Submersas. 2002.

DINIZ, João Alberto Oliveira et al. **Manual de cartografia hidrogeológica.** CPRM, 2014.

DINIZ, João Alberto Oliveira et al. **Manual de cartografia hidrogeológica.** [Recife]: CPRM, 2014.

DINIZ, João Alberto Oliveira et al. **Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo: nota técnica.** Recife: CPRM, 2014. 43 p. il., color. Escala 1:5.000.000.

DRISCOLL, F.G. (1995). **Ground Water and Wells**, Johnson Screens. Minnesota. 1089 pp.

FEITOSA, A.C.F. & MANOEL FILHO, J. (Coord.). (2009). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** CPRM/LABHID. 3ª Edição Fortaleza. 589 pp.

FEITOSA, F. A. C. (2008). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações.** CPRM – Serviço Geológico do Brasil – Rio de Janeiro/RJ. 812p.

FEITOSA, E. C.; FEITOSA, F. A. C. (2008). **Metodologia Básica de pesquisa de água subterrânea.** In: FEITOSA, F. A. C., et al. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. CPRM – Serviço Geológico do Brasil – Rio de Janeiro/RJ. p. 179-207.

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

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.

GARCEZ, Lucas Nogueira; ALVAREZ, Guillermo Acosta. **Hidrologia.** Editora Blucher, 1988.

LOPES, C. U. C. H.; MIRANDA, F. B. O.; BOTINHA, F. S. ALMEIDA, F. C. M.; NASCIMENTO, L. G. S.; CÂMARA, L. A.; GAVIÃO, P. A. B. **Percepção ambiental da comunidade imediata ao entorno do “Parque” Municipal Felisberto Neves, Betim-MG.** SINAPSE AMBIENTAL, v.4 n.2, dezembro, 2007. Disponível em: http://portal.pucminas.br/graduacao/cursos/arquivos/ARE_ARQ_REVIS_ELETR20071221111211.pdf

MAIDMENT, D. **Handbook of hydrology.** McGraw-Hill, New York. 1993.

MONTEIRO FILHO, C.J – IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico de Geomorfologia.** 2ª ed. Rio de Janeiro, 2009.

MORAIS, T. S. (2012). **Análise da influência do uso e ocupação do solo na represa de Vargem das Flores e seus reflexos no assoreamento do reservatório.** Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/TratInfEspacial_MoraisTS_1.pdf

MOURÃO, M. A. A.; PEIXINHO, F. C.; FEITOSA, F. A. C.; BARRETO, A. B. da C. (2009). **Fundamento para implantação da rede básica nacional de monitoramento integrado das águas subterrâneas.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRHidro), XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande – MS, 20 p.

PARIZZI, M. G. **Riscos geológicos e hidrológicos no município de Belo Horizonte, MG.** Departamento de Geologia – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 17p.

PENA, N. S. (2018). **Gestão compartilhada de recursos hídricos na bacia hidrográfica de Vargem das Flores.** Monografia de Especialização. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-BCEHJ5/1/monografia_p_s_recursos_h_dricos___nilma_2018.pdf

RIGGS. H. C. **The baseflow recession curve as an indicator of ground water.** International Association of Scientific Hydrology Publication, vol. 63, 1964.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; DUTRA, A. J. B.; PENNA, M. T. M.. Manganês. IN: **Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações.** 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 633-648.

SANTOS, A. L. V. (2016). **Impactos ambientais da ocupação na APA Vargem das Flores: Município de Contagem/MG.** Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/TratInfEspacial_SantosAL_1.pdf

SANTOS, A. C. **Noções de Hidroquímica.** In: FEITOSA, F. A.C.; FILHO, J. M; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, p. 325-357, 2008

SANTOS, E. P. **Vargem das Flores: Diagnóstico ambiental e proposições para recuperação das áreas degradadas** – 1999

SANTOS, K. D.; CASTROS, S.; JUNIOR, S. R. V.; SILVEIRA, G. T. **Estudo da qualidade da água da Lagoa da Pampulha / Belo Horizonte – MG**. Revista Uniaraguaia v.16, Goiânia, p.121-137, 2021.

SILVA, A. B. da. **Evolução química das águas subterrâneas**. Águas Subterrâneas, [S. l.], v. 7, n. 1, 1984. DOI: 10.14295/ras.v7i1.11253. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/11253>.

TUCCI, C.E. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2001. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH.