

Artigos

Relações entre Mineração e Recursos Hídricos Subterrâneos: O Caso da Mina Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero, MG

Relationship between Mining and Groundwater Resources: The Case of Capão Xavier Mine, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais State, Brazil

Rodrigo Miguel¹; José Campos²

¹ Universidade de Brasília (UNB), Brasília, DF.

² Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UNB), Brasília, DF.

✉ rodrigocesar1234@gmail.com, eloi@unb.br

Palavras-chave:

Gestão de recursos hídricos;
Conflito entre usuários;
Urbanização;
Mineração.

Resumo

De forma geral a relação entre mineração e recursos hídricos subterrâneos segue dois caminhos: i) excesso de água que requer o rebaixamento da superfície potenciométrica para viabilizar a lavra do minério; ii) ou escassez de água que resulta em demandas externas para viabilizar o tratamento do minério lavado. Na região da mina de Capão Xavier, e no Quadrilátero Ferrífero como um todo, há um conflito entre a atividade mineral e a expansão urbana que pode ser considerado crítico. Na região a disponibilidade de água subterrânea é elevada, sendo associada principalmente aos aquíferos intergranulares vinculados aos espessos mantos de intemperismo e aquíferos fraturados hospedados em rochas de diferentes naturezas (granitos, metassedimentos terrígenos e químicos, metabasaltos e carbonatos). Para o tratamento dos dados de testes de bombeamento o método que apresentou maior coerência foi o que considera o meio de dupla porosidade. Este método apresentou elevada consistência, não porque os aquíferos sejam enquadrados no modelo conceitual de dupla porosidade, mas porque os poços captam água de solos, saprolitos e rochas fraturadas, resultando em sistemas de captações mistos, isto é, com entradas de água a partir de seções com porosidade intergranular e secundária planar (fraturas) em dois aquíferos sobrepostos. No caso da área da mina de Capão Xavier e adjacências, parte das águas produzidas pelo bombeamento para rebaixamento é destinada para complementação do abastecimento público. A própria cava da mina funciona como uma área indutora da recarga e pode compensar, em parte, a exploração da reserva permanente do aquífero que sofre rebaixamento. A possibilidade de ampliação de áreas de lavra é limitada em função da presença de núcleos urbanos e rodovias federais. Este trabalho objetivou avaliar os aquíferos da região e demonstrar que a questão entre mineração, expansão urbana e recursos hídricos subterrâneos na Região Metropolitana de Belo Horizonte pode ser considerado um caso singular que afeta o desenvolvimento das diferentes atividades econômicas.

Keywords

Water resources management;
Users' conflict;
Urbanization;
Mining.

Revisão por pares.
Recebido em: 23/03/2023.
Aprovado em: 18/12/2023.

Abstract

In general, the relationship between mining and groundwater resources follows two paths: i) water excess that requires the lowering of the potentiometric surface to enable the ore mining; ii) or water scarcity that results in external demands to enable the treatment of the ore mined. In the Capão Xavier mine region, and in the Quadrilátero Ferrífero as a whole, there is a conflict between mineral activity and urban sprawl that can be considered critical. In the region, the groundwater availability is high; being mainly associated with intergranular aquifers linked to the thick weathering mantles and fractured aquifers hosted in rocks of different natures (granite, terrigenous and chemical metasediment, metabasalt and carbonate). For the treatment of pumping test data, the method that best fitted and get best coherence was the applied to the double porosity medium. This method showed high coherence, not because the aquifers are framed in the conceptual model of double porosity, but because wells screens sections are positioned in soils, saprolite and fractured rocks, resulting in mixed capture systems, with water inlets from sections with intergranular and with secondary planar porosity (fractures), in two overlaid aquifers. In the case of the Capão Xavier mine area and surroundings part of the waters produced by pumping for drawdown is derived to complement the public supply. The possibility of expansion of mining areas is limited due to the presence of urban centers and federal highways. This study aimed to evaluate the aquifers of the region and demonstrate that the issue between mining, urban sprawl and groundwater resources in the Metropolitan Region of Belo Horizonte can be considered a single case that affects the development of different economic activities.

DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v38i1.30219>

1. INTRODUÇÃO

A relação entre os recursos hídricos e a mineração depende de diversas condições e segue caminhos que podem ser complementares ou até mesmo opostos. Existem situações em que a presença de água se torna um impedimento à lavra,

como por exemplo no caso do rebaixamento do nível piezométrico para viabilizar a extração de minério, que ocorre quando o nível d'água subterrâneo encontra-se acima ou próximo da cota de lavra, característica comum em locais com ampla disponibilidade de água como em Carajás, no estado

do Pará (Azevedo, 2019). Por outro lado, existem casos cuja exploração da água é direcionada para processos de tratamento do minério, como ocorre em regiões com escassez hídrica, como em Caetité, Bahia (Gomes, 2019) e nas operações da província de Pilbara, na Austrália (WorleyParsons, 2012; Roy Hill, 2020). Portanto, existem casos em que a água ocorre como impedimento à lavra e outros em que a água ocorre como limitante aos processos de tratamento de minérios.

Ambos os casos devem ser bem dimensionados, visto que os impactos decorrentes destas atividades permeiam toda a fase de operação e vida útil da mina. Conforme estabelecido na Resolução CNRH n° 29, de 2002 (CNRH, 2002), a manutenção da disponibilidade hídrica sem impacto ao fornecimento de água à população é essencial e, portanto, toda atividade mineral deve manter a qualidade e a quantidade da água nos corpos hídricos e aquíferos eventualmente impactados.

Em Minas Gerais foi estabelecida a ferramenta de controle legal denominada *outorga de pesquisa hidrogeológica*, através da qual são estudados e levantados os principais parâmetros primários dos recursos hídricos subterrâneos locais. Portanto, as reservas e fluxos potenciais do aquífero devem ser bem entendidos, de modo que impactos negativos para a segurança e o meio ambiente sejam previstos e, quando possível, evitados (Jakeman *et al.*, 2016). Da mesma forma, as interações entre as águas superficiais e subterrâneas e os mecanismos de suas relações potenciais devem ser compreendidos por meio do detalhamento sistemático do meio físico, e as mudanças monitoradas e controladas pelos responsáveis pela atividade minerária.

As estruturas de mineração usualmente envolvem cavas a céu aberto, minas subterrâneas, pilhas de disposição de materiais marginais e barragens, os quais se encontram presentes na extração de bens minerais diversos, cada qual com características e particularidades distintas e relevantes. A extração de ouro e cobre, em função dos ácidos utilizados no beneficiamento mineral, configuram risco expressivo em termos de drenagem ácida e contaminação por sulfeto e arsênio (Smith, 2020). A extração de carvão gera drenagem ácida e intensificação de turbidez. O ferro, por sua vez, em função de ocorrer em depósitos cuja mineralogia possui menor potencial de reatividade, tem perfil de lavra geralmente associado a grandes cavas, nas quais o rebaixamento tende a ser mais expressivo e impactos no balanço hidrogeológico

local e regional podem ser severos, caso não sejam bem dimensionados e estudados nas fases pré, durante e pós-operação (Fontes & Peroni, 2020). Tal importância denota grande responsabilidade por parte do setor mineral, cujas atividades de operação das minas, em certos casos, bordejam integralmente adensamentos urbanos, como ocorre em Itabira e Nova Lima, cidades de Minas Gerais.

O presente trabalho tem como objetivo analisar o caso singular da relação entre recursos hídricos subterrâneos e a mineração de ferro na mina de Capão Xavier, em Minas Gerais, e também discutir a importância dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos por testes de bombeamento e analisar de forma qualitativa as relações entre produção mineral e demandas hídricas para os distintos usos.

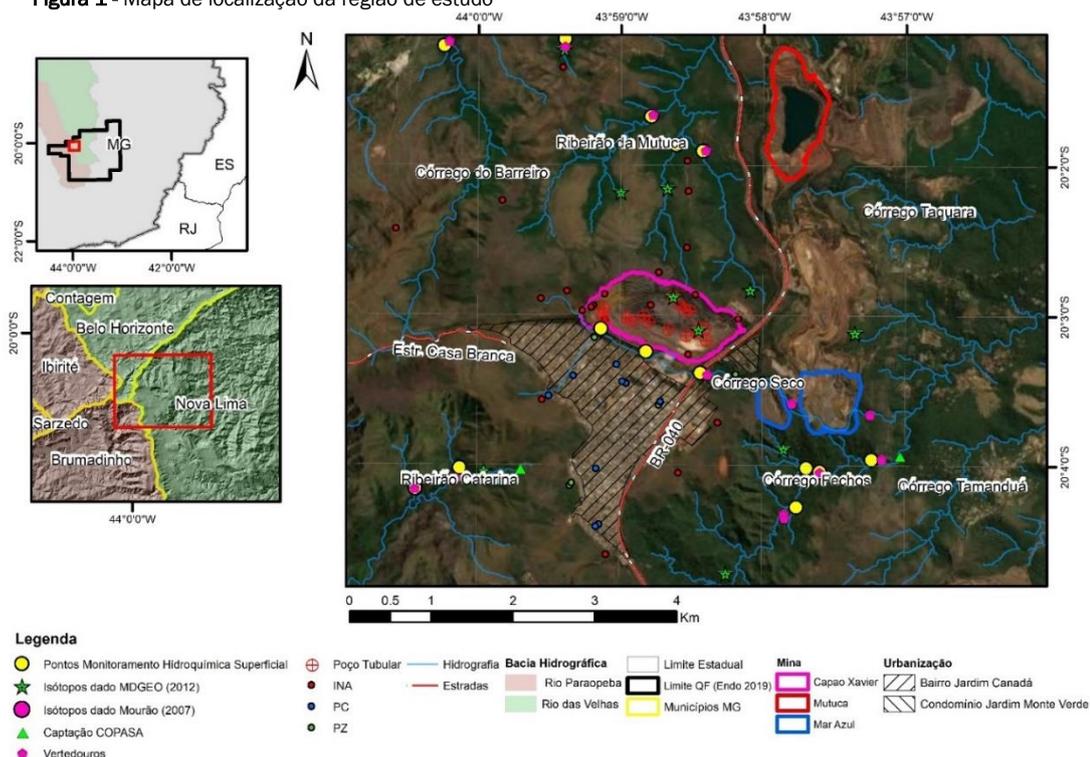
2. ÁREA DE ESTUDO E HISTÓRICO DO CONHECIMENTO

O caso da mina de ferro de Capão Xavier, localizada a menos de 10 km de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, figura como singular em função da interação da lavra com a ocupação humana e com os recursos hídricos. Na região da mina ocorre interação dos aspectos do meio físico (clima tropical com feições orográficas específicas) com a urbanização, já que a lavra de ferro em mina a céu aberto se situa próxima a relevantes polos habitacionais, como os municípios de Nova Lima e Brumadinho, cujas demandas hídricas são crescentes.

Adicionalmente, a mina possui suas instalações inseridas na área de integração entre sub-bacias hidrográficas relevantes, incluindo os ribeirões Catarina e Mutuca e os córregos do Barreiro e Fechos, nas quais ocorrem pontos de captação de água para abastecimento público. As áreas divisoras das bacias e sub-bacias, por serem aplainadas e elevadas, integram a zona de recarga dos rios das Velhas e Paraopeba (Figura 1).

A pesar de existirem na região as cavas das minas da Mutuca, Mar Azul e Capão Xavier, apenas esta última encontra-se em fase de operação. Essa mina interfere na zona saturada dos aquíferos locais de forma que a condição atual de lavra requer o rebaixamento do nível de água, cuja vazão outorgada para os poços operantes é de 1000 m³/h, e onde 33% da água são destinadas à Companhia de Água e Saneamento de Minas Gerais (COPASA) para complementação do abastecimento público da região urbana situada em áreas adjacentes à cava.

Figura 1 - Mapa de localização da região de estudo



Em função dos requisitos firmados para operação da mina, formou-se uma base abrangente e contínua de estudos, acompanhados pela equipe interna da empresa VALE e empresas externas de consultoria, cuja instrumentação utilizada e pontos de relevância encontram-se distribuídos e representados na Figura 1. Ao final da vida útil da mina é prevista a formação de um grande lago na cava, o qual será incorporado ao parque estadual do Rola Moça e ao sistema de abastecimento público. Neste cenário, é prevista a formação de um espelho d'água que contará com 0,79 km² e volume armazenado na ordem de 55 milhões de metros cúbicos (Frasa, 2020).

No mérito hidrogeológico local, Amorim et al. (1999) buscaram quantificar os eventuais impactos da operação em Capão Xavier frente ao abastecimento hídrico da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) e concluíram não haver conexão entre o aquífero freático, os aquíferos Cauê (composto por itabiritos) e Gandarela (representado por carbonatos), de modo que o rebaixamento da mina não teria impacto na vazão dos córregos Mutuca e Barreiro, mas haveria impactos nas bacias de Fechos e Catarina. Entretanto, Lazarim (2000) sugeriu a nomenclatura Aquífero Jardim Canadá para o aquífero local, em função da conexão hidráulica entre as unidades que define um único sistema de caráter heterogêneo e com regime de fluxo subterrâneo essencialmente tridimensional. O sistema aquífero por sua vez pode integrar conjuntos de fluxos locais e intermediários e até mesmo regionais, tendo em vista a espessura do manto de intemperismo e a amplitude dos desníveis topográficos da rede de drenagem local e regional.

Apesar da robusta base de registros contínuos, visando

atendimento de exigências no âmbito da licença ambiental, o complexo arcabouço estrutural da região imprime condicionamentos de fluxo ainda pouco estudados para a zona vadosa e para o aquífero intergranular, considerando a heterogeneidade de materiais da cobertura cenozoica, que abrange desde argilas impermeáveis até colúvios altamente drenantes (Mourão, 2007). Deste modo, pouco foi discutido sobre o papel do manto de intemperismo no controle e regularização das vazões superficiais e potencial hidrogeológico.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente foi realizada a etapa de depuração e organização dos dados disponíveis da base de monitoramento para compatibilização das escalas temporais de aquisição, dos tipos de documentos disponíveis, da natureza das informações e das características construtivas dos poços, as quais se encontram sumarizada na Tabela 1. Em ambiente com bombeamento por poços tubulares o balanço entre cargas hidráulicas pode ter relação com o incremento de recarga do aquífero causado pelo bombeamento, e decaimento da descarga do aquífero causado pelo bombeamento ou a redução do volume de água no sistema aquífero em decorrência da combinação destes fatores (Theis, 1940).

Desta forma, testes de bombeamento representam uma das maneiras mais eficientes para obtenção das propriedades hidráulicas do aquífero, como condutividade hidráulica, transmissividade e capacidade de armazenamento (Owor et al., 2022).

Tabela 1.- Base de dados e escalas utilizadas

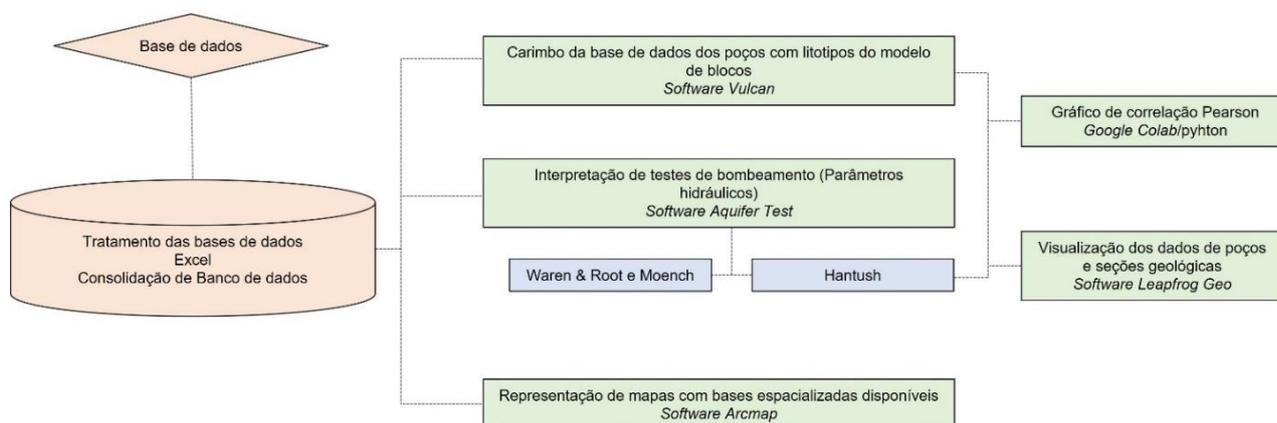
Instrumento	Dados	Nº de dados	Escala Temporal	Elementos construtivos	Aquisição do dado
Poço tubular profundo (PTP)	Ensaio de bombeamento	18	2003 a 2020	8 a 10 polegadas, aço galvanizado	Vale
	Hidroquímica	10	2005 a 2019		
Pluviômetro	Precipitação	1	1993 - 2022	Pluviômetro Ville de Paris	Vale

A integração e interpretação dos dados seguiu o fluxograma da Figura 2 e contou com a utilização de diferentes softwares para os propósitos adequados.

Com o intuito de estabelecer relações entre os tipos petrográficos presentes nos segmentos dos poços que contêm filtro, foi estabelecido o carimbo no furo virtual que

representa a seção do poço tubular, uma vez que as descrições históricas presentes no perfil construtivo de cada poço não necessariamente refletem a condição da real litologia considerada no modelo geológico da mina. Para isso foi utilizado o software Vulcan de modelagem geológica para o carimbo da litologia projetada.

Figura 2 - Fluxograma de tratamento e análise de dados de testes de bombeamento e georreferenciamento



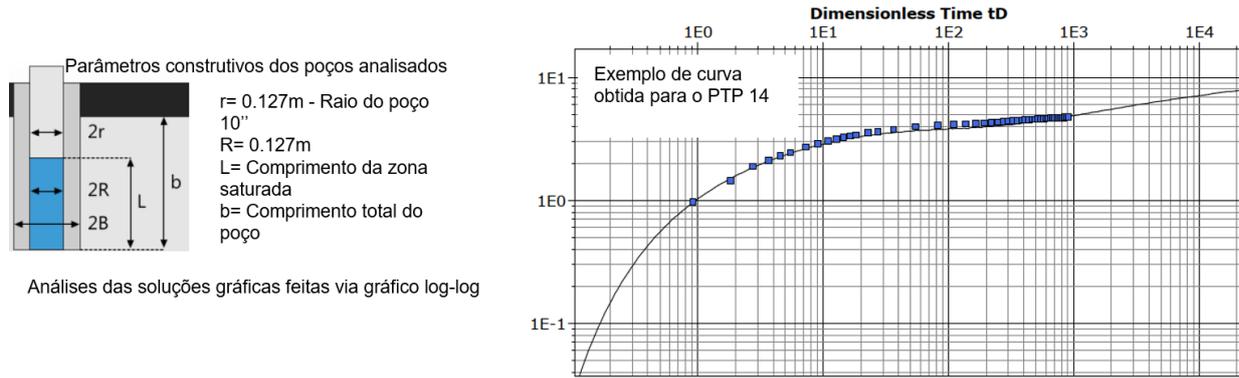
Para obtenção dos parâmetros com o software AquiferTest foram considerados 18 ensaios de bombeamento com avaliação dos dados de rebaixamento versus tempo utilizando curvas tipo. Tais curvas configuram o rebaixamento teórico, plotados em gráfico log-log (Figura 3), de modo que os parâmetros hidrodinâmicos são obtidos por meio da sobreposição de curvas.

Uma vez que os aquíferos são descritos com diferentes características: regionais, localmente confinados, com ou sem drenança, além de serem intergranulares ou fraturados, as principais curvas tipo de análise incluíram as de Warren & Root (1963), Moench (1984) e Hantush (1960). Como os testes de bombeamento não foram acompanhados por poços de monitoramento, foi utilizada a distância de um metro como poço imagem, para viabilizar o cálculo do coeficiente de armazenamento (S). Foi observado que poços operantes pós

2008 tiveram pior ajuste das curvas tipo em função das interferências com poços já existentes, uma vez que o rebaixamento foi iniciado em 2004. Por não ser conhecida a espessura do aquífero, foi utilizada a profundidade da zona saturada do poço mais 10%, uma vez que os poços não penetram totalmente na porção fraturada dos maciços em profundidade.

As medidas dos níveis durante os testes de bombeamento foram realizadas nos próprios poços, uma vez que não havia poços de observação para verificação do rebaixamento a diferentes distâncias. Neste caso, para o tratamento dos dados de tempo versus rebaixamento, utilizou-se uma distância de 1,0 metro entre o poço de bombeamento e de observação. Esta prática é uma forma de se viabilizar a obtenção do conjunto de dados de transmissividade e coeficiente de armazenamento (e posteriormente de condutividade hidráulica), a partir do software AquiferTest.

Figura 3 - Exemplo de *input* e parâmetros escolhidos para análise no software AquiferTest



Para a visualização e representação dos dados espacializados foram utilizados os softwares Arcgis e Leapfrog, este último relevante para a visualização das seções geológicas e relação dos poços em profundidade.

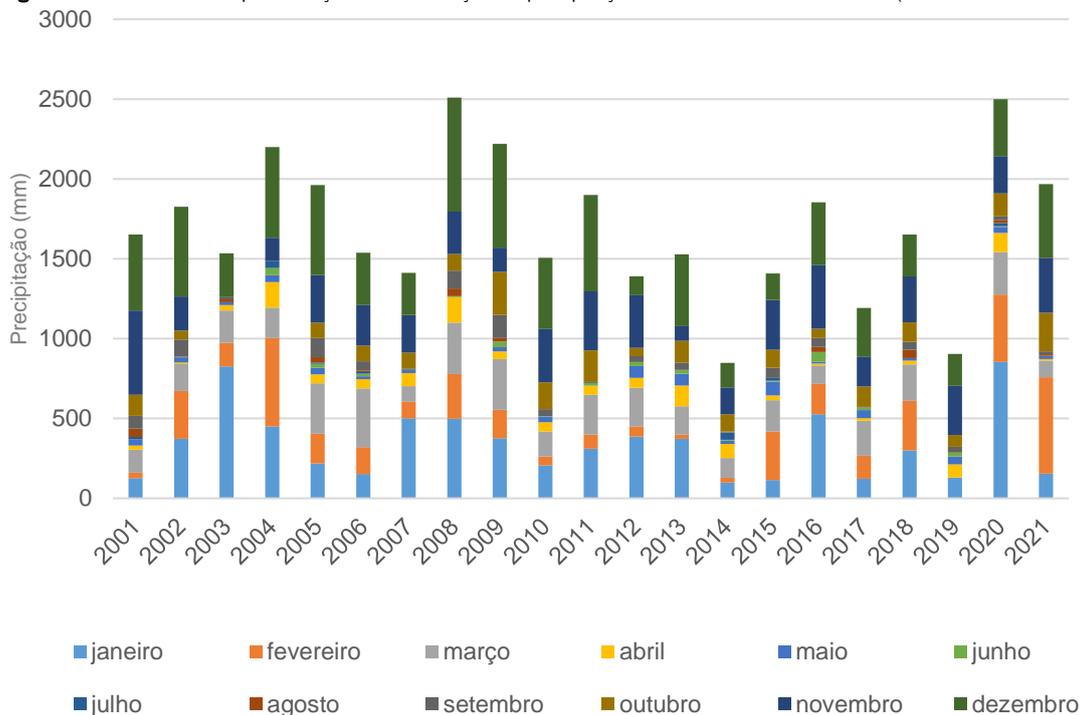
4. SÍNTESE SOBRE O MEIO FÍSICO

4.1 Clima

O regime de chuvas é bem definido com a estação chuvosa

de outubro a março, que representa em média 90% da chuva anual e outra seca, entre abril e setembro. No ciclo observado (2001 a 2021) os anos com maior precipitação foram 2008 e 2020 ambos com 2500 mm/ano, com média de 1691 mm/ano (Figura 4). Os meses com maior pluviometria são dezembro, com precipitação média de 398.6mm e janeiro com 359 mm (dados referentes ao pluviômetro instalado em Capão Xavier).

Figura 4 - Gráfico com a representação da distribuição da precipitação mensal entre 2001 e 2021 (acumulado mensal total)



Apesar da média de pluviometria ser maior historicamente em dezembro, nota-se que ocorre o deslocamento para janeiro, com maiores volumes nos últimos 10 anos. A temperatura média local da região é de 18.9 °C com máxima de 34°C e mínima de 3.5°C. Para a região a evaporação máxima anual foi de 1031 mm/ano o que torna o balanço hídrico positivo (Frasa, 2020).

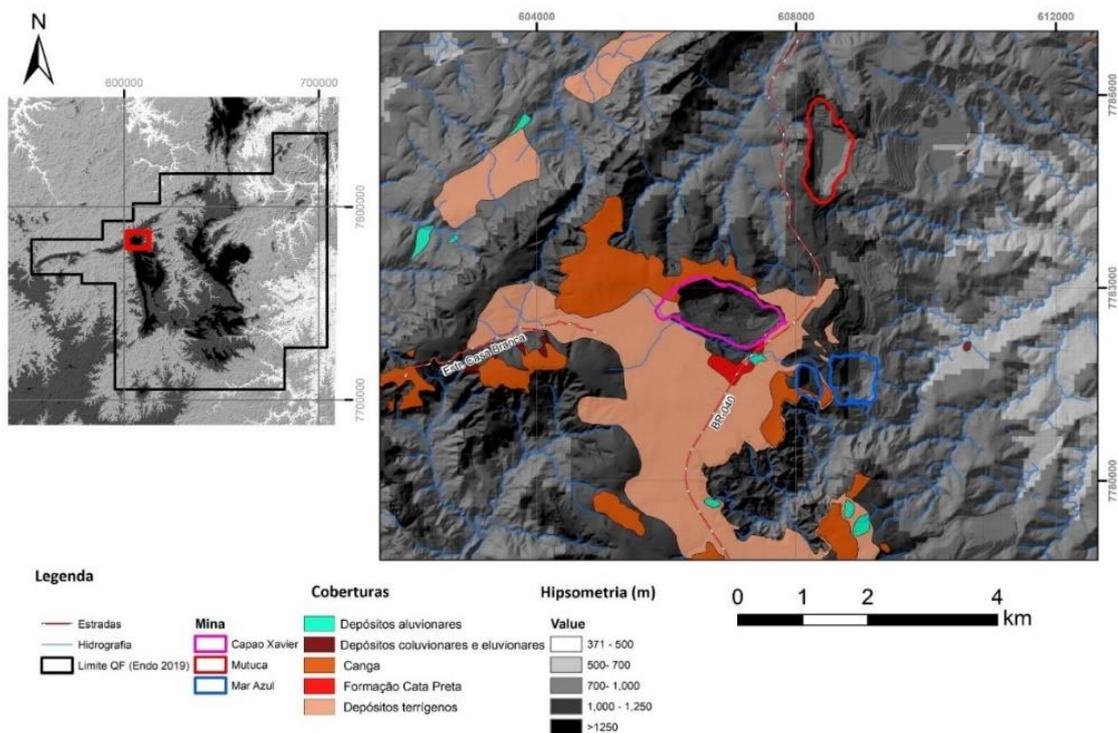
4.2 Coberturas e Relevô

Serras e encostas condicionam o padrão do relevo da região, marcado por altitudes acima de 1100 m mediante reacomodações e **DISSIPACÃO** de tensões condicionada por estruturas. As coberturas na região, podem atingir profundidades superiores à 120 m (Ribeiro, 2004). As

coberturas sedimentares, Formação Cata Preta (Castro *et al.*, 1998 apud Endo *et al.*, 2020), envolvem horizontes saprolitizados de coloração avermelhada com presença seixos sub angulosos à arredondados de filitos, quartzitos ferruginosos e quartzo de veio envolvidos por uma matriz argilosa. Cangas estruturadas recobrem os platôs enquanto detríticas ocorrem em encostas e fundos de vales (Dias &

Bacellar, 2021). Os perfis de solo predominantes são cambissolos, e neossolos litólicos, com presenças locais de plintossolos, os quais integram regiões de encostas e vales, com regiões planas elevadas recobertas por latossolos de baixa a moderada estruturação (Shinzato & Carvalho Filho, 2005) (Figura 5).

Figura 5 - Mapa de coberturas e hipsimetria da região



4.3. Geologia

As unidades litoestratigráficas do quadrilátero ferrífero foram compartimentadas por Endo *et al.* (2020) na Figura 6: **Complexos metamórficos** (Mexo/Neoarqueano), conformados por gnaisses, migmatitos, granitoides, anfibolitos e corpos máfico/ultramáficos; **Supergrupo Rio da Velhas** (Paleoproterozoico), constituídos pelos Grupos Quebra Osso, Nova Lima e Maquiné, os quais abarcam rochas metassedimentares clásticas e químicas, metavulcanoclásticas e por rochas metavulcânicas félsicas, máfica ultramáficas; **Supergrupo Minas** (Paleoproterozoico), que integra sequências metassedimentares clásticas e químicas representadas pelos Grupos, Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba; **Supergrupo Estrada Real** (Paleoproterozoico), composto por rochas metassedimentares clásticas e químicas e por rochas metavulcânicas félsicas, máficas e ultramáficas, e representado pelos Grupos Barbacena, Sabará e Itacolomi; **Supergrupo Espinhaço** (Paleo/Mesoproterozoico), em sua grande maioria composto por metarenitos e metaconglomerados. Além de diques máficos que cortam as sequências supracrustais, e **Unidades sedimentares** (Cenozoico), cuja abrangência se dá por coberturas terrígenas.

Os **grupos Caraça** e **Itabira** perfazem a maior abrangência da região de estudo. O **Grupo Caraça** abarca duas unidades principais, sendo elas, a Formação Moeda, que representa o pacote siliciclástico de quartzitos e metaconglomerados, com granulometrias variáveis, de coloração branca amarelada. A Formação Batatal ocorre como pacote heterogêneo de filitos, e apresenta diferentes graus de compacidade formados por filitos sericíticos, de coloração avermelhada, filitos dolomíticos - coloração azul-acinzentada, filitos carbonosos - coloração cinza escura e filitos manganésíferos, aos quais se intercalam materiais de colorações amarelado-ocre e marrom.

O **Grupo Itabira** é composto pelas Formações Cauê e Gandarela. A Formação Cauê, integra itabiritos e itabiritos dolomíticos, com passagens locais de filitos, mármore e talcoxistos, cujo saprólito e porções hidrotermalizadas, hospedam as mineralizações presentes em Capão Xavier. Já a formação Gandarela é integrada por mármore dolomíticos, filitos dolomíticos e dolomitos ferruginosos.

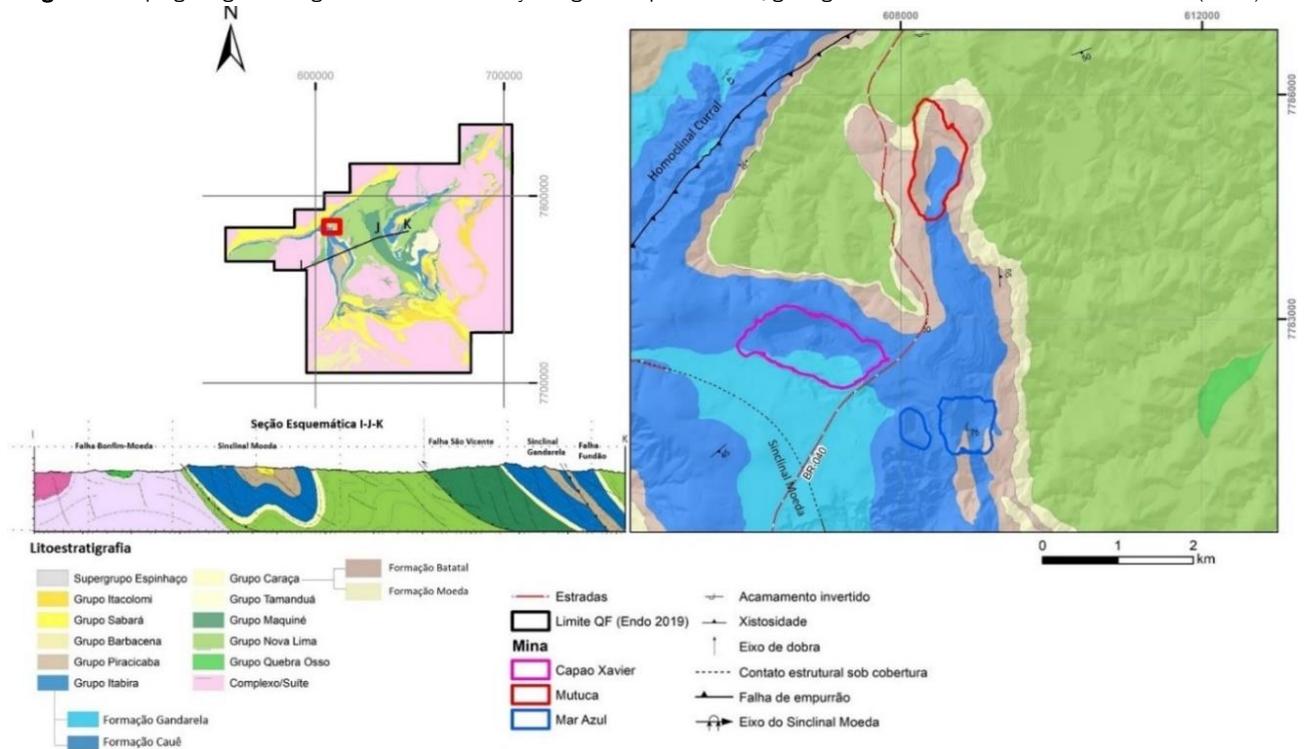
4.4. Compartimentação Estrutural Local

A região está inserida no contexto estrutural da Junção Serra

do Curral com o Sinclinal Moeda. Neste sentido, o Homoclinal Invertido da Serra do Curral, situa-se ao longo do Supergrupo Minas com direção uniforme NE-SW e mergulhos variáveis entre 30° e 85° para SE. Enquanto o Sinclinal Moeda

configura-se como uma dobra regional assimétrica e vergente para W e SW que envolve todas as unidades metassedimentares presentes na área (Figura 6).

Figura 6 - Mapa geológico da região de estudo com seção regional representativa, geologia e estruturas com base em Endo et al. (2020)



4.5 Hidrogeologia

Em função da heterogeneidade de formações presentes no Quadrilátero Ferrífero, Ramos et al. (2020) propuseram a compartimentação em unidades hidrogeológicas, que envolvem aquíferos heterogêneos e anisotrópicos com relevantes variações entre os parâmetros hidráulicos e potencial hidrogeológico (Figura 7).

As unidades descritas são:

- **Sistema aquífero granular**, composto por cangas, e colúvios com valores de condutividade (K) que variam entre $1,15 \times 10^{-8}$ (Mourão 2007) a 5×10^{-4} m/s (Ramos et al., 2020), argilas e sedimento silte-arenosos com K variando entre $5,0 \times 10^{-10}$ (Mourão 2007) e 5×10^{-2} m/s (Ramos et al., 2020), e valores de porosidade efetiva (ne) entre 1 e 10% (Mourão, 2007; Ramos et al., 2020).

- **Sistema aquífero quartzítico**, composto por quartzitos ferruginosos, quartzo-sericita xistos a quartzitos sericítico, ortoquartzitos e metaconglomerados, com valores de K que variam entre 1×10^{-7} e 1×10^{-4} m/s, coeficiente de armazenamento (S) em 5×10^{-2} (Mourão, 2007) e ne entre 2 a 3,5% (Beato et al., 2005; Ramos et al., 2020).

- **Sistema aquífero em formação ferrífera**, cujas propriedades serão aprofundadas no item subsequente de resultados, mas

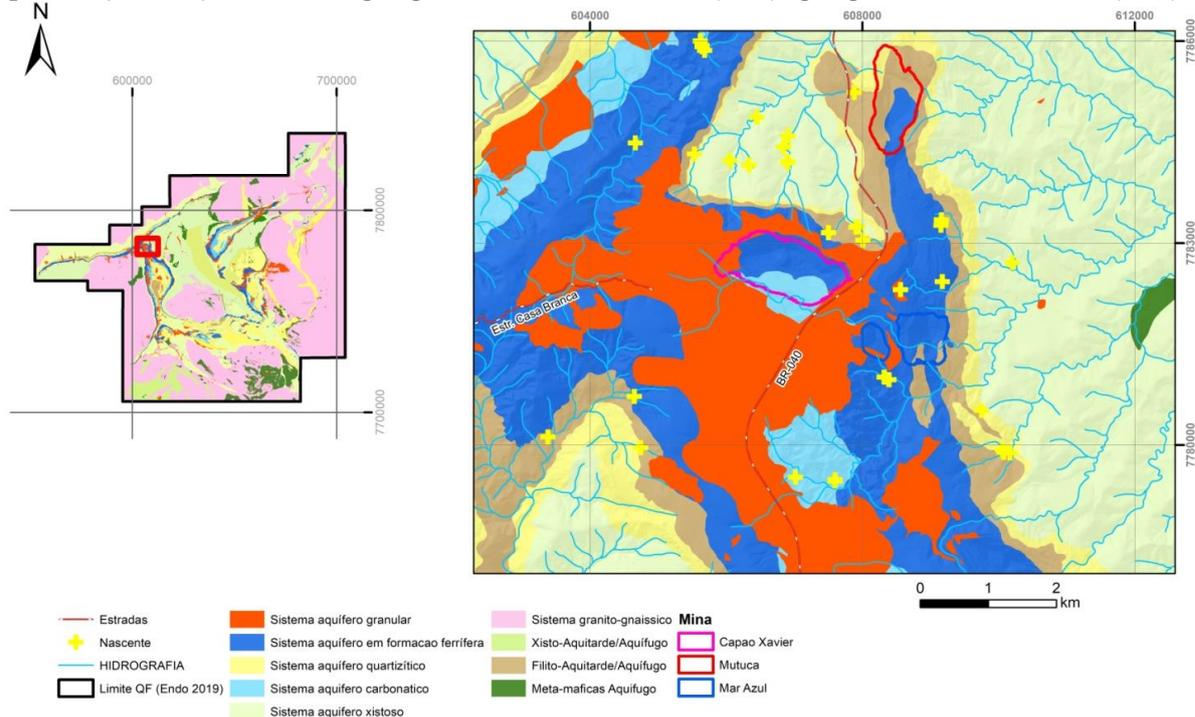
em geral, apresentam valores de K entre 1×10^{-7} a 1×10^{-4} m/s (Ramos et al., 2020), transmissividade (T) entre 5×10^{-4} a 2×10^{-2} m/s, S entre 1×10^{-4} a 0,15 e ne de 2 a 20% (Mourão, 2007).

- **Sistema aquífero carbonático** composto por itabiritos dolomíticos e mármore, os valores de K variam entre $1,0 \times 10^{-8}$ e $1,0 \times 10^{-6}$ m/s (Ramos et al., 2020) e porosidade interconectada de 1,5 a 2,5% (Mourão, 2007; Ramos et al., 2020).

- **O Sistema aquífero xistoso**, integrado por metadiamicritos, quartzo-clorita-xistos, metamargas, metaconglomerados e metavulcânicas, os valores de K variam entre $1,0 \times 10^{-10}$ e $1,0 \times 10^{-8}$ m/s (Ramos et al., 2020) e índice de fraturas interconectadas IFi entre 1 a 2,5% (Mourão, 2007; Ramos et al., 2020).

- **Sistema granito-gnáissico**, formado por granitos e gnaisses, com valores de K que variam entre $5,0 \times 10^{-9}$ a $5,0 \times 10^{-5}$ (Ramos et al., 2020) e IFi entre 0,25 a 0,75% (Beato et al., 2005; Ramos et al., 2020). Unidades que atuam como aquitardes ou aquíferos envolvem xistos, filitos com baixa capacidade de transmissão de água com valores de K na ordem de $5,0 \times 10^{-10}$ a $5,0 \times 10^{-8}$ m/s e IFi entre 0,25 e 0,75% (Ramos et al., 2020), além de rochas metamáficas as quais também atuam como relevantes compartimentadores hidrogeológico.

Figura 7- Mapa de compartimentos hidrogeológicos, com base em Ramos et al. (2020) e geologia com base em Endo et al., (2020)



5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Histórico de Ocupação

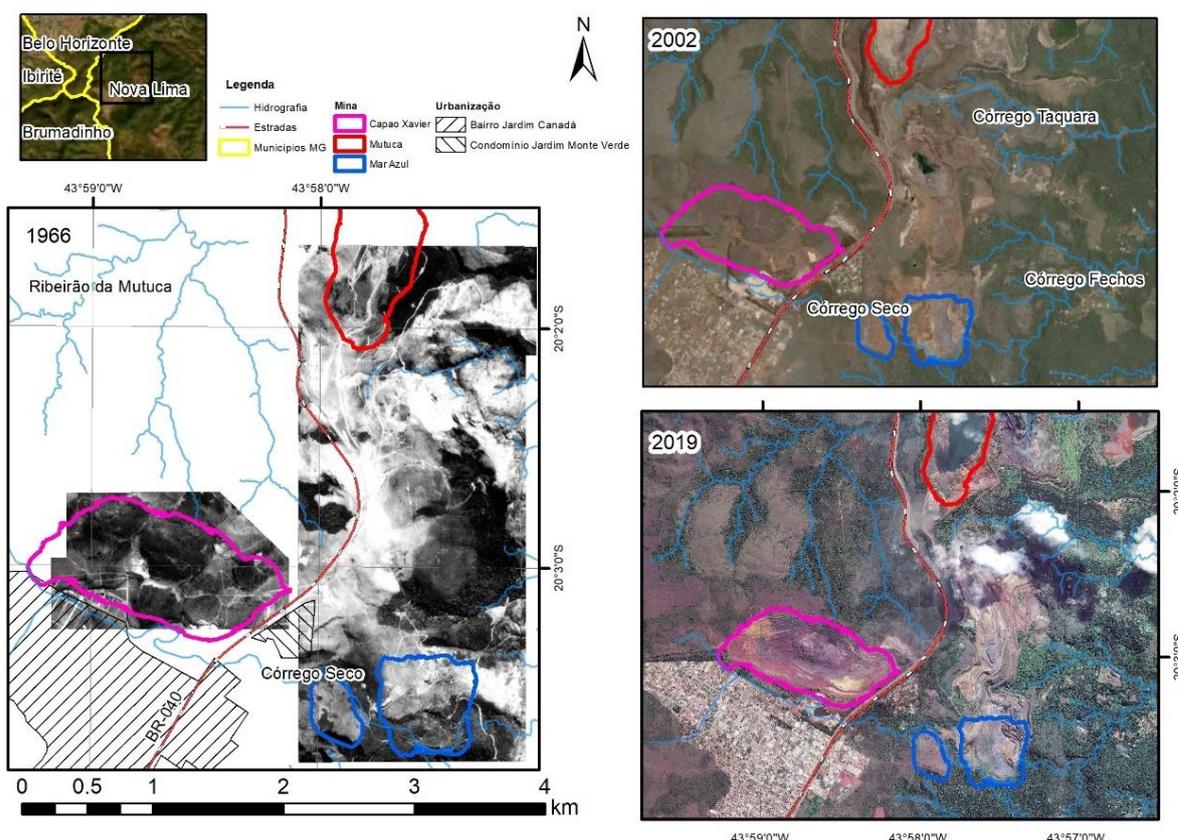
O bairro Jardim Canadá, em Nova Lima, representa área de expansão urbana na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Sua origem é datada de meados dos anos 50, embora a expansão residencial tenha ocorrido apenas a partir dos anos 1990, de modo que em 2016 Araújo & Moraes (2016) destacaram a presença de mais de 1000 empresas sediadas na região. A ocupação territorial da região é marcada por interferências entre mineração e expansão urbana, tanto a condicionada por empreendimentos imobiliários quanto expansão da indústria local, pautada em logística, serviços e comércio.

Sob este efeito de ordenamento inconstante, galerias pluviais e redes de tratamento e coleta de esgoto sanitário não foram

estabelecidas em tempo adequado, ocasionando passivos que ainda perduram, como é o caso dos efluentes não captados do bairro que são direcionados para o Córrego Seco, o qual drena para Bacia de Fechos (Figura 8).

Na Figura 8 é possível observar que em 1966 a região a sudoeste da futura cava de Capão Xavier estava na fase de parcelamento de terras, em período que não havia as cavas da Mutuca e Mar Azul. Nesse contexto, condicionado pelo plano de desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte e especulação imobiliária, surgem loteamentos privados que intensificaram a expansão do bairro para a margem leste da BR-040, como é caso do Condomínio Jardim Monte Verde (Araújo & Moraes, 2016). Na Figura 8, nota-se que seu ordenamento é prévio a operação da cava de Capão Xavier, iniciada em 2004, porém já mediado entre as cavas de Mutuca e Mar Azul.

Figura 8 - Mapas de evolução temporal da ocupação territorial na região de estudo. Imagem de 1966 reconstituição Vale 1966. Imagem 2002 Google Earth. Imagem 2019 ortoimagem Vale- Gis mineral



5.2 Análise dos Parâmetros Hidráulicos

Uma vez que os poços para rebaixamento da cava estão inseridos exclusivamente na zona entre itabiritos da Formação Cauê e dolomitos da Formação Gandarela, foi considerada a chave de classificação utilizada pela empresa VALE para interpretação das relações entre os parâmetros hidráulicos condicionados pelo meio. Tal chave de classificação (Tabela 2) utiliza a proporção entre os óxidos dos elementos químicos e fração granulométrica retida em peneira acima de 6,3 mm (G1%) para a discriminação dos tipos petrográficos.

A relação geral média indica seções filtrantes com participação de litotipos majoritariamente friáveis (70%).

Quanto à composição, os principais minerais são a hematita, goethita, quartzo, dolomita e calcita.

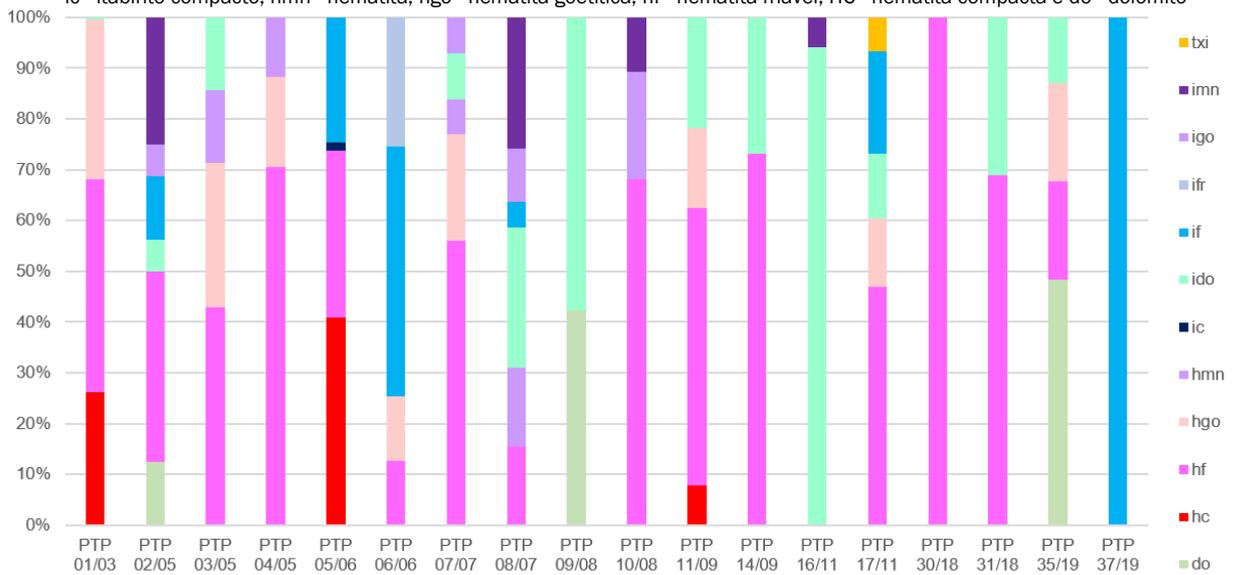
De forma geral, 30% das seções dos poços não associadas a materiais friáveis de comportamento intergranular são perfuradas em rocha sã e apresentam fluxo em meio fraturado.

No gráfico de barras (Figura 9) estão representadas as proporções de tipos petrográficos presentes nas seções filtrantes de cada poço tubular com perfil analisado.

Tabela 2. Chave de classificação tipológica das rochas e minérios utilizados pela empresa Vale.

TIPOS	LITOTIPOS	Feg1%	Alg1%	Mng1%	PFg1%	Cagl%	Mgg1%	G1%
HEMATITAS	HC - Hematita Compacta	≥ 62	$< 2,5$	< 1	$< 3,5$			≥ 50
	HF- Hematita Friável	≥ 62	$< 2,5$	< 1	$< 3,5$			< 50
	HMN- Hematita Manganesífera	≥ 60		≥ 1				< 50
	HGO- Hematita Goetítica	≥ 60	$\geq 2,5$	< 1	$\geq 3,5$			< 50
	IFR - Itabirito Friável Rico	≥ 52 e < 62	$< 2,5$	< 1	$< 3,5$			< 50
	IF - Itabirito Friável	≥ 20 e < 52	$< 2,5$	< 1	$< 3,5$			< 50
ITABIRITOS	IGO - Itabirito Goetítico	≥ 20 e < 60	$\geq 2,5$	< 1	$\geq 3,5$			-
	IMN - Itabirito Manganesífero	≥ 20 e < 60		≥ 1				-
	IC - Itabirito Compacto	≥ 20 e < 62						≥ 50
	IDO - Itabirito Dolomítico	≥ 20 e < 62					≥ 1	≥ 1
	QF - Quartzito Ferruginoso	< 20	$< 2,5$	< 1	$< 3,5$			< 50

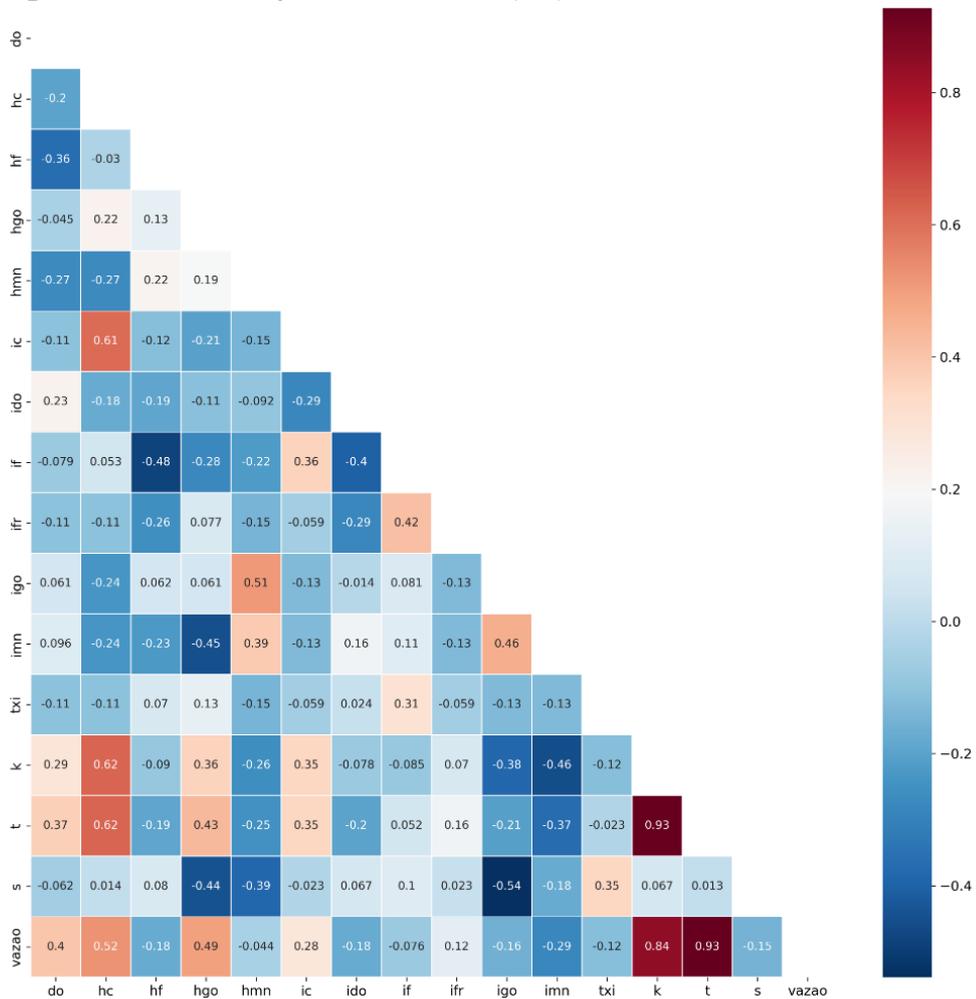
Figura 9 - Gráfico de barras com proporção de litotipos presentes na seção filtrante (classificação segundo a Chave utilizada pela Vale). txi - talco xisto; imn - itabirito manganesífero; igo - itabirito goetítico; ifr - itabirito friável rico; IF - itabirito friável; ido - itabirito dolomítico; ic - itabirito compacto; hmn - hematita; hgo - hematita goetítica; hf - hematita friável; HC - hematita compacta e do - dolomito



A relação entre a capacidade produtiva de cada poço não se relaciona exclusivamente com o tipo petrográfico interceptado, o que é possível notar no gráfico de correlação

de Pearson (Figura 10). A transmissividade apresenta relação muito forte com a condutividade hidráulica (K) uma vez que é a relação dela com a espessura saturada do aquífero.

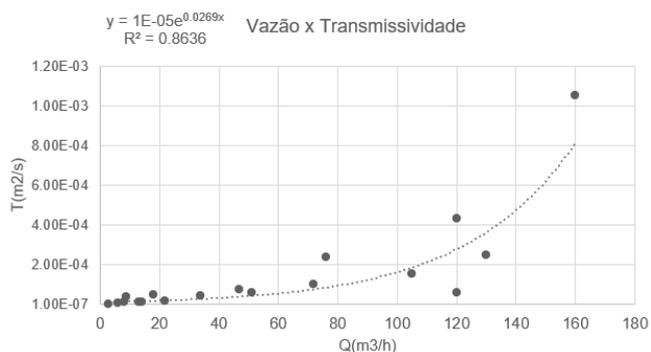
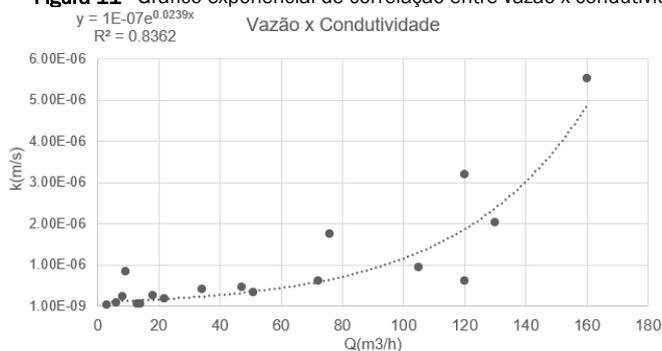
Figura 10 - Gráfico de correlação de Pearson entre litotipos, parâmetros hidrodinâmicos e vazão



Em função da forte correlação positiva entre vazão e condutividade hidráulica (0,84) e vazão e transmissividade

(0,93), foram elaboradas as equações de regressão exponencial (Figura 11).

Figura 11 - Gráfico exponencial de correlação entre vazão x condutividade e vazão x transmissividade



A maior correlação positiva entre a condutividade e transmissividade ocorre nos poços com maior proporção de hematita compacta (0,62), cuja gênese é atribuída a processos hidrotermais e cujo fraturamento e dissoluções condicionam zonas de maior permeabilidade. A relação positiva entre dolomitos e a vazão dos poços (0,4) e condutividade (0,29) chama atenção, uma vez que é esperado que estas rochas possuam baixa permeabilidade. Nesta linha, a elevada vazão do poço 9, segunda maior dos poços

analisados com 130 m³/h e condutividade hidráulica dez vezes acima da média, são justificados uma vez que o poço se localiza em zona de charneira de dobra, e a estrutura que condiciona tal fluxo pode ter relação com presença de fraturas abertas associadas ao plano axial. O sumário estatístico dos parâmetros hidráulicos obtidos é apresentado na Tabela 3 e serve como referência para interpretação dos parâmetros hidráulicos.

Tabela 3 - Sumário estatístico dos parâmetros hidráulicos

Número de análises	K (m/s)				T (m²/s)				S			
	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	Mínimo
18	9,7E-7	4,3E-7	5,5E-6	2,3E-8	1,4E-4	5,1E-5	1,0E-3	2,5E-6	8,8E-2	5,9E-2	5,4E-1	1,5E-3

A Tabela 4 representa os parâmetros hidráulicos obtidos por meio da interpretação dos ensaios de bombeamento realizados. Os valores de coeficiente de armazenamento variam de 10^{-1} a 10^{-3} , mostrando-se coerentes com os meios estudados que representam desde aquíferos livres (vinculados aos maiores valores) a semiconfinados (associados aos valores da ordem de 10^{-3}).

A condutividade hidráulica com ordens de grandeza entre 10^{-6} a 10^{-8} m/s com média de 10^{-7} m/s também é coerente com

os meios fraturados (e em parte intergranulares) estudados. Neste sentido, os valores maiores são associados a poços com mantos de intemperismo mais espessos ou maior densidade de fraturamento em rochas com comportamento mais rúptil (a exemplo de itabiritos). Os valores com menor ordem de grandeza são vinculados a rochas maciças ou pouco fraturadas em com menor espessura de solos e saprolitos. Os valores da ordem de 10^{-7} m/s representam bem a média de aquíferos fraturados.

Tabela 4 - Sumário dos parâmetros hidráulicos e descrição dos poços analisados

Poço	Comprimento	Seção Filtrante	Espessura do aquífero considerada	Capacidade Inicial (m ³ /h)	Diâmetro	Ano perfuração	Situação	Cota original	K(m/s)	T(m ² /s)	S	Método	Data do teste
PTP 01/03	271	172	189	160	10"	2003	Ativo	1347	5.52E-06	1.05E-03	1.28E-02	Double Porosity	07/08/2005
PTP 02/05	250	154	169	51	10"	2005	Ativo	1368	3.38E-07	5.74E-05	1.89E-02	Moench Fracture Flow	21/06/2005
PTP 03/05	150	84	92	120	10"	2005	Inativo	1360	6.27E-07	5.71E-05	2.17E-03	Double Porosity	04/06/2005
PTP 04/05	230	197	217	14	10"	2005	Inativo	1364	6.57E-08	1.20E-05	1.52E-03	Double Porosity	04/10/2005
PTP 05/06	182	123	135	120	10"	2006	Inativo	1347	3.19E-06	4.33E-04	5.82E-02	Double Porosity	16/02/2006
PTP 06/06	237	154	169	72	10"	2006	Inativo	1348	6.03E-07	1.01E-04	6.06E-02	Double Porosity	03/04/2006
PTP 07/07	193	148	163	47	10"	2007	Ativo	1341	4.54E-07	7.37E-05	3.17E-02	Double Porosity	24/08/2007
PTP 08/07	243	195	214	13	10"	2007	Inativo	1335	4.93E-08	1.10E-05	4.83E-02	Double Porosity	01/10/2008
PTP 09/08	144	108	119	130	8"	2008	Inativo	1280	2.03E-06	2.48E-04	9.78E-02	Moench Fracture Flow	23/10/2008
PTP 10/08	154	94	103	34	8"	2008	Inativo	1317	4.08E-07	4.24E-05	9.66E-02	Double Porosity	24/11/2008
PTP 11/09	178	123	135	76	8"	2009	Inativo	1337	1.75E-06	2.36E-04	5.45E-01	Double Porosity	18/01/2012
PTP 14/09	61	39	43	9	8"	2009	Inativo	1274	8.48E-07	3.56E-05	7.90E-02	Double Porosity	16/07/2009
PTP 16/11	189	108	118	3	10"	2011	Inativo	1337	2.37E-08	2.52E-06	5.18E-02	Hantush	17/11/2011
PTP 17/11	189	152	167	18	10"	2011	Inativo	1364	2.72E-07	4.56E-05	1.78E-01	Hantush	09/03/2011
PTP 30/18	127	94	103	22	10"	2018	Ativo	1229	1.74E-07	1.79E-05	1.07E-01	Double Porosity	09/06/2018
PTP 31/18	108	57	63	6	10"	2018	Ativo	1219	8.82E-08	5.53E-06	6.36E-02	Double Porosity	29/01/2018
PTP 35/19	215	150	165	105	10" e 8"	2019	Ativo	1202	9.38E-07	1.55E-04	4.89E-02	Moench Fracture Flow	10/10/2019
PTP 37/19	100	51	56	8	10"	2019	Ativo	1312	2.40E-07	1.34E-05	8.73E-02	Double Porosity	20/08/2020

As transmissividades são compatíveis com as espessuras de dezenas de metros que foram atribuídas aos aquíferos estudados, o que também pode ser verificado pela presença de entradas de água através de fraturas abertas até mais de 100 metros de profundidade.

Em linhas gerais, a maior parte dos dados se ajustaram bem às curvas aplicadas a aquíferos de dupla porosidade (Warren & Root, 1963), principalmente para os poços na fase inicial de rebaixamento da mina. Em outros casos os melhores ajustes foram observados com aplicação do método de Moench (1984), também para meios de dupla porosidade e apenas dois casos se ajustaram melhor ao método de Hantush (1960).

Os poços mais recentes, pós 2008, já sob influência dos cones de rebaixamento, apresentam maiores discrepâncias. Em geral, os poços localizados na região leste a norte da cava apresentam valores de condutividade, transmissividade e vazões superiores aos poços localizados na região sul a oeste (Figura 12).

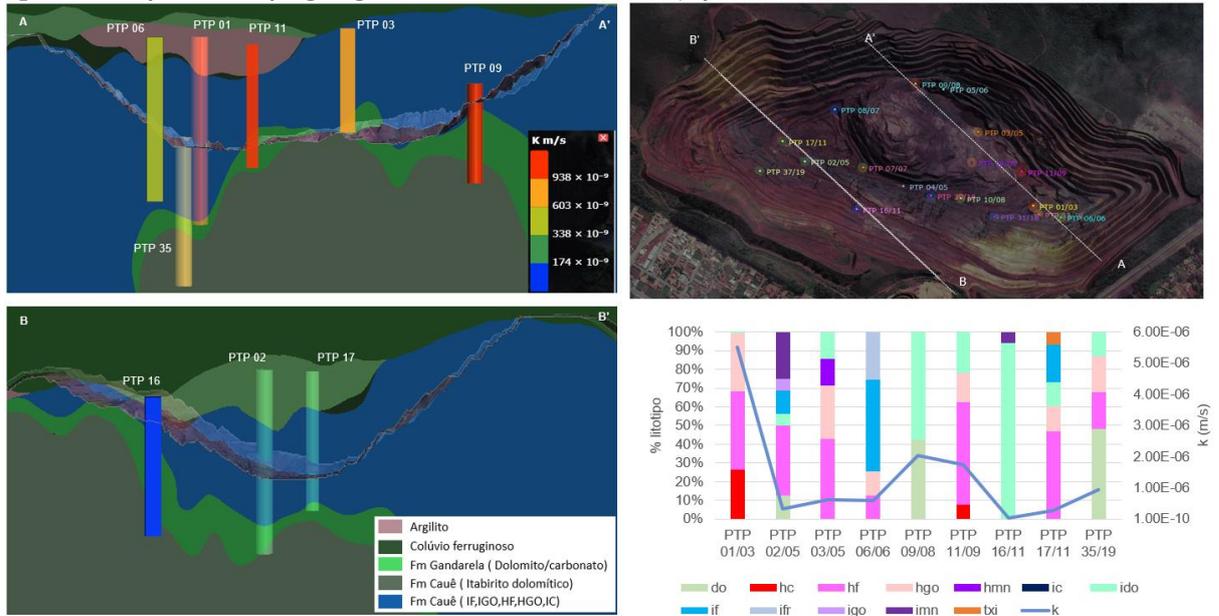
Embora os meios analisados sejam heterogêneos e anisotrópicos, o que representa um problema para atendimento às condições de contorno ideais, os resultados obtidos por meio dos ensaios corroboram padrão de fluxo

condicionado pela porosidade primária e secundária, associada a fraturas. Entretanto os reservatórios subterrâneos estudados não são classificados como do tipo dupla porosidade (Barenblatt *et al.*, 1960; Paula e Campos, 2016), e sim, são representados por dois aquíferos sobrepostos, o superior associado a solos e saprolitos e o inferior vinculado a rochas alteradas e frescas.

No enquadramento dos aquíferos da região fica claro que nos solos e saprolitos predomina amplamente porosidade do tipo intergranular. Em rochas sãs ou alteradas, o fluxo da água é condicionado aos planos de fraturas.

O método de tratamento de dados dos testes de bombeamento que mostrou maior coerência das curvas foi o de dupla porosidade, pois os poços apresentam ampla seção filtrante em porções dos aquíferos intergranulares, mas também em porções de rochas fraturadas alteradas. De forma geral, as maiores vazões são obtidas em poços com maior seção de filtros em meio fraturado, embora os aquíferos classificados no modelo conceitual tipo intergranular, que inclui a seção perfurada em solo e saprolito das formações ferríferas, possuem valores elevados quando inseridos em meio com menor proporção de itabiritos goethíticos e/ou manganêsíferos (variações tipológicas de itabiritos).

Figura 12 - Relações entre seção geológica e condutividade hidráulica dos poços

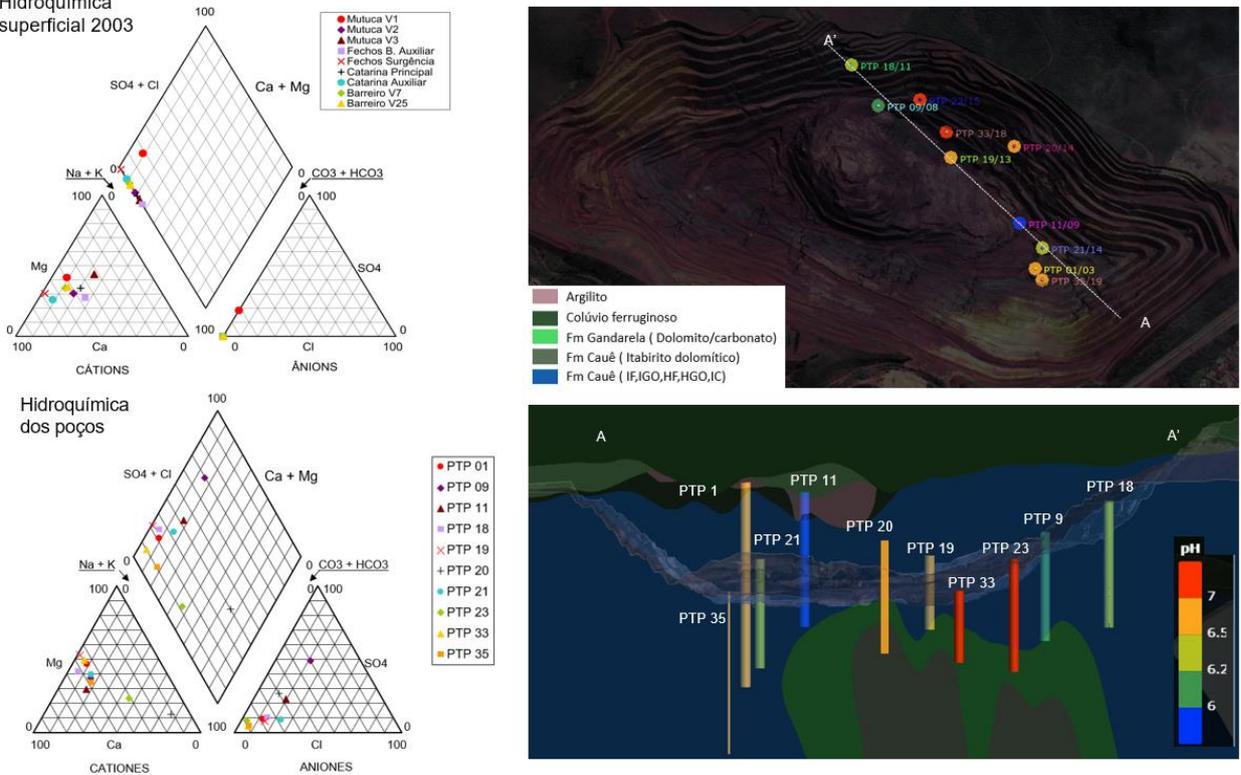


5.3 Análise dos Parâmetros Hidroquímicos

As águas dos poços são, predominantemente, bicarbonatadas magnesianas, na qual o cálcio e magnésio ocorrem em proporções semelhantes, e o bicarbonato, o ânion predominante. Possuem baixa mineralização, e condições adequadas de potabilidade, o que sustenta sua utilização

para consumo e abastecimento humano. A relação com a química das águas dos córregos superficiais é boa, embora haja poços cuja mineralização difere, ligeiramente. Tal efeito possivelmente é relacionado ao contato e contribuição das rochas da Formação Gandarela, como observado nos poços 9, 20 e 23 (Figura 13).

Figura 13 - Parâmetros hidroquímicos e relação com poços de bombeamento mediante interação com seção geológica superficial 2003



5.4. Uso da Água de Rebaixamento Atualmente e na Fase de Descomissionamento da Lavra

A água produzida no rebaixamento dos níveis potenciométricos para viabilizar a lavra segue dois caminhos: uma pequena parte é usada nos próprios processos de beneficiamento do minério de ferro e a maior parte é destinada ao sistema oficial de abastecimento público.

A água bombeada da mina de Capão Xavier desempenha relevante papel no abastecimento público e acesso à água potável para Região Metropolitana de Belo Horizonte, sendo que parte da água produzida é destinada a reforçar o sistema oficial de provimento de água potável.

A parte destinada ao abastecimento público é condicionada a processos de compensações ambientais, que tornam a vazão de produção compulsória, independentemente da produção de minérios. Ou seja, mesmo que a produção de ferro seja temporariamente ou permanentemente interrompida parte da produção hídrica deve ser mantida, de forma a garantir o abastecimento público. Após o término da operação de lavra a companhia de saneamento deverá ficar responsável pelo bombeamento e manutenção dos poços de produção.

Por figurar uma cava a céu aberto de minério de ferro oxidado, na qual não ocorrem de maneira significativa sulfetos ou outros minerais solúveis, a condição futura após o ciclo de rebaixamento e operação não deverá apresentar riscos de contaminação associados a controle geogênicos, mediante interação das águas subterrâneas com seus reservatórios.

Apesar desta aparente proteção relacionada à condição de aquífero, o balanço hídrico possui excedente entre dezembro e março, com déficit entre maio e setembro, e reflete o efeito sazonal, típico do clima local (Lume, 2021). Com isso apesar da moderada oferta de água local, as condições de recarga devem ser asseguradas, ao considerar possíveis expansões urbanas, de modo que o fluxo de base do aquífero não seja a única medida de manutenção do volume de água durante o período de seca. Desta forma, ações vinculadas à recarga gerenciada são recomendadas principalmente nas áreas urbanizadas que apresentam ampla impermeabilização da superfície, a qual era originalmente livre para infiltração e recarga.

Outro ponto de atenção envolve a existência do Córrego Seco o qual carrega efluentes do bairro Jardim Canadá, e verte água poluída a partir da cota 1360 m. Este cenário resulta em potencial foco de contaminação para o futuro lago formado após o término da lavra, uma vez que o nível potenciométrico deste corpo hídrico artificial terá sua cota projetada para 1.327 metros (Frasa, 2020).

Para o Lago, mesmo que respeitadas as condições de preservação das margens e recarga adequada, o processo de eutrofização é um efeito natural associado à mineralização das águas que pode ocorrer em associação com decomposição da matéria orgânica e ação do fitoplâncton, e,

portanto, comprometer a qualidade da água. Desta forma, o programa de monitoramento das condições de fósforo, nitrato e pH devem ser obrigatórios no processo de enchimento e estabelecimento do lago.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O contexto geológico-geomorfológico na mina de Capão Xavier resulta em complexidade hidrogeológica com misturas de águas de aquíferos sobrepostos e formação de padrões de fluxo hidrogeológico locais e intermediários como foi observado nos parâmetros hídricos mensurados. Mesmo para condições de contorno não ideais, por configurarem meios heterogêneos e anisotrópicos, os dados apresentaram boas correlações e representam, de forma adequada, o aquífero estudado.

Embora a melhor correlação dos dados de testes de bombeamento seja obtida com o método de aquífero misto com duas porosidades, os reservatórios da região não são de dupla porosidade, mas representados por dois aquíferos sobrepostos sendo o superior do tipo intergranular e o mais profundo do tipo fraturado.

A curva exponencial de correlação entre vazão e parâmetros hidrodinâmicos pode ser uma alternativa para previsibilidade da circulação das águas subterrâneas em áreas de lavras situadas no Quadrilátero Ferrífero cujas características construtivas dos poços e geologia sejam semelhantes.

A Empresa Vale, além de produtora de minério de ferro, se tornou uma grande fornecedora de água para o abastecimento público na região metropolitana de Belo Horizonte, além de potencial geradora de estruturas para indução da recarga dos aquíferos. A relação da expansão urbana com a viabilidade da lavra mostra uma relação ativa e contínua de conflitos, na qual em grande parte a mineração sofre as maiores perdas. Neste sentido, grande volume de minério de elevado teor tem sua lavra inviabilizada em função da urbanização e presença de rodovia federal, pois essas estruturas não permitem o alargamento da área da cava para ampliação da recuperação do minério.

Do ponto de vista da análise da interação de lavra de minérios *versus* recursos hídricos *versus* ocupação urbana, o caso da mina Capão Xavier é considerado particular. Outras regiões de produção mineral não têm a proximidade urbana observada na região Metropolitana de Belo Horizonte ou se tratam de minas de pequeno porte próximas a pequenos centros urbanos. Tendo em vista a rede de monitoramento existente previamente à ocupação, sua operação durante o processo de lavra e sua manutenção após a conclusão da lavra, este caso pode ser utilizado para esclarecimento de questões relevantes relativas à lavra mineral, recursos hídricos e expansão urbana.

6. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, L. E. M.; MORAES, F.B. do local e o regional: a (re)estruturação policêntrica no planejamento da região

- metropolitana de Belo Horizonte sessão temática: pesquisas em áreas de expansão urbana: ação do mercado imobiliário sobre territórios de fragilidade ambiental e vulnerabilidade. In: ENANPARQ, 2016., 4. [Anais...]. Porto Alegre, 2016.
- AZEVEDO, J.H. *Fluxos subterrâneos e recarga do sistema aquífero alter do chão em lateritos amazônicos: estudo de caso em porto Trombetas, Pará*. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade de Brasília, 2019.
- BARENBLATT, G.I., ZHELTOV I.P., KOCHINA, I.N. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, n. 24, p. 1286-1303, 1960. [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(60\)90107-6](https://doi.org/10.1016/0021-8928(60)90107-6)
- CNRH. *Resolução n 29, de 11 de dezembro de 2002* - Define diretrizes para a outorga de uso dos recursos hídricos para o aproveitamento dos recursos minerais, 2002.
- DIAS, J.C.S.; BACELLAR, L.A.P. *A hydrogeological conceptual model for the groundwater dynamics in the ferricretes of Capão Xavier, Iron Quadrangle, Southeastern Brazil*, CATENA, Volume 207, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105663>
- ENDO I., CASTRO, P.T.A.; MACHADO, R., GALBIATTI, H.R.; ROSSI, D.Q.; ZAPPAROLI, A.C.; DELGADO, C.E.R.; OLIVEIRA, M.M.F.O. *Estratigrafia e evolução estrutural do quadrilátero ferrífero, Minas Gerais*. Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos, 2020.
- FONTES, M. P., & PERONI, R. de L. Influence of water level in mine sequencing applied to strategic mining planning. *REM - International Engineering Journal*, 73, 2020. <https://doi.org/10.1590/0370-44672019730082>,
- FRASA. *Mina de Capão Xavier. Relatório de Acompanhamento Hidrogeológico. Ciclo Hidrogeológico 2018/2019*. Relatório Técnico, Belo Horizonte, Vale, 2020.
- GOMES, A.W. *Impactos da variabilidade temporal do regime pluviométrico da recarga de aquíferos: estudo de caso em Caetité, BA*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade de Brasília, 2019.
- HANTUSH, M.S. Modification of the theory of leaky aquifers. *Journal of Geophysics Research*, v. 65, n. 11, p. :3713-3725, 1960. <https://doi.org/10.1029/JZ065i011p03713>
- JAKEMAN, A.J.; BARRETEAU, O; HUNT, R.J.; RINAUDO, J.C.; ROSS, A.; ARSHAD, M.; HAMILTON, S. *Integrated Groundwater Management: An Overview of Concepts and Challenges*. 10.1007/978-3-319-23576-9_1/: 3-19, 2016.
- LUME. *Projeto de Sondagem Geológica Capão Xavier - Mar Azul, 2021 Estudo de Impacto Ambiental Vol. I - Caracterização do Empreendimento*, 2021.
- MOENCH, A.F. Double porosity models for fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resources Research*. v. 20, n., p. 831-846, 1984. <https://doi.org/10.1029/WR020i007p00831>
- MOURÃO, M.A.A *Caracterização hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 94-136p, 2007.
- OWOR, M., OKULLO, J., FALLAS, H. Permeability of the weathered bedrock aquifers in Uganda: evidence from a large pumping-test dataset and its implications for rural water supply. *Hydrogeology Journal* 30, p. 2223-2235. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02534-0>
- PAULA, T.L.F., CAMPOS, J.E.G. Aquíferos com fluxos controlados simultaneamente por porosidade intergranular e planar: Aplicação a rochas metassedimentares do Alto Paraguai, MT. RBRH. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, p. 11-24, 2016. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p11-24>
- RAMOS, M.L.S; CORDEIRO, V.F, FERNANDES, R.A. *Histórico e arcabouço hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero. Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. 382-405p, 2020.
- RIBEIRO, D. T. *Enriquecimento supergênico de formações ferríferas bandadas: estruturas de colapso e desordem*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Rio de Janeiro. 123p, 2004.
- ROY HILL. Roy Hill Iron Ore Pty Ltd - *Revised proposal for the roy hill iron ore mine -Environmental Review*.176p, 2020.
- SHINZATO, E.; CARVALHO FILHO, A. *Projeto APA Sul Região Metropolitana de Belo Horizonte: estudos do meio físico, pedologia*. Belo Horizonte: CPRM/EMBRAPA/SEMAD, 2005.
- SMITH, L. 2020. *Hydrogeology and mineral resource development*. The Groundwater Project. ISBN: 978-1-77470-002-0
- THEIS, C. V. The source of water derived from wells— Essential factors controlling the response of an aquifer to development: *Civil Engineering*, v. 10, n. 5, p. 277-280, 1940.
- WARREN, J.E.; ROOT, P.J. The behavior of naturally fractured reservoirs. *Society of Petrol. Engrs. Journal*, n. 3, p. 245-255, 1963. <https://doi.org/10.2118/426-PA>
- WOLEYPARSONS. *Pilbara Iron Ore Project*. Groundwater Impact Assessment. 352 p, 2012.