



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

Área de concentração – Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Linha de pesquisa- Hidrogeologia Conceitual e Aplicada

**CARACTERIZAÇÃO DOS AQUÍFEROS DA MINA CAPÃO
XAVIER, QUADRILÁTERO FERRÍFERO E PROPOSTAS PARA A
GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
Nº 211**

RODRIGO CESAR AZEVEDO MIGUEL
Orientador: Professor José Eloi Guimarães Campos

Brasília, Março de 2023.



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

Área de concentração – Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Linha de pesquisa- Hidrogeologia Conceitual e Aplicada

**CARACTERIZAÇÃO DOS AQUÍFEROS DA MINA CAPÃO
XAVIER, QUADRILÁTERO FERRÍFERO E PROPOSTAS PARA A
GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nº 211

RODRIGO CESAR AZEVEDO MIGUEL

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos (Orientador)

Dra. Maria Antonieta Mourão (Serviço Geológico do Brasil)

Prof. Dr. Geraldo Resende Boaventura (Universidade de Brasília)

Brasília, Março de 2023.

MMM636c Miguel, Rodrigo Cesar Azevedo
Caracterização dos Aquíferos da Mina Capão Xavier,
Quadrilátero Ferrífero e Propostas para a Gestão dos
Recursos Hídricos Subterrâneos / Rodrigo Cesar Azevedo
Miguel; orientador José Eloi Guimarães Campos. -- Brasília,
2023.
86 p.

Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) --
Universidade de Brasília, 2023.

1. Aquíferos. 2. Hidráulica de Poços . 3. Hidroquímica. 4.
Gestão de Recursos Hídricos. I. Campos, José Eloi Guimarães
, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por ter incentivado de maneira incondicional a continuidade e conclusão deste trabalho. Dona Anita que em memória permanece eterna em seus cantos e encantos. Seu Hélio que na sua curiosidade pelo mundo motivou um jovem. A Carina, que deu direção e mostrou a significância dos valores da vida. À Lívia, por sua parceria e companheirismo supremos em todos os caminhos.

Ao Prof. José Eloi G. Campos, por orientação tão valiosa, a qual além de aspectos técnicos foi compreensiva e humana. Pelas relevantes discussões, palavras de incentivo e comentários, sem os quais a continuidade deste trabalho seria inviável.

Aos colegas de profissão, que em grandes discussões fomentaram o interesse por tema tão importante e sensível. À toda equipe de geociências e geotecnia da VALE, em especial aos colegas, Fabiana Caldas pela abertura e transparência quanto aos nichos de contribuição. Aos gestores Rafael Henchen, Alvânia Alves e Rafael Xavier por terem motivado a continuidade desta pesquisa, mesmo diante do equilíbrio de pratos, oriundos da rotina operacional. À Kelly Alves, Diniz Ribeiro e Cristiano Alves por significativas discussões sobre o que de fato seriam tantas variações tipológicas.

À Universidade de Brasília e seu Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Justificativas	4
1.4 Organização da Dissertação	5
CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO DA ÁREA DE ESTUDO	6
2.1 Clima	6
2.2 Coberturas e Relevo	6
2.3 Geologia	8
2.4 Hidrogeologia Regional	10
CAPÍTULO 3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	12
3.1 Parâmetros Hidráulicos e Testes de Bombeamento	12
3.2 Dados Hidroquímicos e Hidrológicos	19
3.2.1 Ribeirão Fechos e Córrego Seco	22
3.2.2 Ribeirão Catarina	28
3.2.3 Ribeirão Barreiro	32
3.2.4 Ribeirão Mutuca	36
3.3 Geologia Estrutural Local e suas Relações com o Fluxo Subterrâneo	42
3.3.1 Geofísica e os Elementos da Trama Rúptil	45
3.3.2 Neotectônica e sua Relação com Aquíferos Intergranulares	49
3.4 Potenciometria e Modelo Conceitual de Fluxo	53
3.5 Discussão Integrada	57
CAPÍTULO 4 - GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS	61
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	70
5.1 Conclusões	70
5.2 Recomendações	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXO I - Configurações para confecção de gráficos no Python	77
ANEXO II - Gráficos de rebaixamento e análise de parâmetros	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da região de estudo. Poço tubular - de produção de água e rebaixamento de nível; INA - instrumento de monitoramento de nível d'água; PC - poço de produção de água para abastecimento público e PZ - poço piezométrico.	3
Figura 2.1 - Distribuição da precipitação acumulada mensal entre os anos de 2001 e 2021.....	6
Figura 2.2 - Mapa de coberturas e hipsometria da região. Base de dados Endo et al. (2020).....	7
Figura 2.3 - Mapa de coberturas e hipsometria da região. Base Shinzato & Carvalho Filho, (2005).	8
Figura 2.4 - Mapa geológico da região de estudo com seção regional representativa, geologia e estruturas com base em Endo et al. (2020).....	9
Figura 2.5 - Mapa de compartimentos hidrogeológicos, com base em Ramos et al. (2020) e geologia com base em Endo et al. (2020).	10
Figura 3.1 - Fluxograma de tratamento e análise de dados de testes de bombeamento.....	13
Figura 3.2 - Exemplo de input e parâmetros escolhidos para análise no software AquiferTest. .	14
Figura 3.3 - Gráfico de barras com proporção de litotipos presentes na seção filtrante (classificação segundo a Chave utilizada pela VALE). Txi - talco xisto; imn - itabirito manganêsífero; .igo - itabirito goetítico; ifr - itabirito friável rico; IF - itabirito friável; ido - itabirito dolomítico; ic - itabirito compacto; hmn - hematita manganêsífera; hgo - hematita goetítica; hf - hematita friável; HC - hematita compacta e do - dolomito.	15
Figura 3.4 - Gráfico de correlação de <i>Pearson</i> entre litotipos, parâmetros hidrodinâmicos e vazão.....	16
Figura 3.5 - Gráfico exponencial de correlação entre vazão x condutividade e vazão x transmissividade.	16
Figura 3.6 - Relações entre seção geológica e condutividade hidráulica dos poços.....	18
Figura 3.7 - Localização da rede hidrológica utilizada e localização de coleta de amostras para geração dos dados hidroquímicos.	20
Figura 3.8 - Variação temporal da chuva anual acumulada entre os anos de 2003 e 2020.....	21
Figura 3.9 - Localização das sub-bacias Fechos e Córrego Seco, com litologia associada e rede de monitoramento utilizada.	23
Figura 3.10 - Estatística descritiva dos dados de vazão dos pontos de monitoramento analisados para o Ribeirão Fechos e Córrego Seco, com indicativo dos períodos analisados no canto superior esquerdo do gráfico referente.	24
Figura 3.11 - Síntese de valores de correlação <i>Pearson</i> entre os parâmetros analisados para os pontos de monitoramento no Córrego Seco e Fechos.	27
Figura 3.12 - Localização da sub-bacia Ribeirão Catarina com litologia associada e rede de monitoramento utilizada.....	28
Figura 3.13 - Estatística descritiva dos dados de vazão para os pontos de monitoramento analisados no Ribeirão Catarina, com indicativo dos períodos analisados no canto superior esquerdo de cada gráfico.	29
Figura 3.14 - Síntese de valores de correlação de <i>Pearson</i> entre os parâmetros analisados para os pontos de monitoramento no Ribeirão Catarina.	32
Figura 3.15 - Localização da sub-bacia Córrego do Barreiro com litologia associada e rede de monitoramento utilizada.....	33
Figura 3.18 - Localização da sub-bacia Ribeirão da Mutuca com litologia associada e rede de monitoramento utilizada.....	37
Figura 3.20 - Síntese de valores de correlação de <i>Pearson</i> entre os parâmetros analisados para os pontos de monitoramento no Ribeirão da Mutuca.	41
Figura 3.21 - Quadro com o contexto local das principais estruturas observadas na cava de Capão Xavier (CPX). A) Unidades litoestratigráficas na junção entre o Homoclinal Curral e Sinclinal Moeda. B) Linhas de forma oriundas do traçado entre os strikes das superfícies de bandamento. C) Dobras assimétricas com vergência para oeste em itabirito goethítico (IGO). D)	

Dobras assimétricas em itabirito dolomítico com vergência leste. E) Estereogramas de polos da superfície se bandamento Sb, Eixos de dobras E, e Foliação Sn.	44
Figura 3.22 – Produtos geofísicos de magnetometria e diagramas de roseta associados. A) Mapa de Amplitude do sinal analítico (ASA). B) Mapa da Segunda derivada em Z (DZ2). C) Mapa da distribuição de coberturas que bordejam a cava de CPX. D) Diagramas de rosetas com frequências das principais direções de lineamentos obtidos dos produtos geofísicos.	46
Figura 3.23 - Relação entre elementos da trama rúptil, direção de alinhamentos magnéticos do produto de amplitude do sinal analítico (ASA). A) Roseta de frequências das direções principais de fraturas observadas na cava de Capão Xavier (CPX). B) Diagramas de rosetas com frequências das principais direções do mapa de ASA. C) Mapa de tipos petrográficos da cava de Capão Xavier, com chave de classificação utilizada pela VALE at- aterro,ag- argilito, txi - talco xisto; imn - itabirito manganêsífero; .igo - itabirito goetítico; ifr - itabirito friável rico; IF - itabirito friável; ido - itabirito dolomítico; ic - itabirito compacto; hmn - hematita manganêsífera; hgo - hematita goetítica; hf - hematita friável; hc - hematita compacta e do - dolomito. D) Mapa de poços tubulares com indicativo de vazão em litros/segundo (l/s) e relação com direção de fratura com expressiva frequência.....	47
Figura 3.24 - Planos de fratura e evidências de fluxo em itabirito dolomítico na região da cava de Capão Xavier. A) Conjunto de fraturas interconectadas observável em talude na região central da cava. B) Fluxo laminar no período se seca (Mês de maio) em dolomito. C) Concreções de carbonatos e sílica em plano de fratura aberta observado em itabirito dolomítico na região central da cava.....	48
Figura 3.25 - Quadro com relações de contato e evidências de neotectônica observados na cava de Capão Xavier as letras indicam relativa das imagens na vista panorâmica com direção ESSE-WNW. As siglas nas imagens são referentes aos tipos petrográficos: Itabirito manganêsífero (IMN), Colúvio (CO), Laterita (LT), Argilito (AG), Itabirito Dolomítico (IDO), Itabirito Goetítico (IGO), Itabirito Compacto (IC) e Hematita Friável (HF). A) Vista do talude sul da cava, no qual se se observa o traço de contato marcado por falhamentos normais entre tipos geológicos de naturezas distintas. B) Traço de pequeno gráben associados a região oeste da cava no contato entre IGO e CO. C) Seta amarela em detalhe para CO composto por grânulos centimétricos sub angulosos de hematita, comumente associado às zonas de falhas normais observadas na região. D) Vista do talude sul da cava, no qual é observada a relação de falha normal no contato entre itabiritos e deposição de colúvios.	51
Figura 3.26 - Relações de traçado entre trama rúptil e sedimentos cenozoicos na cava de Capão Xavier (CPX). A) Estrutura do tipo <i>slickenside</i> observada em argilito. B) e C) Detalhes de estruturas de bioturbação e icnofóssil em argilito, vista em planta e longitudinal respectivamente. D) Fraturas conjugadas de baixo ângulo associadas á argilito na parede sul da cava de CPX.	52
Figura 3.27 - Mapa com poços de monitoramento e indicação de variação de carga hidráulica entre os períodos pré 2004 e pós 2004. Nota-se redução dos valores principalmente para os poços alinhados NE/SW rumo as sub-bacias de Fechos e Córrego Seco.....	54
Figura 3.28 - Gráficos de boxplot das variações de cota e nível potenciométrico dos ciclos pré 2004 e pós 2004.....	55
Figura 3.29 - Mapa dos pontos de caracterização isotópica com tempos de renovação das águas plotados em anos. Mapa litológico base Endo et al. (2020).....	56
Figura 3.29 - Diagrama com a representação do modelo conceitual de fluxo com as direções principais de contribuição. As setas de cor laranja indicam a componente de fluxo regional associada a quebras relevo e contatos da cobertura com o meio sotoposto. Setas brancas indicam a componente de fluxo local no meio intergranular. Setas pretas indicam as componentes locais e regionais de fluxo verticais. Os traços em verde indicam os limites das bacias controlados pelas coberturas de platôs.....	57
Figura 3.30 - Parâmetros hidroquímicos e relação com poços de bombeamento mediante interação com seção geológica.....	58

Figura 3.31 - Quadro com evidências da relação entre estruturas de deformação do tipo Riedel e controle das variações petrográficas da cava de Capão Xavier (CPX) e seus elementos associados com a formação de bacias cenozoicas e meio intergranular associado ao intemperismo de rochas da Formação Gandarela e Formação Cauê **A)** Mapa de tipos petrográficos da cava de Capão Xavier e conjunto de estruturas Riedel, com chave de classificação utilizada pela VALE at-aterro, ag- argilito, txi - talco xisto; imm - itabirito manganêsífero; .igo - itabirito goetítico; ifr - itabirito friável rico; IF - itabirito friável; ido - itabirito dolomítico; ic - itabirito compacto; hmn - hematita manganêsífera; hgo - hematita goetítica; hf - hematita friável; hc - hematita compacta e do - dolomito. **B)** Vista panorâmica de CPX com destaque para as componentes Riedel e controle das bacias cenozoica. **C)** Amostra de mão com detalhe para fratura aberta em IC composto por hematita -Hm e quartzo- Qtz com fratura preenchida por óxido de manganês – Mn. **D)** Relações de contato entre itabirito dolomítico e itabirito manganêsífero associado ao conjunto de fraturas regulares locais, este comportamento se propaga na formação dos tipos petrográficos regionais.60

Figura 4.1 - Mapas de evolução temporal da ocupação territorial na região de estudo. Imagem de 1966 reconstituição VALE- GIS mineral. Imagem 2002 Google Earth. Imagem 2019 ortoimagem VALE- GIS mineral.62

Figura 4.2 - Ilustração esquemática dos efeitos do bombeamento e recarga, com conceitos adaptados de Konivow & Bredehoeft (2020).65

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Base de dados e escalas utilizadas.	12
Tabela 3.2 - Chave de classificação de tipos de rochas adotados pela empresa VALE.....	14
Tabela 3.3 - Sumário estatístico dos parâmetros hidráulicos.	17
Tabela 3.4 - Sumário dos parâmetros hidráulicos e descrição dos poços analisados.....	18
Tabela 3.5 - Relação dos instrumentos compartimentados por sub-bacia para medição de vazão, e escala temporal de aquisição dos dados.	22
Tabela 3.6 - Relação de parâmetros hidroquímicos analisados por sub-bacia de contribuição e resolução temporal.	22
Tabela 3.7 - Sumário da diferença entre as vazões (l/s) para os pontos de monitoramento no Ribeirão Fechos e intervalos analisados.....	23
Tabela 3.8 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para Surgência Cárstica em Fechos.	25
Tabela 3.9 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD28/94 em Fechos.....	25
Tabela 3.10 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD08/96 associado ao Córrego Seco.....	26
Tabela 3.11 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para os vertedores 04/94 e 30/09 referentes ao Ribeirão Catarina.	29
Tabela 3.12 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD 04/94.	30
Tabela 3.13 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD 30/09.....	31
Tabela 3.15 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD 25/98.....	35
Tabela 3.16 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD 07/96.....	35
Tabela 3.17 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para os vertedores 04/94 e 30/09 referentes ao Ribeirão Catarina.	37
Tabela 3.20 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD 01/94.....	39
Tabela 3.21 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD 02/94.....	39
Tabela 3.22 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD 03/94.....	40
Tabela 3.23 - Relação estatística das variações entre os ciclos das variações de cota e nível potenciométrico dos ciclos pré 2004 e pós 2004.....	55
Tabela 4.1 - Síntese dos principais impactos potenciais associados com a atividade de mineração e medidas de controle aplicáveis.....	66

RESUMO

Essa dissertação discute a importância da mensuração da sustentabilidade dos aquíferos em ambientes de minas a céu aberto em fases de operação e pós-operação, com base em diversos indicadores relevantes. O trabalho utilizou metodologias tradicionalmente aplicadas em estudos hidrogeológicos incluindo, hidroquímica, tratamento de dados de testes de bombeamento, avaliação potenciométrica, interação entre aquíferos e estratigrafia e geologia estrutural local. A evolução do nível potenciométrico envolve vários fatores, incluindo hidrogeologia local, topografia, cobertura vegetal, clima e práticas de mineração. Os reservatórios na região são representados por dois aquíferos sobrepostos, sendo o superior do tipo intergranular e o mais profundo do tipo fraturado, contudo, a correlação dos dados de testes de bombeamento indica um aquífero misto com duas porosidades. Este comportamento é explicado pelo fato dos poços captarem simultaneamente água dos dois meios. A curva exponencial de correlação entre vazão e parâmetros hidrodinâmicos pode ser uma alternativa para previsibilidade da circulação da água subterrânea em áreas de lavras situadas no Quadrilátero Ferrífero. A integração dos dados hidroquímicos foi fundamental para observar os contrastes entre os períodos pré- e pós-operação da cava de Capão Xavier e destacar os principais elementos e direções de controle da trama neotectônica. Os lineamentos que marcam o contato entre a laterita e argilas com a formação ferrífera são correlacionáveis com componentes NW/SE e NE/SW, e estas direções estão associadas com os poços tubulares de mais alta vazão observáveis na cava. Embora ocorram poços de alta vazão associados à rochas compactas que teriam menor capacidade de transmissão de água, o índice de fraturamento interconectado é elevado, resultando em um ambiente de grande circulação de água. O avanço desses processos está associado não apenas ao campo de colapso e abatimentos oriundos de carstificação, mas também aos campos de tensão neotectônicos presentes a partir do Cenozoico, cuja relação se estabelece com maiores espessuras locais do manto de intemperismo. Em Capão Xavier, as evidências de estruturas neotectônicas podem ser observadas nas relações de contato planares, condicionadas por zonas de falhas normais entre os variados tipos de itabirito e os depósitos terrígenos cenozoicos, onde ocorre a preservação de icnofósseis. Para essas zonas, são comuns fluxos de água mesmo em períodos de estiagem, os quais confluem para o aparecimento de erosões e rupturas dos tipos planares e em cunha o que destaca o controle da neotectônica no condicionamento geotécnico na região. A mina de Capão Xavier pode ser um caso particular em que a questão da lavra, recursos hídricos e expansão urbana apresenta forte interação. Neste sentido, a empresa VALE além de ser uma produtora de minério de ferro na região, também é produtora de água, que é fornecida para a companhia de saneamento.

Palavras-chave: Aquíferos, hidráulica de poços, hidroquímica, gestão de recursos hídricos.

ABSTRACT

The present research discusses the importance of evaluating the sustainability of aquifers in open pit mine environments in operational and post-operational phases, based on several relevant indicators. The study integrated methodologies traditionally applied in hydrogeological studies including hydrochemistry, pumping tests data processing, potentiometric evaluation, interaction between aquifers and stratigraphy and local structural geology. The evolution of the potentiometric level involves several factors, including local hydrogeology, topography, vegetation cover, climate and mining practices. The reservoirs in the region are represented by two overlapping aquifers, the upper one of intergranular type and the deepest as a fractured medium; however, the correlation of the pumping test data indicates a double porosity mixed aquifer. This behavior is explained by the fact that wells capture water simultaneously from both media. The exponential correlation curve between flow and hydrodynamic parameters can be an alternative for predictability of groundwater circulation in mining areas located in the Quadrilátero Ferrífero region. The integration of hydrochemical data was fundamental to observe the contrasts between the pre- and post-operation periods of Capão Xavier pit and to highlight the main elements and directions of control of the neotectonic structures. The lineaments that mark the contact between the laterite and clays with the ferriferous formation are correlated with NW/SE and NE/SW components, and these directions are associated with the tubular wells of highest discharge in the pit. Although these lithotype represent compact rocks that would have lower water transmission capacity, the interconnected fracture index is high, resulting in a prominent water circulation environment. The progress of these processes is associated not only with the field of collapse and rebates derived from karstification, but also with the stress fields present from the Cenozoic, at conjunction with weathered mantle. In Capão Xavier, evidence of neotectonic structures can be observed in planar contact relationships, conditioned by zones of normal faults between the various types of itabirite and Cenozoic terrigenous deposits, including the preservation of icnofossils. For these zones, water flows are common even in dry periods, contributing for the appearance of erosions and ruptures of planar and wedge types, which highlights the control of neotectonics in geotechnical conditioning in the region. The Capão Xavier mine may be a particular case in which the issue of mining, water resources and urban expansion presents strong interaction. In this sense, VALE Company, in addition to being an iron ore producer in the region, is also a water resource producer, which water is derived to public supply.

Keywords: Aquifers, well hydraulics, hydrochemistry, water resource management.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

No rumo do desenvolvimento da sociedade humana, sempre foi observada uma dicotomia entre a evolução tecnológica, a necessidade de produção de materiais e a pressão sobre os ambientes naturais. Esta questão acompanha o ser humano desde os intervalos da pré-história que abarcam desde a idade do Cobre (3300-1200 ac) e a idade do Ferro (1200ac a 1000dc).

Atualmente, a demanda por infraestrutura requer elementos que comportem ambientes cada vez mais seguros, e capazes de suportar o crescimento populacional de forma sustentável. O aço por sua vez, cerne do desenvolvimento da sociedade contemporânea, tem como minério de ferro a sua origem, matéria prima a qual o Brasil se estabelece como o segundo maior produtor global (NRCAN, 2020). No território brasileiro, os estados do Pará e Minas Gerais representam 92,7% da produção nacional de ferro, cujas exportações figuram entre 68,9% das principais substâncias metálicas (AMB 2021).

Frente a tal importância, os níveis de produção devem dialogar abertamente com a sociedade, no mérito do ordenamento territorial, a fim de garantir controles efetivos do meio ambiente e desenvolvimento socioeconômico sustentável. Neste conjunto de fatores, o estado de Minas Gerais é dotado de cenários singulares, dentre os quais a região do Quadrilátero Ferrífero, se estabelece como ponto central do diálogo, pois abrange região com elevado adensamento populacional, com crescente demanda hídrica, bordejado por expressiva atividade de extração e processamento mineral e industrial.

A relação entre recursos hídricos e mineração em geral segue caminhos que podem atuar de forma complementar ou mesmo antagônica. Um deles envolve o rebaixamento para viabilizar a extração de minério, no qual o nível piezométrico encontra-se acima ou próximo da cota de lavra, característica de locais com ampla disponibilidade de água, como ocorre em Carajás, no estado do Pará (Azevedo, 2019) e Quadrilátero Ferrífero. Por outro lado, existem casos, cuja exploração da água é direcionada para processos de tratamento do minério, em região com escassez hídrica, como em Caetité, Bahia (Gomes, 2019) e nas operações da província de Pilbara, Austrália (WorleyParsons 2012, Roy Hill 2020) . Isto é, há casos em que a água ocorre como impedimento à lavra e outros em que a água ocorre como limitante aos processos de tratamento de minério. Tal importância denota grande responsabilidade por parte do setor mineral, cujas atividades de operação das minas, em certos casos, bordejam integralmente cidades adjacentes, como é o caso de Itabira-MG, ou mesmo de Capão Xavier que está situada na vizinhança de grandes bairros antigos e novos, em contínuo processo de licenciamento, ampliação e adensamento.

Frente ao conjunto de polos onde ocorrem atividades de extração mineral, o caso da mina de Capão Xavier figura como único no mundo, em função da interação da lavra com a ocupação humana, cuja rede de monitoramento antecedeu a operação em 10 anos. Neste sentido, há interação dos aspectos do meio físico (clima tropical com feições orográficas específicas) junto à urbanização, em que a lavra de ferro, em mina a céu aberto, se situa próxima a relevantes polos habitacionais.

No aspecto locacional, a área de lavra, encontra-se a menos de 10 km da capital do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, além de ser limítrofe aos municípios de Nova Lima, 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).

Apesar de existirem na região as cavas das minas da Mutuca e 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.

Em função dos requisitos firmados para operação da mina, formou-se uma base abrangente de estudos contínuos ao longo do tempo, 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 superficial, 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.

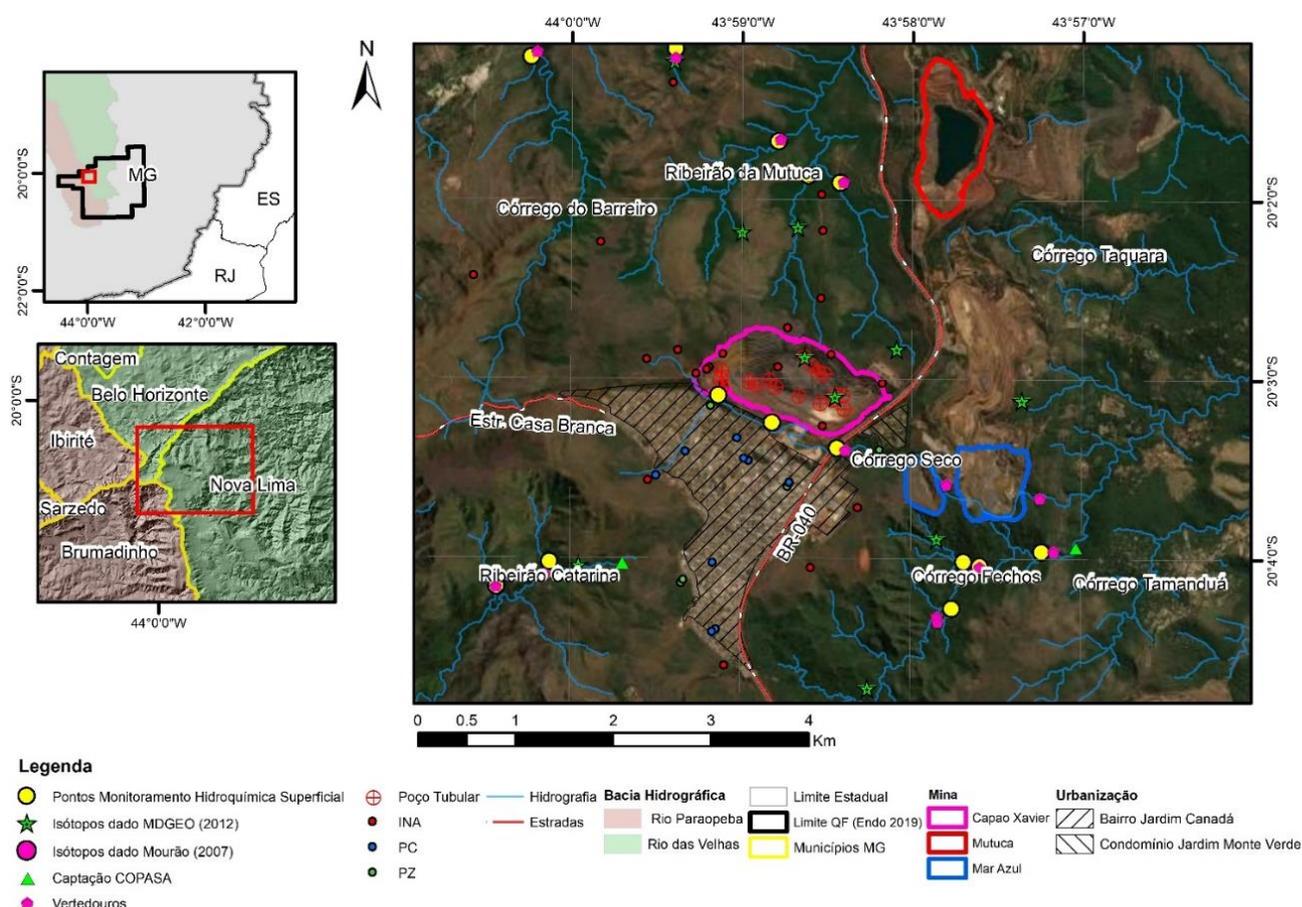


Figura 1 - Mapa de localização da região de estudo. Poço tubular - de produção de água e rebaixamento de nível; INA - instrumento de monitoramento de nível d'água; PC - poço de produção de água para abastecimento público e PZ - poço piezométrico.

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). De modo que pouco foi discutido sobre o papel do manto de intemperismo no controle e regularização das vazões superficiais e potencial hidrogeológico.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo identificar os elementos que interferem na dinâmica do fluxo subterrâneo para o caso da mina de Capão Xavier. E para esta proposição discutir a importância dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos por testes de bombeamento, avaliar os controles da neotectônica no condicionamento dos aquíferos inconsolidados e analisar de forma qualitativa as relações entre produção mineral e demandas hídricas para os distintos usos, de forma a se destacar ações potenciais de gestão para o caso estudado. A partir do objetivo principal pretende-se que as novas informações geradas sejam utilizadas no modelo numérico existente, no sentido de ampliar sua aplicabilidade para avaliação de cenários previsionais com relação ao comportamento hidrogeológico da região.

Como objetivos específicos são previstos:

- Avaliar as relações estatísticas entre as variações de vazão dos córregos locais e suas associações com a variação climática e manto de intemperismo;
- Integrar dados de lineamentos geofísicos de relevância e sua expressão em superfície como condicionadores do fluxo subterrâneo;
- Determinar a relação entre os elementos da trama neotectônica e os condicionamento de fluxos da região, de modo a evidenciar a importância do aquífero intergranular associado ao manto de intemperismo;
- Propor ações para a mitigação dos efeitos da mineração com relação aos aquíferos que ainda não foram estudadas ou não evidenciadas.

1.3 Justificativas

O presente estudo justifica-se pelo fato de, apesar do grande número de pesquisas realizadas na região, ainda não terem sido desenvolvidos esforços para a caracterização do controle da neotectônica no condicionamento dos aquíferos (profundos e rasos), e estudos que destaquem a importância dos aquíferos intergranulares não consolidados na produção de água para as bacias hidrográficas que drenam a partir destes reservatórios inconsolidados.

Em função do processo de fechamento da mina e fim da atividade do bombeamento, prevê-se a formação de relevante reservatório na região da cava, e construção de um vertedor para o Córrego Seco. Este deságua no Córrego Fechos, onde ocorrem captações de água pela COPASA. Apesar desta relevante interação, ainda não há estudos publicados sobre variações no comportamento hidroquímico sazonal do Córrego Seco e demais bacias da região. Portanto, como justificativa adicional, para a realização do presente estudo considera-se a necessidade de discussão sobre eventuais fontes de contaminação e interferências que podem condicionar a variação desses parâmetros.

1.4 Organização da Dissertação

A dissertação será organizada em formato tradicional com cinco capítulos sequenciais, com a seguinte organização geral:

- Capítulo 1: Introdução em que são apresentados os objetivos e as justificativas para a realização do estudo, bem como a localização da área objeto da pesquisa;
- Capítulo 2: Caracterização do meio físico, em que se pretende mostrar de forma sintética os planos de informações que condicionam os aquíferos locais, incluindo geologia, manto de intemperismo, clima e relevo;
- Capítulo 3: Resultados e discussões, objetiva mostrar o conjunto de resultados, as avaliações sobre estes dados e uma discussão de forma a se destacar os objetivos e produzir novos conhecimentos sobre a hidrogeologia da região, com destaque para a importância da neotectônica e dos aquíferos intergranulares inconsolidados;
- Capítulo 4: Gestão dos recursos hídricos subterrâneos é um capítulo propositivo onde são apresentados os problemas e enumeradas soluções para questões hídricas na condição de forte interação entre mineração e urbanização;
- Capítulo 5: Conclusões e recomendações onde os principais resultados são sintetizados, além de se propor estudos futuros para se avançar ainda mais no conhecimento hidrogeológico da região.

CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 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 2.1). 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).

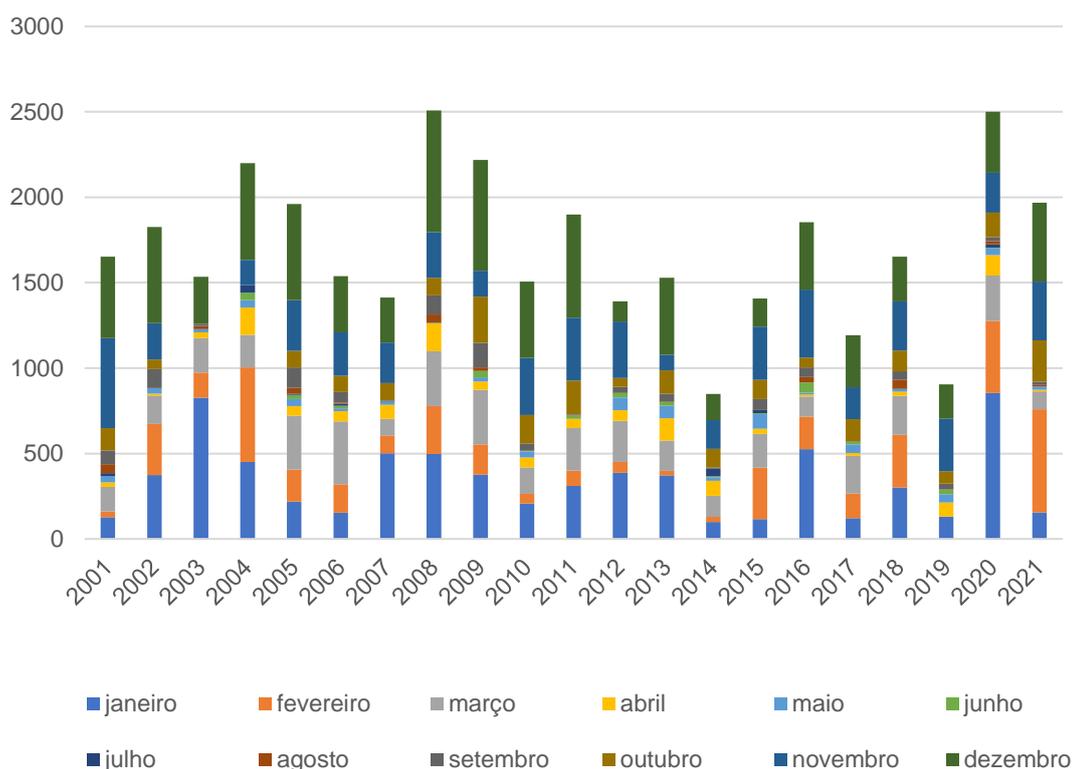


Figura 2.1 - Distribuição da precipitação acumulada mensal entre os anos de 2001 e 2021.

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 região, a evaporação máxima anual foi de 1031 mm/ano, o que torna o balanço hídrico local positivo (Frasa, 2020).

2.2 Coberturas e Relevo

Serras e encostas delineiam o padrão de o relevo da região, marcado por altitudes acima de 1100 m (Figura 2.3). Mediante acomodações e dissipação de tensões condicionados por

estruturas, as coberturas na região, podem atingir profundidades superiores à 120 m (Ribeiro 2004). As coberturas sedimentares definidas por Formação Cata Preta (Castro et al., 1998), envolvem horizontes saprolitizados de coloração avermelhada com presença seixos subangulosos à arredondados de filitos, quartzitos ferruginosos, itabiritos e quartzo em veios envolvidos por uma matriz argilosa. Cangas estruturadas recobrem os platôs enquanto cangas detríticas ocorrem em encostas e fundos de vales (Dias & Bacellar 2021).

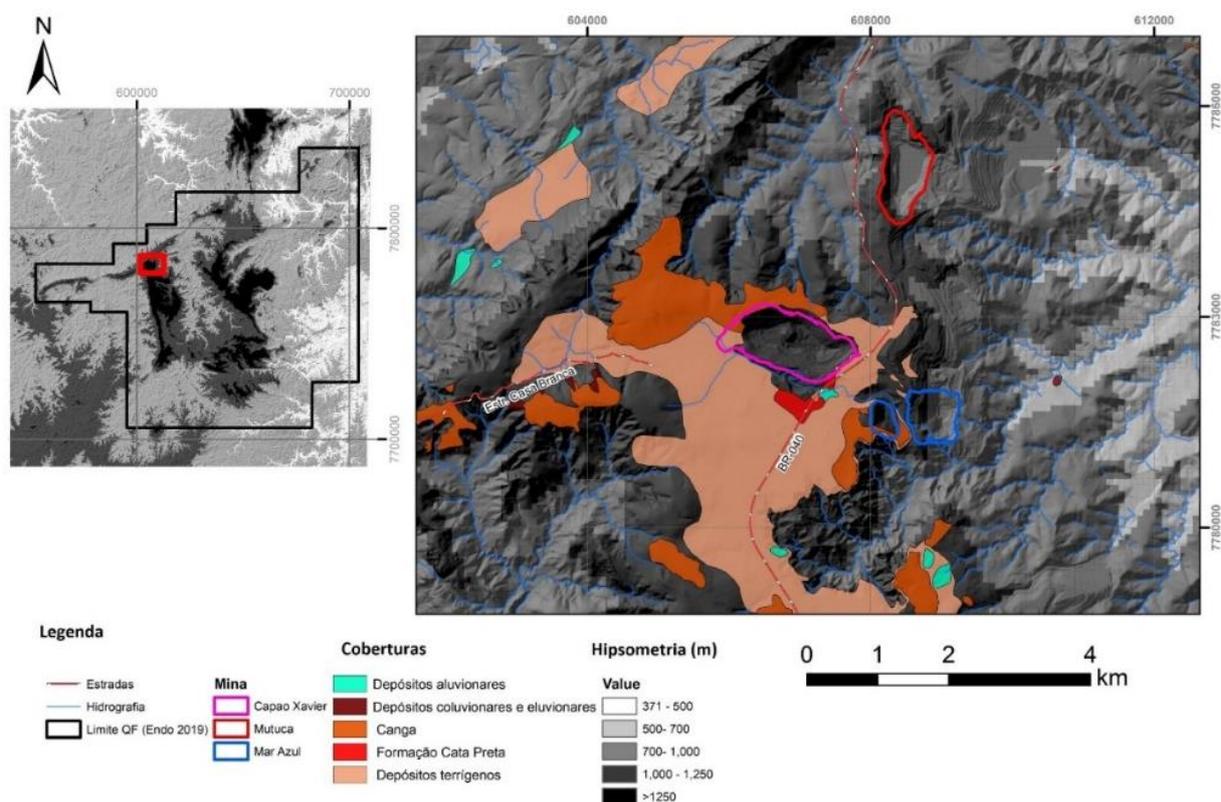


Figura 2.2 – Mapa de coberturas e hipsometria da região. Base de dados Endo et al. (2020).

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 2.3).

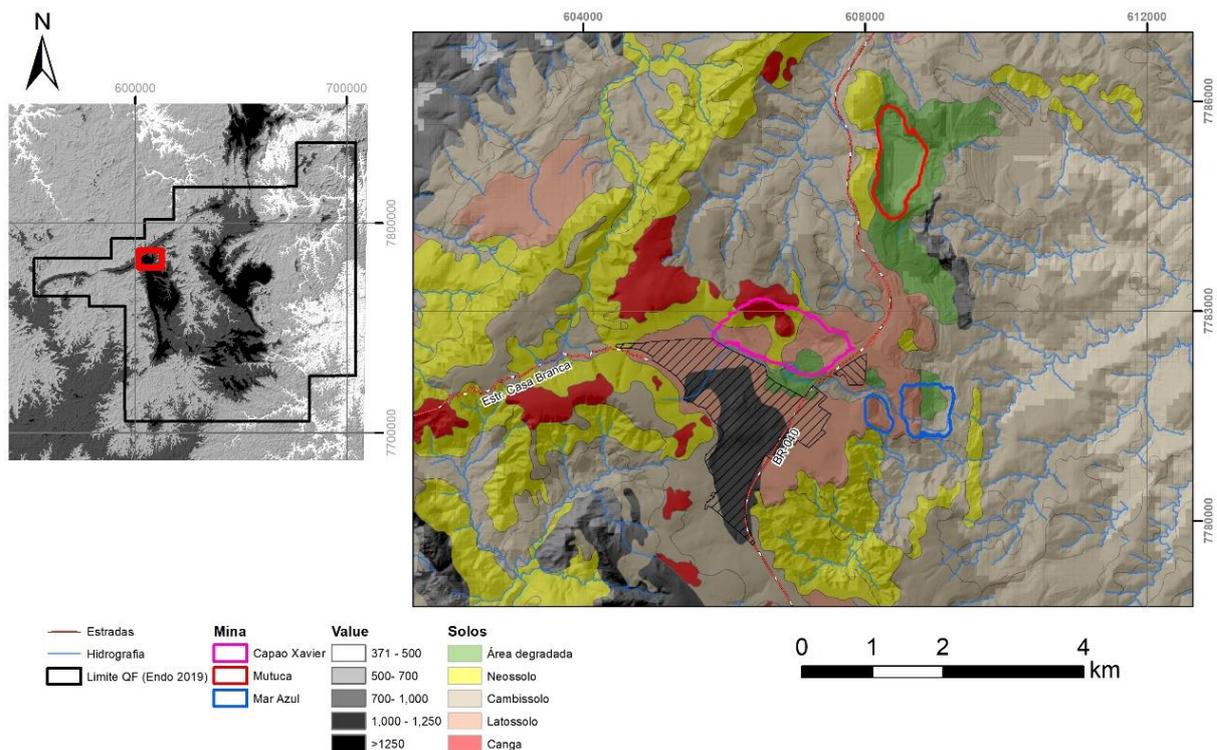


Figura 2.3 - Mapa de coberturas e hipsometria da região. Base Shinzato & Carvalho Filho, (2005).

2.3 Geologia

As unidades litoestratigráficas do quadrilátero ferrífero foram compartimentadas por Endo et al. (2020) em (Figura 2.4): **Complexos metamórficos** (Meso/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 branco amarelada. A Formação Batatal ocorre como pacote heterogêneo de filitos, e

apresenta diferentes graus de compactidade 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 dolomítico, filitos dolomíticos e dolomitos ferruginosos, tal qual o saprólito, em seus variáveis níveis de concentração de ferro também integra relevantes mineralizações.

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 (Pires, 1979). 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 2.4).

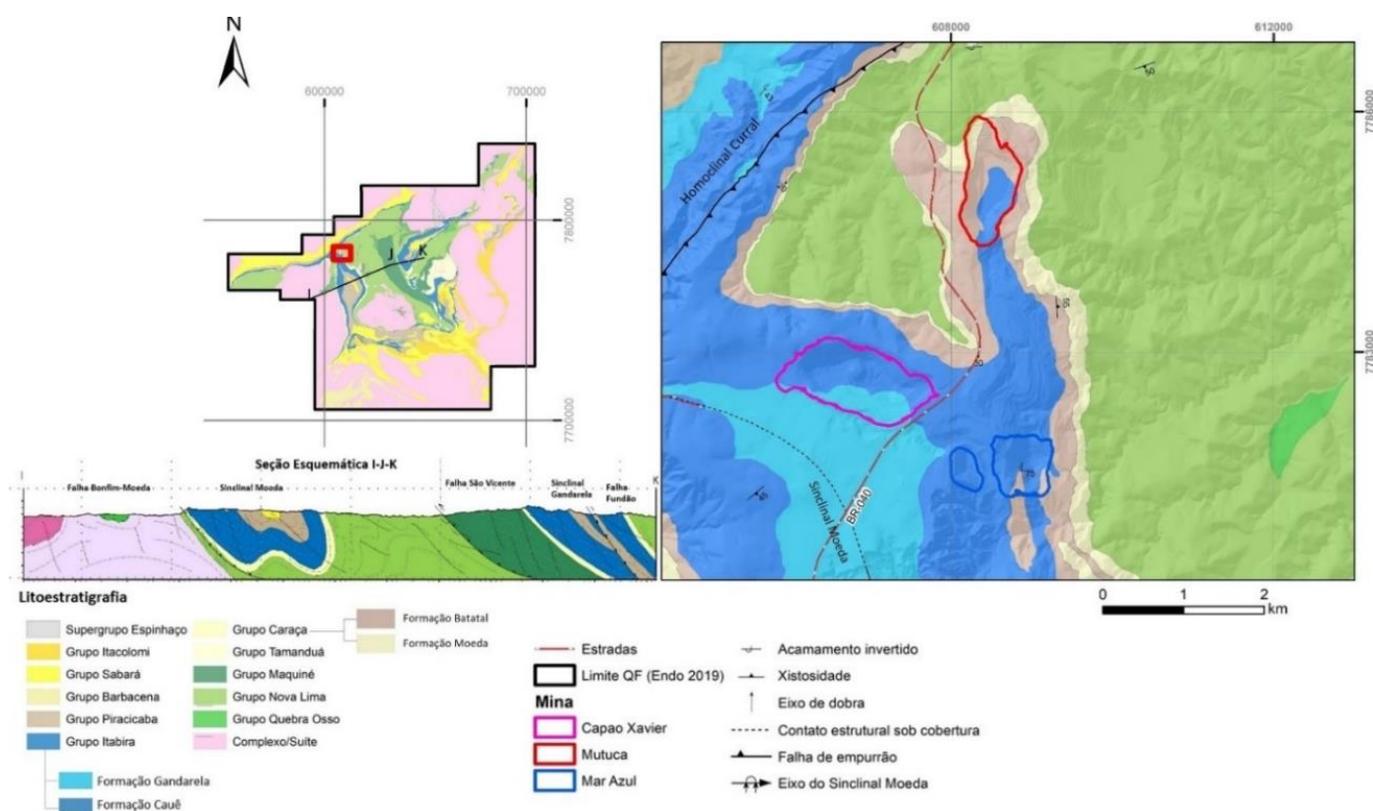


Figura 2.4 - Mapa geológico da região de estudo com seção regional representativa, geologia e estruturas com base em Endo et al. (2020).

2.4 Hidrogeologia Regional

Em função 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 2.5).

As unidades descritas são:

- **Sistema aquífero granular**, composto por cangas, e colúvios com valores de condutividade (K) que variam entre $1,15 \times 10^{-8}$ (Lazarim 1999 *apud* Mourão 2007) a 5×10^{-4} m/s (Ramos et al., 2020), argilas e sedimento silte-arenosos com k variando entre $5,0 \times 10^{-10}$ (Lazarim 1999 *apud* Mourão 2007) e 5×10^{-2} m/s (Ramos et al., 2020), e valores de porosidade efetiva (*ne*) entre 1 e 10% (Mourão, 2007).
- **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).

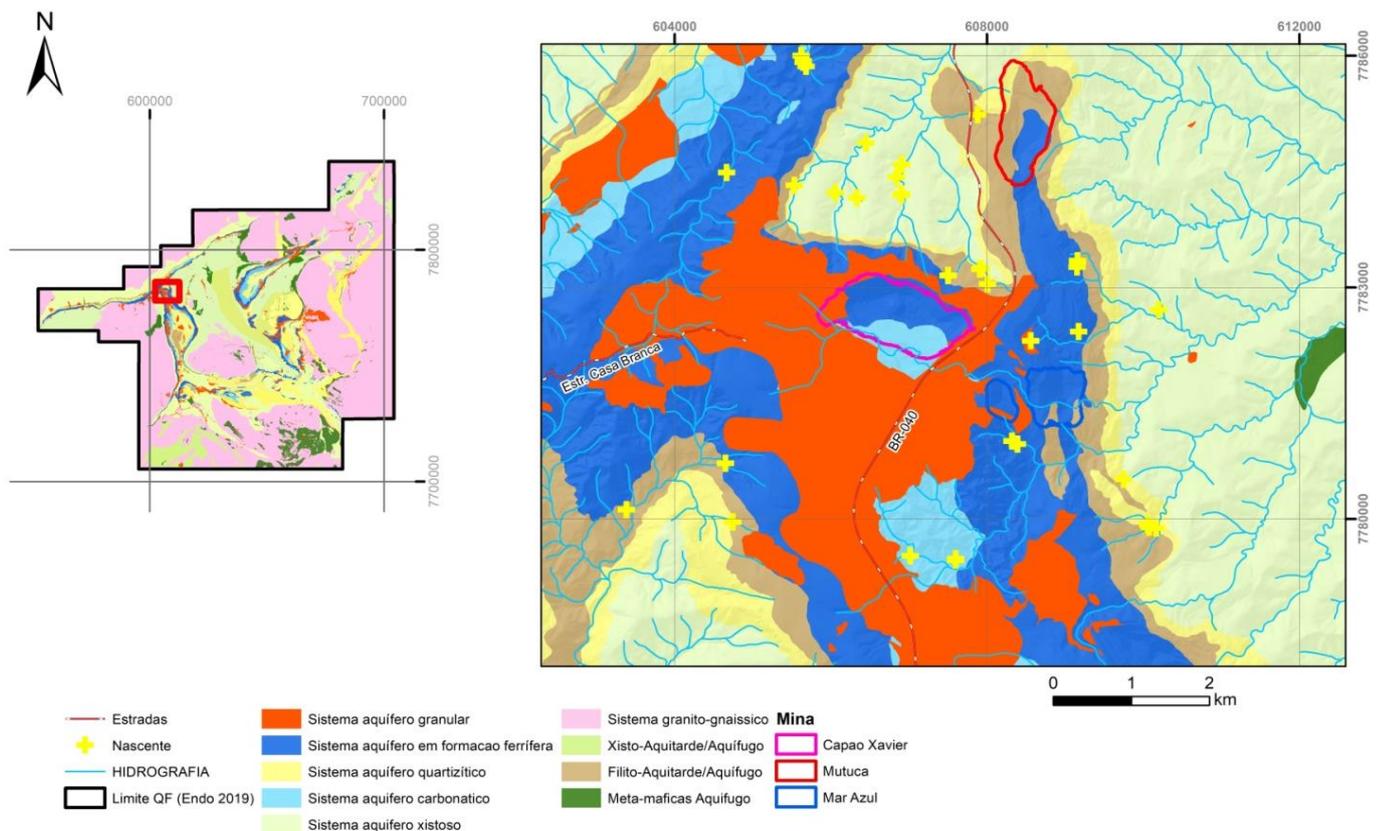


Figura 2.5 - Mapa de compartimentos hidrogeológicos, com base em Ramos et al. (2020) e geologia com base em Endo et al. (2020).

- **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., 2019) e porosidade interconectada de 1,5 a 2,5% (Ramos et al., 2020 apud Mourão 2007).
- 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* IF_i entre 1 a 2,5% (Mourão 2007).
- **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 IF_i entre 0,25 a 0,75% (Beato et al., 2005).

Unidades que atuam como aquitardes ou aquífugos 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 IF_i entre 0,25 e 0,75% (Ramos et al., 2020), além de rochas metamáficas as quais também atuam como relevantes compartimentadores hidrogeológicos.

CAPÍTULO 3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como etapa inicial, foi feita a revisão de extensas bases de monitoramento disponibilizadas pela mineradora VALE, na qual constam mais de 27 anos de registros em parâmetros distintos com resoluções espaciais variadas. Em função das escalas temporais abrangentes, foram selecionados intervalos de tempo adequados para avaliar condições prévias e durante operação da mina, cujo suporte de dados existente se mostrou adequado para as avaliações propostas.

3.1 Parâmetros Hidráulicos e Testes de Bombeamento

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). Para este estudo a relação dos poços utilizados encontra-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - 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

Por se tratar de uma cava com rebaixamento constante, o bombeamento simultâneo de diversos poços pode resultar em cargas hidráulicas com maior variação as quais podem estar relacionadas com as heterogeneidades do meio (Ackerer et al., 2014). Em função deste condicionamento, para interpretação dos parâmetros hidráulicos, é fundamental o conhecimento do meio físico em que os poços estão localizados. A integração e interpretação destes dados seguiu o fluxograma presente na Figura 3.1 e contou com a utilização de diferentes softwares para os propósitos adequados.

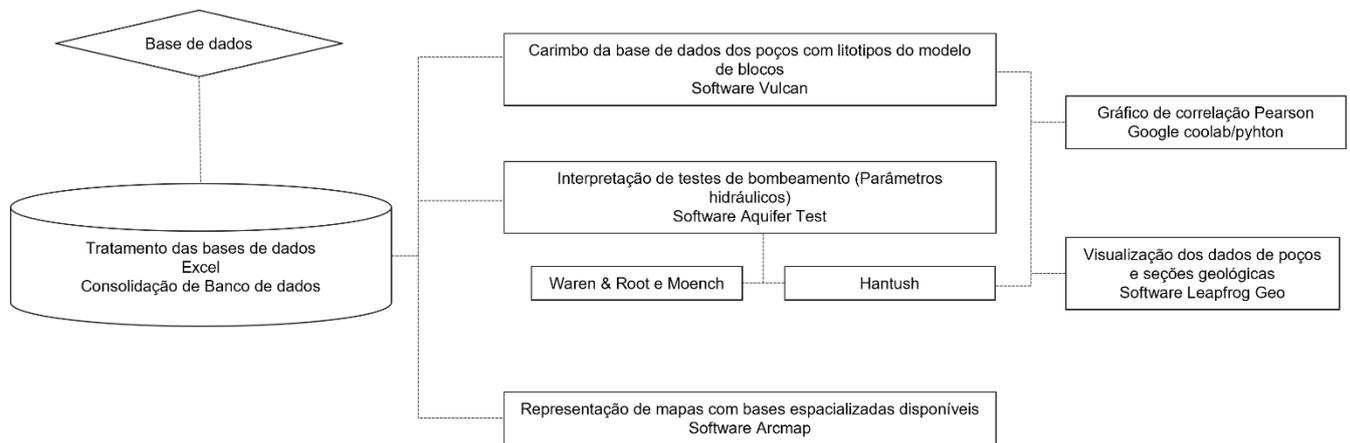


Figura 3.1 - Fluxograma de tratamento e análise de dados de testes de bombeamento.

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.

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 utilizado o comprimento da zona saturada +10%. Todas as curvas analisadas e interpretadas constam nos anexos.

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.

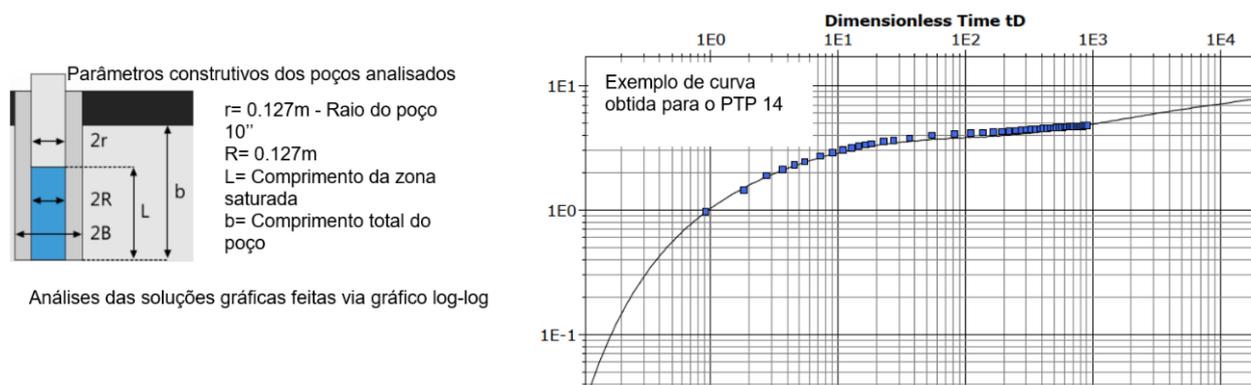


Figura 3.2 - Exemplo de input e parâmetros escolhidos para análise no software AquiferTest.

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.

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 3.2) 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.

Tabela 3.2 - Chave de classificação de tipos de rochas adotados pela empresa VALE

TIPOS	LITOTIPOS	Fe%	Al%	Mn%	LOI%	Ca%	Mg%	G1%
HEMATITAS	HC - Hematita Compacta	≥ 62	< 2.5	< 1	< 3.5			≥ 50
	HF - Hematita Friável	≥ 62	< 2.5	< 1	< 3.5			< 50
	HMN- Hematita Manganêsfera	≥ 60		≥ 1				< 50
	HGO- Hematita Goetítica	≥ 60	≥ 2.5	< 1	≥ 3.5			< 50
ITABIRITOS	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
	IGO - Itabirito Goetítico	≥ 20 e < 60	≥ 2.5	< 1	≥ 3.5			-
	IMN - Itabirito Manganêsfero	≥ 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

No gráfico da Figura 3.3 estão representadas as proporções de litologias presentes nas seções filtrantes de cada poço tubular com perfil analisado.

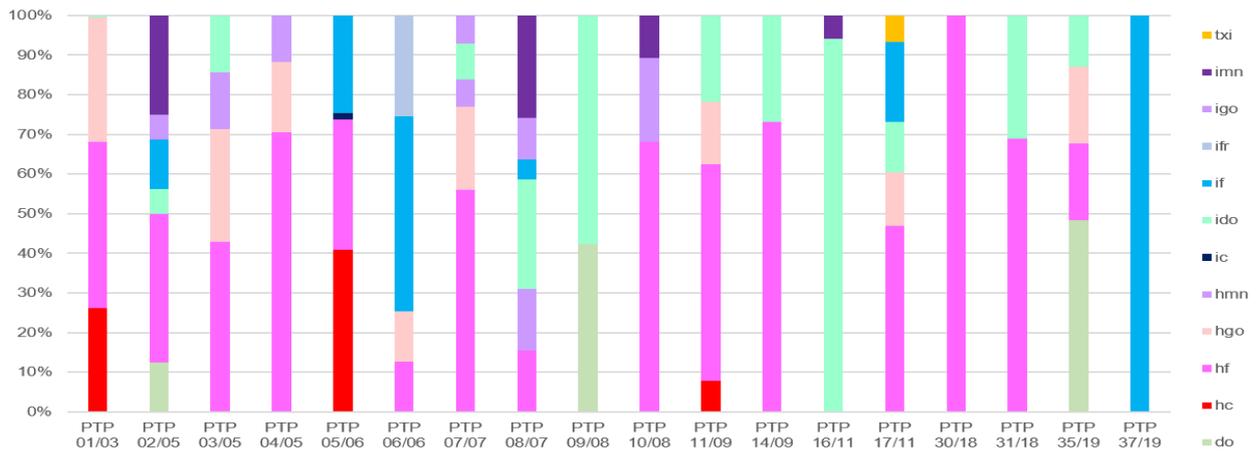


Figura 3.3 - Gráfico de barras com proporção de litotipos presentes na seção filtrante (classificação segundo a Chave utilizada pela VALE). Txi - talco xisto; imn - itabirito manganêsífero; igo - itabirito goetítico; ifr - itabirito friável rico; IF - itabirito friável; ido - itabirito dolomítico; ic - itabirito compacto; hmn - hematita manganêsífera; 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 interseptado, o que é possível notar no gráfico de correlação de Pearson (Figura 3.4). A transmissividade apresenta relação muito forte com a condutividade hidráulica (K) uma vez que é a relação dela com a espessura saturada do aquífero.

Após a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos a partir dos dados de testes de bombeamento, os valores são avaliados para verificação de sua coerência com relação aos meios reais. 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 itabilitos). 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.

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.

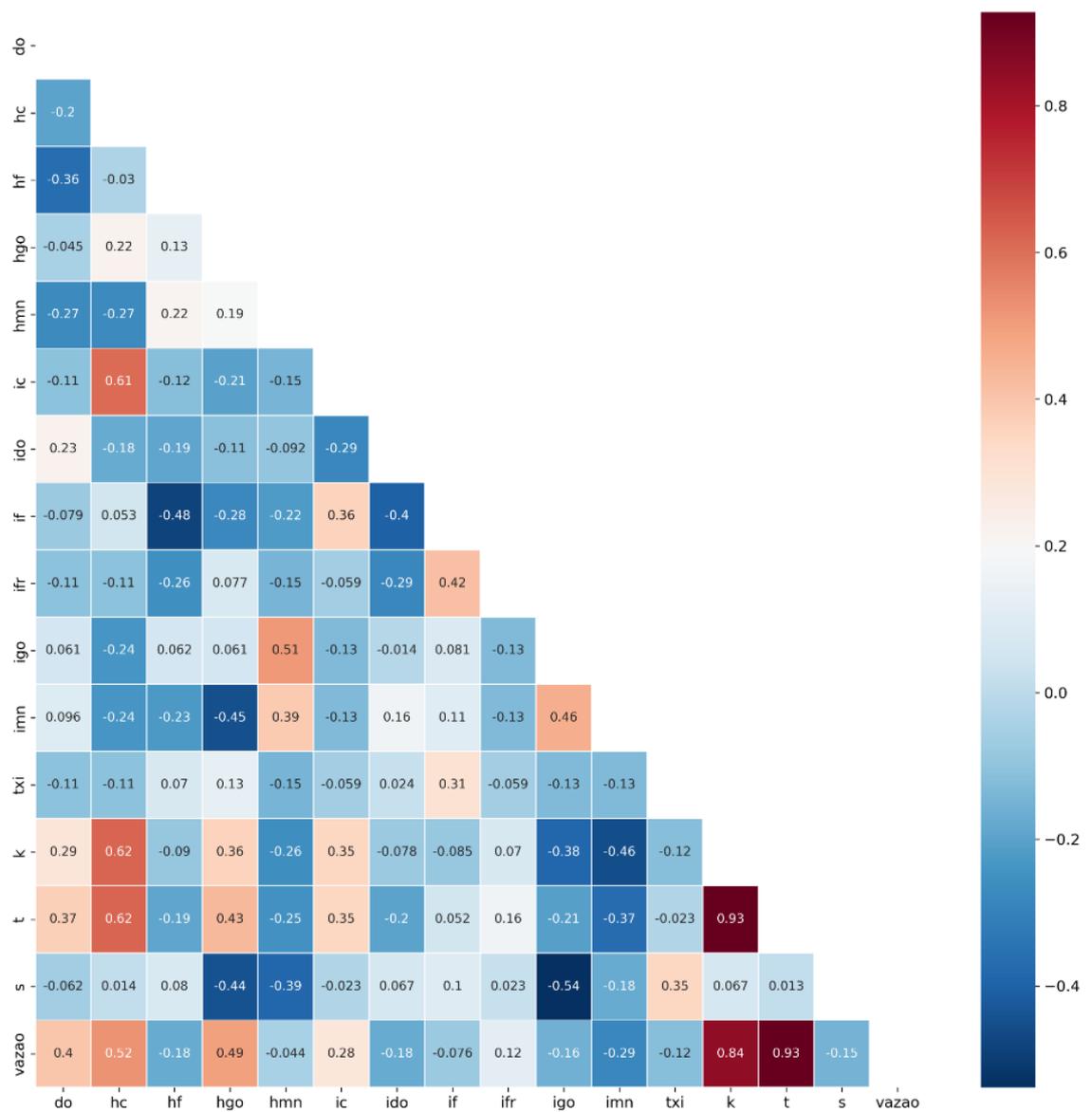


Figura 3.4 - Gráfico de correlação de Pearson entre litotipos, parâmetros hidrodinâmicos e vazão.

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 3.5).

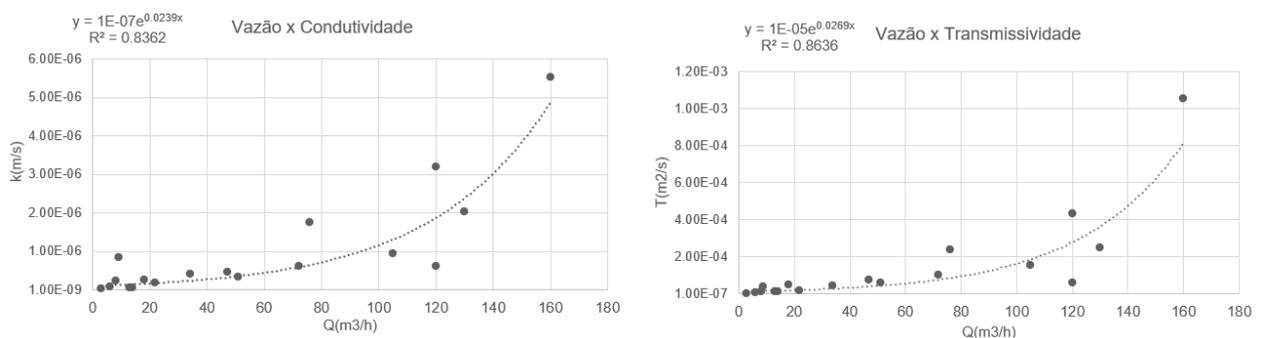


Figura 3.5 - Gráfico exponencial de correlação entre vazão x condutividade e vazão x transmissividade.

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 mediante 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, pois são mais significativas do que para hematitas friáveis, nas quais em função da elevada porosidade e permeabilidade, seriam esperadas maiores correlações. Nesta linha, a elevada vazão do poço 9 (Figura 3.6), 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 3.3 e serve como referência para interpretação dos parâmetros hidráulicos.

Tabela 3.3 - Sumário estatístico dos parâmetros hidráulicos.

Número de análises	K (m/s)				T (m ² /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 3.4 representa os parâmetros hidráulicos obtidos por meio da interpretação dos ensaios de bombeamento realizados.

Em linhas gerais a maior parte dos dados se bem ajustados para as 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).

De modo que 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 3.6).

Tabela 3.4 - Sumário dos parâmetros hidráulicos e descrição dos poços analisados.

Poço	Comprimento	Seção Filtrante	Espessura do aquífero considerada	Capacidade Inicial (m3/h)	Diâmetro	Ano perfuração	Situação	Cota original	K(m/s)	T(m2/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

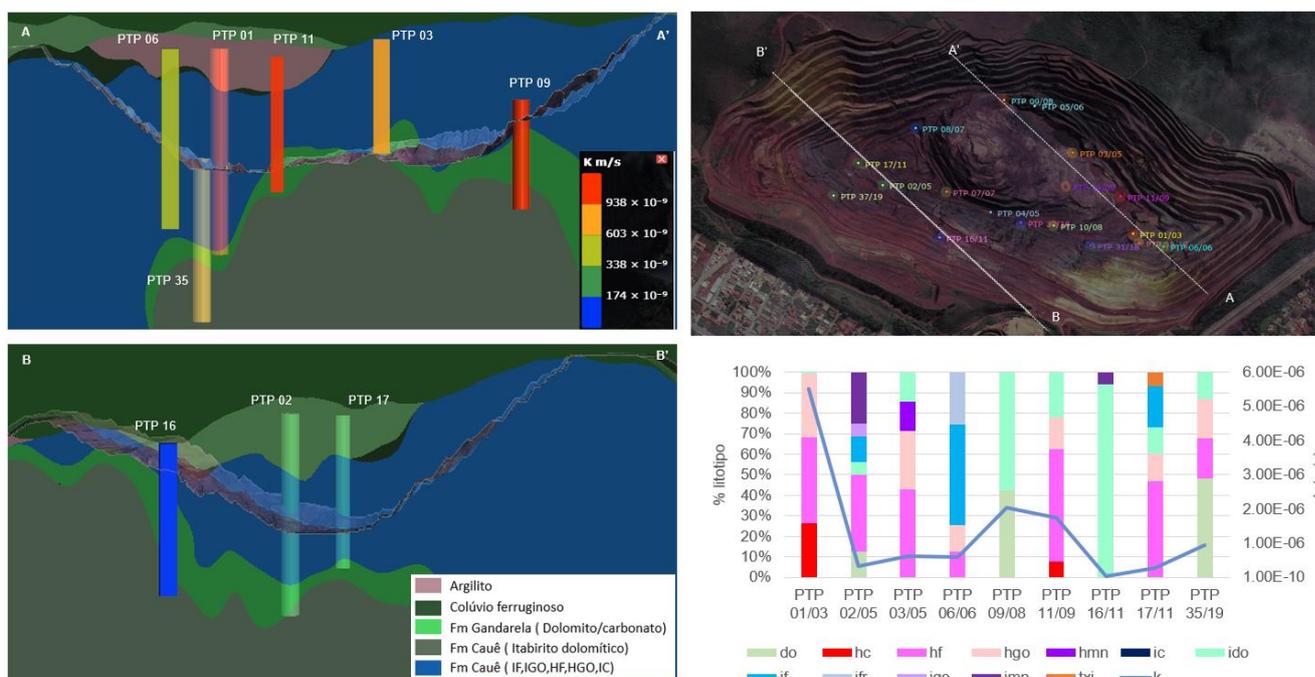


Figura 3.6 - Relações entre seção geológica e condutividade hidráulica dos poços.

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 manganésíferos (variações tipológicas de itabiritos).

3.2 Dados Hidroquímicos e Hidrológicos

Nesta etapa, serão discutidas as relações estatísticas das variações de vazão observadas, alinhadas aos gráficos de correlação Pearson. Os tópicos estão divididos por sub-bacia de interesse. Dentre as sub-bacias que compõem a região de estudo, apenas a do Ribeirão Catarina contribui para a bacia do Rio Paraopeba, enquanto as demais contribuem para o Rio das Velhas (Figura 3.7). O conjunto de dados foi separado entre 2003 e 2011 e de 2012 até 2020, salvo em alguns casos cuja base de dados não fornecia dados suficientes para escala de análise.

Com intuito de compreender relações de vazão dos córregos, foram elaborados histogramas de distribuição, com breve sumário estatístico e gráficos de correlação de Pearson, os quais configuram uma das etapas da discussão entre as possíveis causas de variação. Neste sentido foram elaboradas tabelas comparativas com a diferença de vazão (Q em l/s) entre os ciclos de análise. Os gráficos de Pearson foram adotados, pois constituem relevante medida linear para correlação multivariável (Samuels, 2014). Neste aspecto, a discussão também levará em conta o papel das coberturas e litologias presentes nas bacias de contribuição.

Os parâmetros hidroquímicos analisados foram escolhidos em função de constituírem as análises predominantes das bases existentes e com menor lacuna temporal. Neste banco de dados são incluídos: ph, condutividade elétrica, alcalinidade total, bicarbonatos, magnésio total, cloretos, sulfatos, potássio total, sódio total e cálcio total.

Por se tratarem em geral de águas com baixa mineralização, ocorrem grandes erros percentuais no balanço iônico, de modo que pequenas variações podem influenciar os tipos químicos das águas. Contudo, apenas os resultados analíticos com erros menores que 10% foram utilizados no tratamento estatístico.

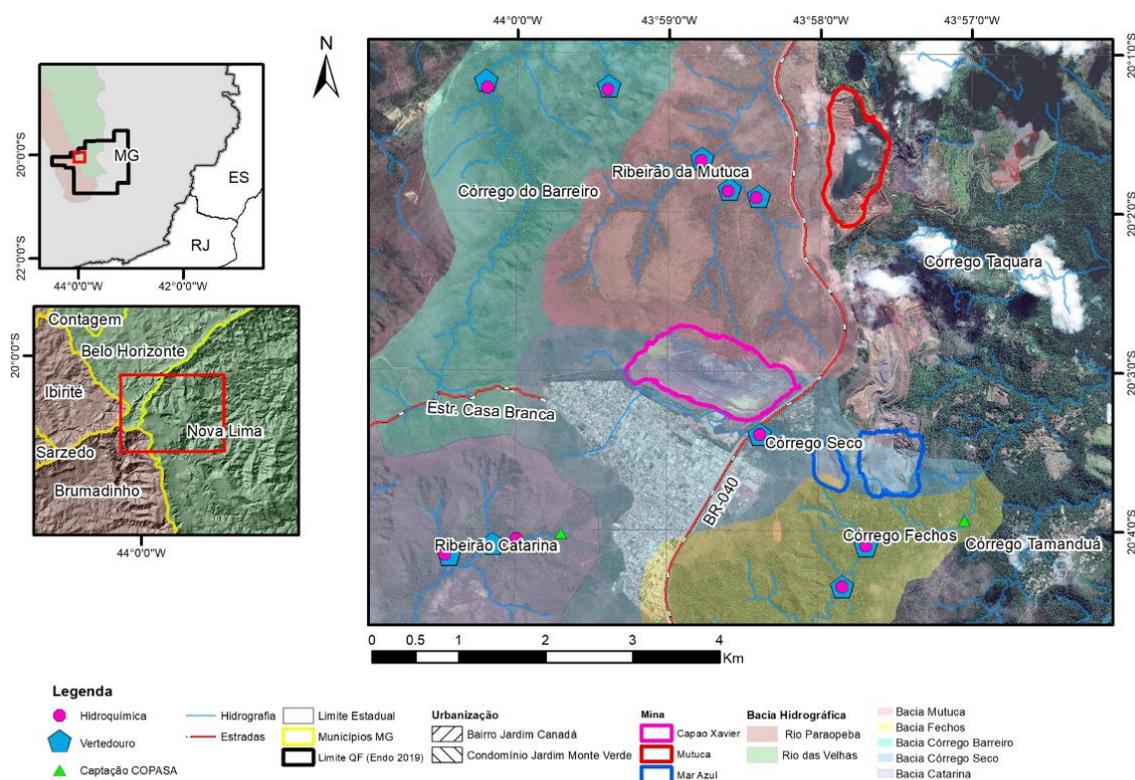


Figura 3.7 - Localização da rede hidrológica utilizada e localização de coleta de amostras para geração dos dados hidroquímicos.

Para comparação entre dados hidroquímicos e vazão foram utilizadas as vazões referentes aos meses de aquisição do dado hidroquímico. Para escolha dos meses de correlação química foram utilizados os meses de outubro para 2009, 2010, 2011 e 2012, pois na base existente existiam lacunas de informações geoquímicas para setembro nestes anos. Neste sentido, as correlações entre variáveis foram possíveis, visto que a maioria dos pontos de coleta coincidem com os pontos de medição de vazão. Para análise e interpretação dos dados de vazão e hidroquímica foi considerada a redução dos volumes de precipitação, notória a partir de 2011 (Figura 3.8), cujo pluviômetro utilizado foi do tipo Ville de Paris no qual contam registros desde 1993.

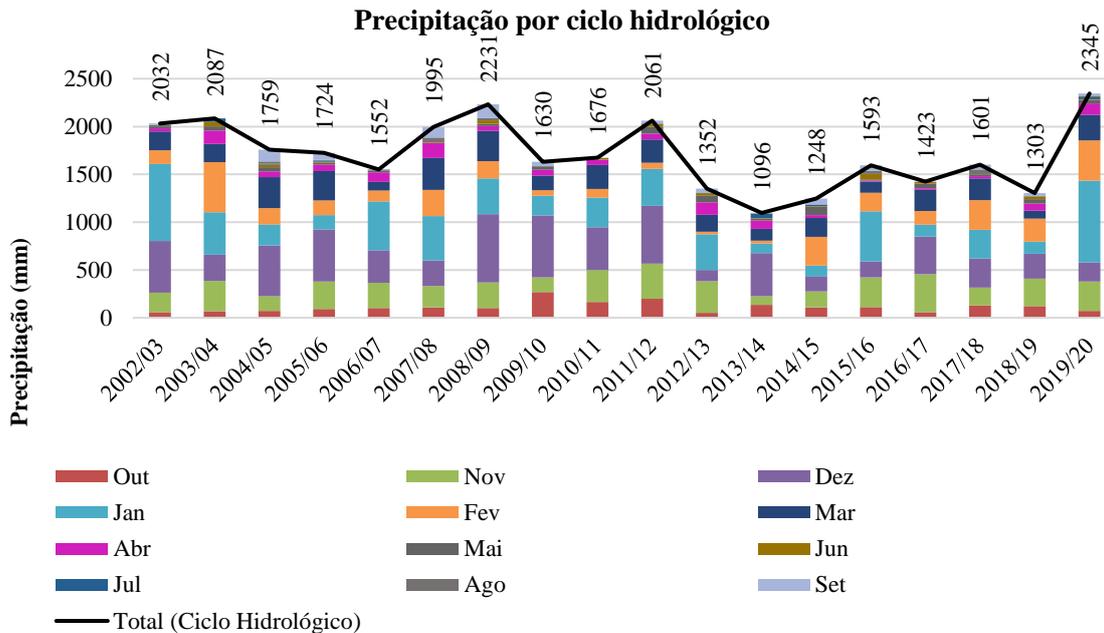


Figura 3.8 - Variação temporal da chuva anual acumulada entre os anos de 2003 e 2020.

Os histogramas e gráficos de Pearson foram construídos utilizando a plataforma Google Coolab em linguagem Python. As rotinas implantadas encontram-se nos anexos. Além das bibliotecas *pandas* e *numpy*, foi utilizada a biblioteca *Pygeostat* da Universidade de Alberta (CCG 2015). Um parâmetro importante que será discutido nas análises é o coeficiente de variação (CV), que é calculado segundo a fórmula:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu}$$

Onde: σ representa o desvio padrão e μ a média da população.

O CV é um parâmetro interessante de dispersão, pois representa a variação dos dados em função da média, de modo que permite a comparação mais adequada entre diferentes ordens de grandeza. Para análise da variação das vazões, foram considerados todos os dados adquiridos nas rotinas de medição da VALE entre 2003 e 2020, cujo tipo do ponto de monitoramento e escala temporal, encontram-se descritos na Tabela 3.5. Para os dados hidroquímicos, a relação de parâmetros analisados por sub-bacia de contribuição e resolução temporal estão representados na Tabela 3.6. Por se tratarem em geral de águas com baixa mineralização, foram observados grandes percentuais no balanço iônico (acima de 12%).

Tabela 3.5 - Relação dos instrumentos compartimentados por sub-bacia para medição de vazão, e escala temporal de aquisição dos dados.

Bacia	Instrumento	Escala Temporal	nº de dados	Elementos aquisição
Fechos	Fechos Auxiliar VTD 29/94	2003-2020	211	Vertedor triangular, 90°
	Surgência Cárstica	2009-2020	43	Flowtracker
Seco	Córrego Seco VTD 08/96	2003-2009	64	Vertedor trapezoidal
Catarina	Catarina Auxiliar VTD 04/94	2003-2020	204	Vertedor trapezoidal
	Catarina VTD 30/09	2009-2020	129	Vertedor trapezoidal
Barreiro	Barreiro VTD 07/96	2003-2020	202	Vertedor trapezoidal
	Barreiro VTD 25/98	2003-2020	209	Vertedor trapezoidal
Mutuca	Mutuca VTD 01/94	2003-2020	208	Vertedor trapezoidal
	Mutuca VTD 02/94	2003-2020	209	Vertedor trapezoidal
	Mutuca VTD 03/94	2003-2020	204	Vertedor trapezoidal

Tabela 3.6 - Relação de parâmetros hidroquímicos analisados por sub-bacia de contribuição e resolução temporal.

Bacia	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO3)	Bicarbonatos (mg/L HCO3-)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)	
Fechos Auxiliar VTD 29/94												
Fechos	nº dados	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	
	Escala temporal	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	
Fechos Surgência Cárstica												
Fechos	nº dados	6	6	6	6	5	5	5	5	5	4	
	Escala temporal	2003-2010	2003-2010	2003-2010	2003-2010	2003-2010	2003-2010	2003-2010	2003-2010	2003-2010	2003-2010	
Córrego Seco VTD 08/96												
Seco	nº dados	18	18	18	17	15	15	15	15	15	15	
	Escala temporal	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	
Catarina Auxiliar VTD 04/94												
Catarina	nº dados	18	18	18	18	17	18	18	18	18	18	
	Escala temporal	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	
Catarina Principal												
Catarina	nº dados	18	18	18	18	17	18	18	18	18	18	
	Escala temporal	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	
Barreiro VTD 07/96												
Barreiro	nº dados	18	18	18	18	18	17	18	18	18	18	
	Escala temporal	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	
Barreiro VTD 25/98												
Barreiro	nº dados	18	18	18	18	16	18	18	18	18	18	
	Escala temporal	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	
Mutuca VTD 01/94												
Mutuca	nº dados	18.0	18.0	17.0	15.0	14.0	17.0	18.0	18.0	18.0	18.0	
	Escala temporal	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	
Mutuca VTD 02/94												
Mutuca	nº dados	18	18	18	18	18	17	16	18	18	18	
	Escala temporal	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	
Mutuca VTD 03/94												
Mutuca	nº dados	18	18	18	18	18	17	17	18	18	18	
	Escala temporal	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	2003-2020	

3.2.1 Ribeirão Fechos e Córrego Seco

A sub-bacia do Ribeirão Fechos encontra-se à sudeste da cava de Capão Xavier, e ocorre restrita à margem leste da BR-040, enquanto a sub-bacia do Córrego Seco ocorre à sul da cava e verte para o Ribeirão Fechos, passando por baixo da rodovia. A zona de contribuição principal para as sub-bacias engloba principalmente rochas das formações Cauê e Gandarela, com itabiritos e suas variações saprolitizadas, carbonatos, e breve passagem por filitos da Formação Batatal e quartzitos da Formação Moeda (Figura 3.9). Os vertedouros e pontos de amostragem coincidem, são eles: VTD 28/94 (Cota de 1105m), e surgência (Cota de 1200m), para o Ribeirão Fechos, e VTD08/96 (Cota de 1326m) para o Córrego Seco.

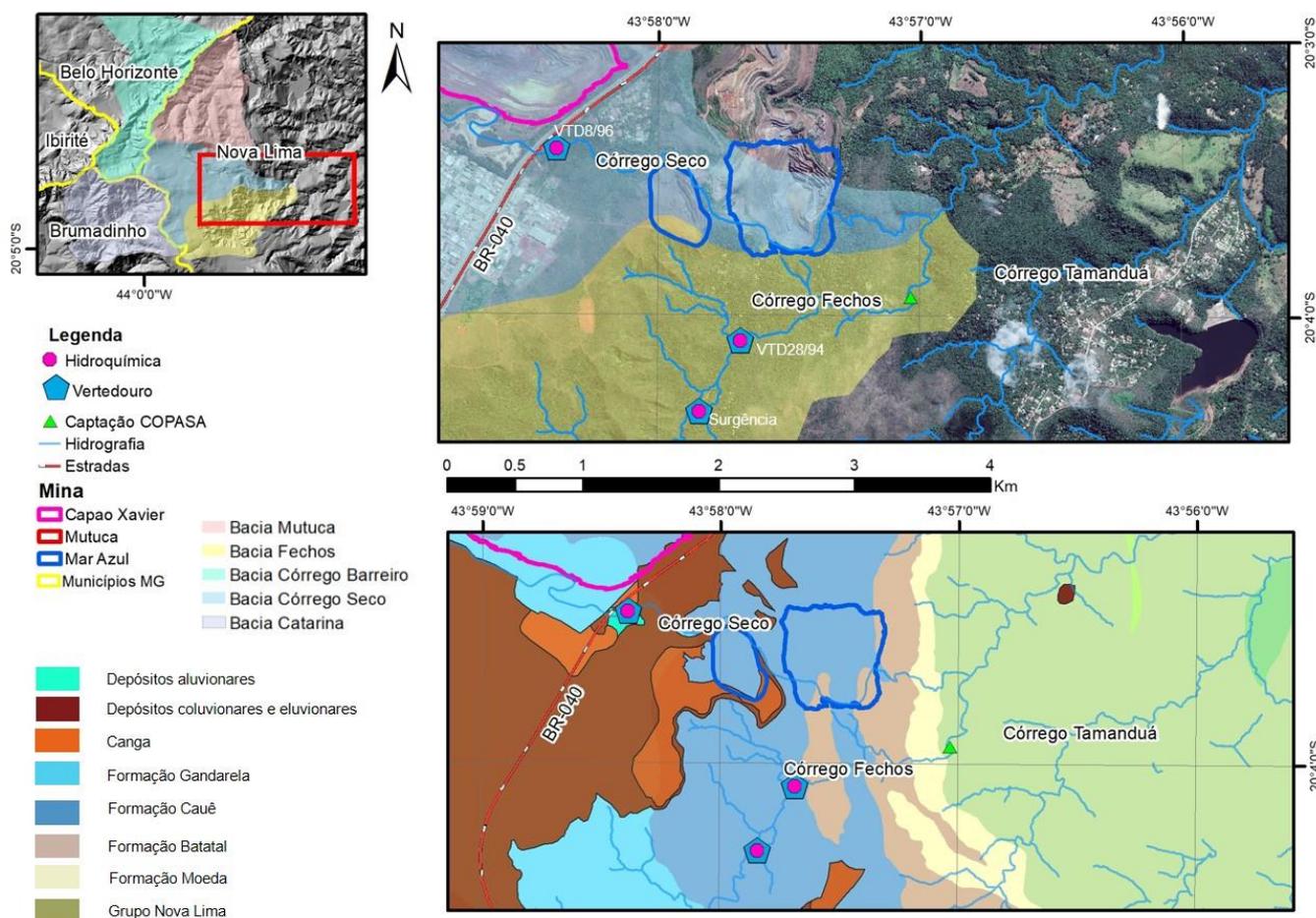


Figura 3.9 - Localização das sub-bacias Fechos e Córrego Seco, com litologia associada e rede de monitoramento utilizada.

Para o Ribeirão Fechos nota-se que ocorreu redução das vazões, médias, máximas e mínimas para o vertedor e surgência (Tabela 3.7). Tal efeito pode ter relação mais expressiva com as atividades de rebaixamento das cavas de Mar Azul e Capão Xavier.

Tabela 3.7 - Sumário da diferença entre as vazões (l/s) para os pontos de monitoramento no Ribeirão Fechos e intervalos analisados.

ΔQ Ciclo (2003/2011 - 2012/2020)	ΔQ (VTD 28/94)	ΔQ (Surgência)
Média	23.71	14.44
Mediana	26.06	3.80
Mínima	20.69	26.2
Máxima	29	10.05

A estatística descritiva para os vertedores analisados encontra-se na Figura 3.10. O maior coeficiente de variação ocorre notoriamente para o Córrego Seco o qual possui aspecto intermitente, e o menor para a Surgência, que apesar de estar inserida no domínio superficial de itabirites silicosos, representa condições de circulação de águas oriundas de carbonatos, condição corroborada a partir da análise dos parâmetros hidroquímicos. Para o vertedouro V08/96, em

função de condições insalubres para leitura das vazões, as medições foram interrompidas no ano de 2009.

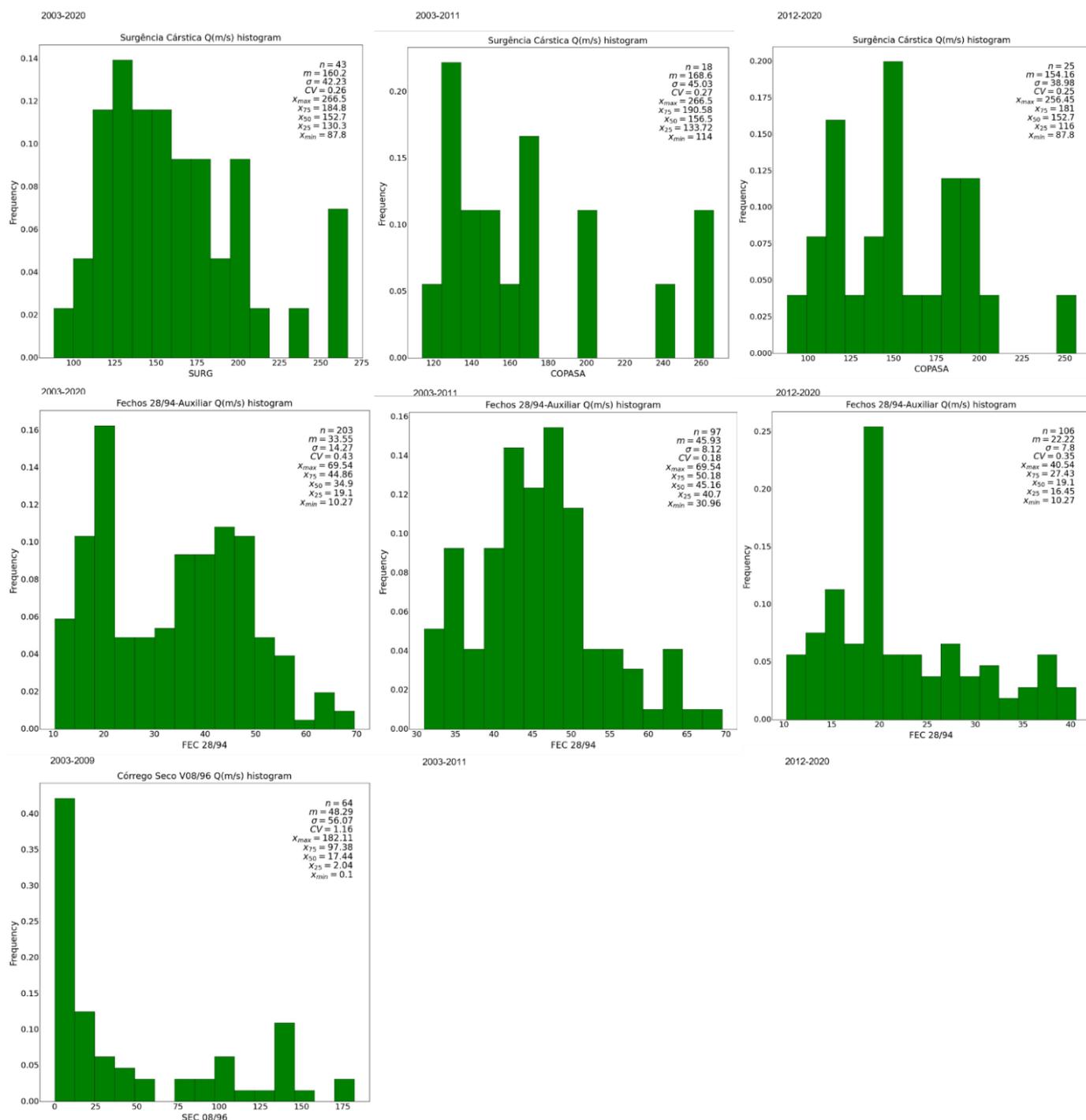


Figura 3.10 - Estatística descritiva dos dados de vazão dos pontos de monitoramento analisados para o Ribeirão Fechos e Córrego Seco, com indicativo dos períodos analisados no canto superior esquerdo do gráfico referente.

Surgência Cárstica: Para este ponto de análise, o monitoramento hidroquímico foi interrompido em 2010, devido às condições de acesso inadequadas. O valor médio de pH acima de 8 e valores médios de alcalinidade total e bicarbonatos acima de 50 mg/L, indicam composição básica cuja condições de circulação corroboram o fluxo no meio carbonático. As

relações dos parâmetros hidroquímicos para o ponto de monitoramento encontram-se disponíveis na Tabela 3.8 e não indicam grandes variações composicionais entre os diferentes períodos.

Tabela 3.8 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para Surgência Cárstica em Fechos.

Fechos Surgência Cárstica												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	2.0	6.0	6.0	6.0	6.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	4.0
mean	135.4	108.0	8.1	68.3	50.2	51.9	3.4	0.4	1.3	0.3	0.3	10.5
std	15.1	101.9	0.9	25.7	6.7	9.6	0.5	0.2	0.6	0.1	0.1	3.7
min	124.7	0.0	6.6	20.0	41.1	37.1	2.9	0.3	0.5	0.1	0.2	5.1
25%	130.0	28.0	7.9	65.6	48.7	47.7	3.2	0.3	1.0	0.2	0.2	10.0
50%	135.4	99.0	8.2	74.5	49.4	55.8	3.5	0.3	1.0	0.3	0.3	12.0
75%	140.7	156.5	8.5	83.9	50.8	59.4	3.7	0.5	1.8	0.4	0.3	12.6
max	146.0	270.0	9.3	91.3	61.9	59.8	4.0	0.8	2.0	0.4	0.5	12.8

VTD 28/94: A relação dos parâmetros hidroquímicos para o VTD 28/94 encontra-se disponível na Tabela 3.9. Suas águas, apresentam valores de pH neutros, e sem expressiva variação dentre os ciclos. Apesar deste efeito, a redução das vazões resulta em maiores valores de condutividade, alcalinidade e cátions.

Tabela 3.9 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD28/94 em Fechos.

Fechos auxiliar VTD 28/94												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	17.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
mean	31.0	72.1	7.1	13.5	10.6	5.4	0.4	0.6	1.7	0.2	0.7	0.7
std	13.0	75.3	0.3	10.6	8.4	3.4	0.1	0.3	2.0	0.2	0.8	0.8
min	11.7	0.0	6.4	5.7	2.5	2.0	0.1	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0
25%	19.1	15.5	6.9	6.5	5.0	3.7	0.3	0.5	0.5	0.1	0.3	0.2
50%	31.3	51.5	7.1	9.7	6.0	3.8	0.4	0.5	1.0	0.2	0.5	0.5
75%	41.0	102.3	7.3	14.4	17.8	6.0	0.5	0.8	1.4	0.2	0.7	0.6
max	52.6	270.0	7.7	42.0	28.1	16.9	0.5	1.7	7.5	0.5	3.3	3.3
2003-2011												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
mean	42.1	107.0	6.9	7.5	8.3	5.7	0.3	0.7	1.7	0.2	0.3	0.5
std	6.9	94.0	0.4	2.0	8.7	4.4	0.2	0.5	2.2	0.1	0.2	0.4
min	31.3	0.0	6.4	5.7	2.5	2.0	0.1	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0
25%	39.4	13.0	6.6	5.9	3.2	3.4	0.3	0.3	1.0	0.1	0.1	0.2
50%	41.9	112.0	6.9	7.0	5.0	5.0	0.4	0.5	1.0	0.2	0.3	0.5
75%	45.8	167.0	7.2	8.0	6.0	5.8	0.5	1.0	1.0	0.2	0.5	0.6
max	52.6	270.0	7.3	11.0	28.1	16.9	0.5	1.7	7.5	0.5	0.5	1.2
2012-2020												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
mean	21.2	37.2	7.2	19.6	12.9	5.1	0.4	0.6	1.7	0.2	1.1	0.9
std	7.9	22.2	0.2	12.2	8.0	2.3	0.1	0.1	1.9	0.2	1.0	1.0
min	11.7	4.0	7.0	6.3	6.0	3.7	0.2	0.5	0.5	0.0	0.3	0.2
25%	16.6	23.0	7.1	12.5	6.0	3.7	0.3	0.5	0.5	0.1	0.4	0.3
50%	19.1	47.0	7.1	14.9	10.0	3.7	0.4	0.5	0.5	0.2	0.7	0.5
75%	23.8	52.0	7.3	21.3	18.0	6.0	0.5	0.8	1.5	0.3	1.5	0.7
max	37.6	64.0	7.7	42.0	28.1	9.8	0.5	0.8	5.0	0.5	3.3	3.3

Seco VTD 08/96: Os parâmetros hidroquímicos para o VTD 08/96 encontram-se disponíveis na Tabela 3.10. Em função de receber efluente do bairro Jardim Canadá, possui os maiores valores de alcalinidade total, bicarbonatos, magnésio, cloretos, sulfatos, potássio, sódio e cálcio dentre

os pontos observados neste estudo. A relação elevada de cátions e ânions destoa das possíveis contribuições dos aquíferos locais e corroboram a contaminação. Apresenta valores de pH neutros sem expressiva variação dentre os ciclos.

Tabela 3.10 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD08/96 associado ao Córrego Seco.

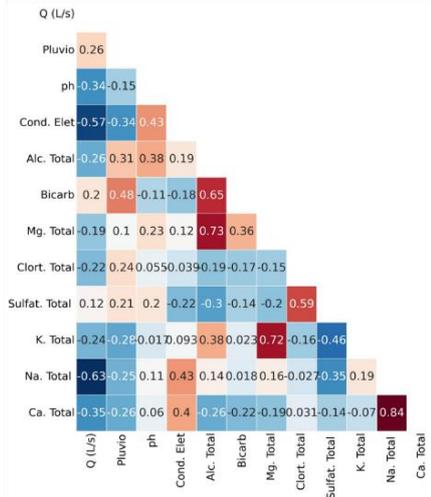
Córrego Seco VTD 08/96												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	6.0	18.0	18.0	18.0	17.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
mean	83.0	131.1	6.9	319.2	96.4	61.4	1.5	9.4	9.0	5.8	17.0	8.4
std	47.7	119.9	1.5	540.7	147.3	91.4	1.8	18.9	16.0	10.3	32.9	5.8
min	16.7	4.0	1.2	13.9	6.0	3.7	0.1	0.3	0.5	0.1	0.1	0.7
25%	50.7	47.5	6.9	41.3	16.2	9.6	0.4	0.6	1.8	0.4	0.6	3.1
50%	97.8	60.0	7.3	67.5	31.0	20.0	0.6	1.0	3.0	0.8	1.4	8.0
75%	103.9	239.3	7.6	299.8	60.0	37.5	2.0	2.6	5.2	2.6	3.3	12.8
max	144.8	333.0	8.2	2049.0	414.0	245.0	6.8	63.0	59.0	28.0	87.0	19.0
2003 ate 2009												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	6.0	7.0	7.0	7.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
mean	83.0	223.9	7.1	45.2	24.9	16.5	0.4	0.8	1.9	0.7	1.4	5.2
std	47.7	116.2	0.5	32.8	17.4	7.4	0.2	0.3	0.7	0.3	0.2	3.1
min	16.7	49.0	6.6	13.9	9.1	8.1	0.1	0.3	1.0	0.2	1.1	1.6
25%	50.7	140.0	6.7	24.9	11.5	11.4	0.3	0.8	1.3	0.5	1.2	2.8
50%	97.8	273.0	6.9	42.0	22.6	15.9	0.4	0.9	1.8	0.7	1.4	5.0
75%	103.9	316.0	7.6	49.0	29.8	20.0	0.5	1.0	2.3	0.9	1.5	7.5
max	144.8	333.0	7.9	113.0	55.2	28.0	0.7	1.0	2.8	1.1	1.6	9.2
2010 ate 2020												
index	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)	
count	11.0	11.0	11.0	11.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	
mean	72.0	6.8	493.5	135.4	91.4	2.2	15.2	13.8	9.2	27.4	10.6	
std	80.5	1.9	640.6	172.7	109.8	2.1	23.0	19.5	12.4	39.9	6.4	
min	4.0	1.2	39.0	6.0	3.7	0.1	0.5	0.5	0.1	0.1	0.7	
25%	28.0	7.0	67.5	30.2	5.0	0.6	0.5	3.6	0.3	0.3	6.2	
50%	51.0	7.3	128.0	33.3	31.0	1.8	2.0	5.0	2.0	0.7	12.0	
75%	60.0	7.5	736.7	238.0	231.8	3.2	24.0	10.0	24.0	67.0	14.0	
max	250.0	8.2	2049.0	414.0	245.0	6.8	63.0	59.0	28.0	87.0	19.0	

As matrizes de correlação de Pearson entre as variáveis das de Fechos e Córrego Seco, são apresentadas na Figura 3.11. Entre os valores de pluviometria, vazão, pH e condutividade elétrica para a Surgência Cárstica há correlação direta com $p < 1$, porém tais dados possuem fraco suporte relativo à descarga líquida, uma vez que apenas foram comparadas duas medições de vazão para o período. Contudo, as demais correlações consideradas geogênicas são coerentes com o meio estudado: correlações fortes entre pH e condutividade elétrica, bicarbonato e condutividade elétrica, cálcio e condutividade elétrica, além de magnésio e bicarbonato são típicas da interação de águas subterrâneas com meios carbonáticos.

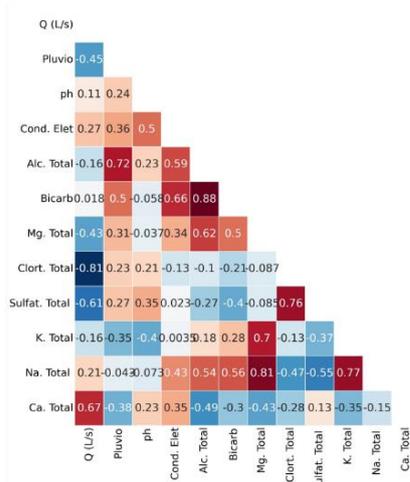
Para o Córrego Seco a correlação entre cátions e ânions é forte com valores acima de 0.6, cuja relação muito provavelmente se relaciona aos efeitos da contaminação. Neste caso o cloreto e sódio são indicadores de contaminação doméstica, que devem se elevar concomitantemente ao nitrato (Não considerado neste estudo). O sulfato deve ter origem provável em detergentes.

Fechos auxiliar VTD 28/94

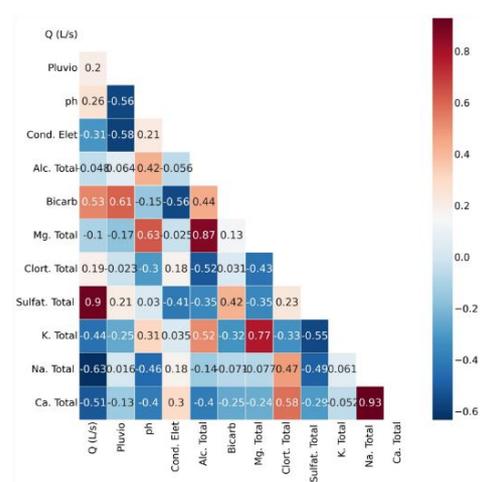
2003-2020



2003-2011

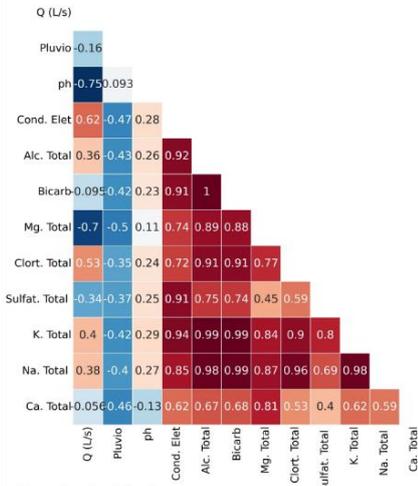


2012-2020

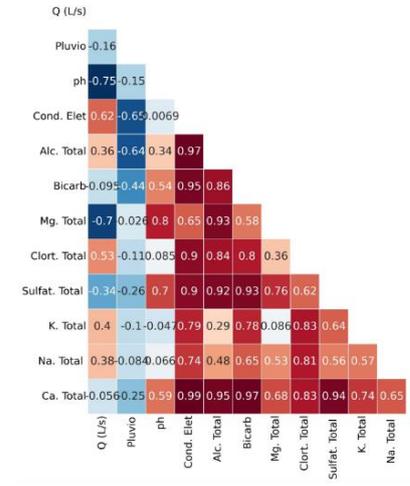


Córrego Seco VTD 08/96

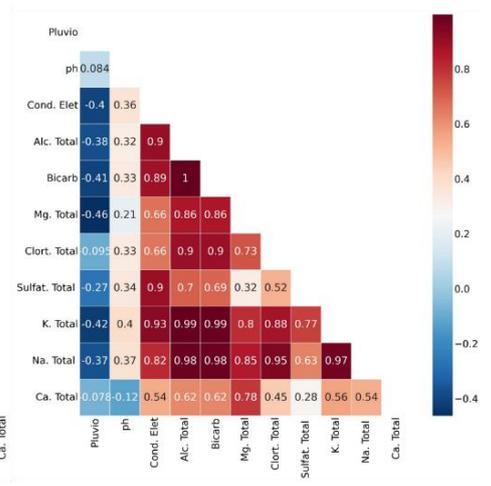
2003-2020



2003-2009



2010-2020



Surgência Cársica

2003-2010

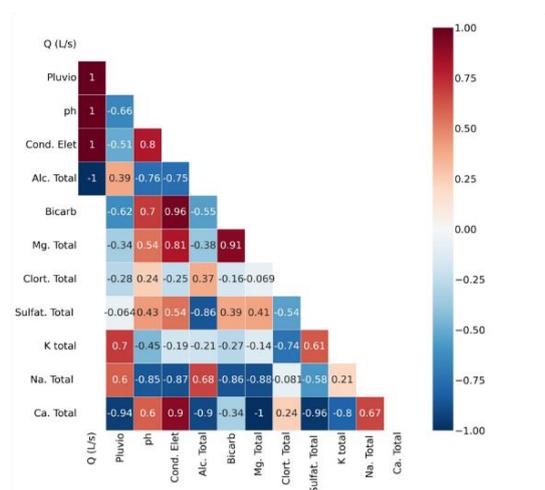


Figura 3.11 - Síntese de valores de correlação Pearson entre os parâmetros analisados para os pontos de monitoramento no Córrego Seco e Fechos.

3.2.2 Ribeirão Catarina

A sub-bacia do Ribeirão Catarina encontra-se à sudoeste da cava de Capão Xavier, e ocorre restrita à margem oeste da BR-040. A zona de contribuição principal para as sub-bacias na região de estudo, engloba principalmente rochas das formações Cauê, com itabiritos e suas variações saprolitizadas, com restrita passagem por filitos da Formação Batatal e quartzitos da Formação Moeda (Figura 3.12). O vertedor VTD04/94 (Cota de 1152 m) coincide com o ponto de amostragem, já a amostragem do VTD30/94 (Cota de 1194 m) ocorre 200 metros a montante em uma barragem.

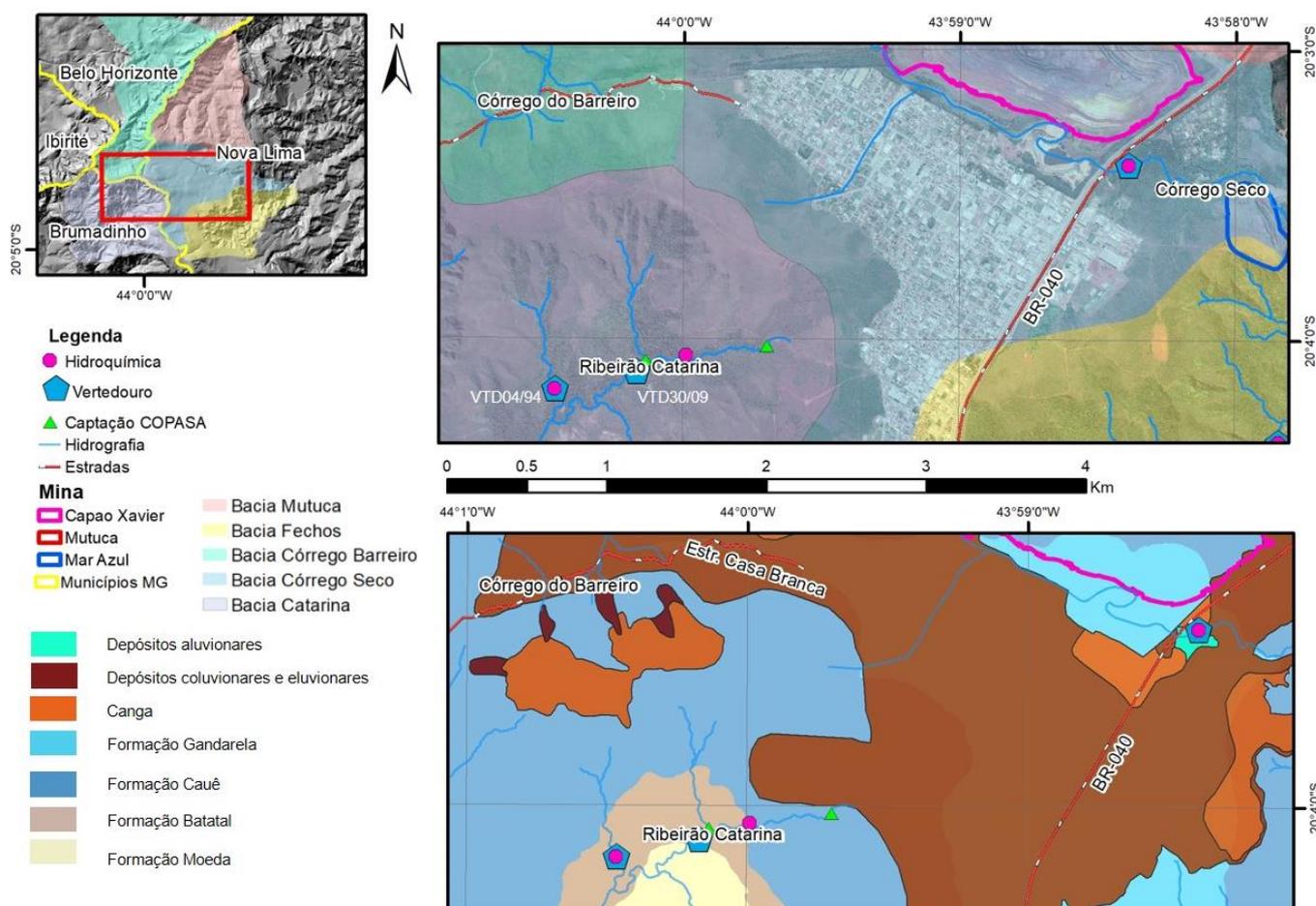


Figura 3.12 - Localização da sub-bacia Ribeirão Catarina com litologia associada e rede de monitoramento utilizada.

Para o Ribeirão Catarina, nota-se que ocorreu ligeira redução das vazões, médias, e mínimas, enquanto a vazão máxima apresentou ligeiro aumento (Tabela 3.11). Em função do ponto VTD30/09 ter sua construção em 2009, o suporte para o período anterior ao ano de 2011 é consideravelmente menor, o que implica em menor qualidade da análise comparativa mediante a diferença entre os parâmetros para os ciclos analisados.

Tabela 3.11 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para os vertedores 04/94 e 30/09 referentes ao Ribeirão Catarina.

ΔQ Ciclo (2003/2011 - 2012/2020)	ΔQ (VTD 04/94)	ΔQ (VTD 30/09)
Média	5.61	0.29
Mediana	5.58	1.93
Mínima	14.54	0.66
Máxima	-6.24	-1.55

A estatística descritiva para os vertedouros analisados é representada na Figura 3.12. Os dados para o VTD 04/94 apresentam baixo coeficiente de variação, e para o VTD 30/09 a variação pré- e pós- 2011 apresentam o mesmo padrão, o que já se esperaria em função de constituir medições a jusante do vertedouro na região de uma pequena barragem. A baixa variabilidade relativa para os pontos de observação pode ter relação com as mais expressivas coberturas coluvionares que recobrem a zona de contribuição à montante, as quais possivelmente contribuem para a regularização das vazões, uma vez que o perfil dos vertedouros se encontra em vale, e possui relevo intensamente dissecado (Figura 3.12).

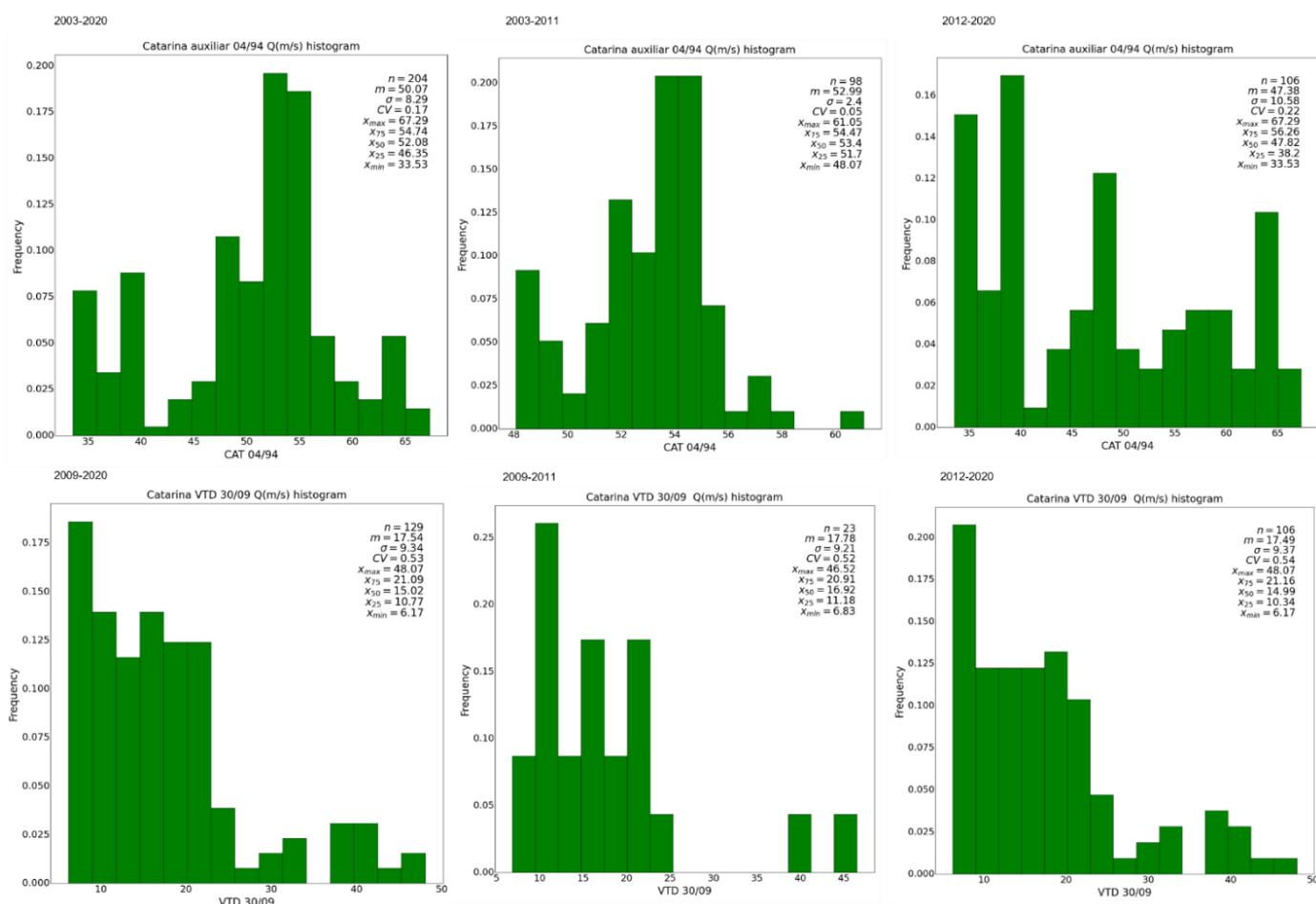


Figura 3.13 - Estatística descritiva dos dados de vazão para os pontos de monitoramento analisados no Ribeirão Catarina, com indicativo dos períodos analisados no canto superior esquerdo de cada gráfico.

Ribeirão Catarina auxiliar VTD 04/94: a relação dos parâmetros hidroquímicos para o VTD 04/94 são apresentadas na Tabela 3.12. No geral, notam-se valores de pH neutros sem expressiva variação dentre os ciclos. Adicionalmente a concentração de cátions e ânions também é baixa.

Ribeirão Catarina VTD 30/09: os parâmetros hidroquímicos referentes ao VTD 30/09 constam na Tabela 3.13. Apresenta valores de pH neutro sem expressiva variação dentre os ciclos. Embora apresente baixa mineralização, os valores são em geral maiores do que os observados no VTD04/94 situado ao norte. Tal diferença pode ter relação com a zona de coleta consistir em região de barragem, cujo tempo de residência e interação água rocha é maior quando comparado ao outro ponto de coleta, que é realizada próximo ao vertedouro do tipo trapezoidal.

Tabela 3.12 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD 04/94.

Catarina auxiliar VTD 04/94												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	17.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
mean	49.6	72.1	7.2	15.5	9.7	5.2	0.4	0.6	1.6	0.2	0.3	0.8
std	8.4	75.3	0.5	16.8	7.0	2.8	0.2	0.4	1.6	0.1	0.2	0.5
min	33.5	0.0	6.4	6.9	3.5	2.0	0.2	0.3	0.5	0.1	0.1	0.0
25%	48.1	15.5	6.9	8.3	5.0	3.7	0.4	0.5	0.5	0.1	0.1	0.5
50%	52.6	51.5	7.1	10.8	6.0	4.3	0.5	0.5	1.0	0.2	0.2	0.8
75%	54.3	102.3	7.6	12.8	16.0	5.2	0.5	0.5	1.4	0.2	0.5	1.0
max	64.4	270.0	7.9	79.6	24.0	13.8	0.9	2.0	5.0	0.5	0.9	2.4
2003-2011												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
mean	52.4	107.0	7.0	9.6	7.5	5.9	0.4	0.7	1.4	0.2	0.3	0.8
std	2.6	94.0	0.5	1.9	6.2	3.8	0.1	0.6	1.4	0.1	0.2	0.4
min	48.1	0.0	6.4	6.9	3.5	2.0	0.2	0.3	0.5	0.1	0.1	0.0
25%	51.8	13.0	6.6	8.1	4.2	3.9	0.2	0.3	1.0	0.1	0.2	0.5
50%	53.4	112.0	6.9	9.4	5.0	5.1	0.4	0.5	1.0	0.1	0.2	0.9
75%	53.9	167.0	7.3	11.0	9.0	6.1	0.5	1.0	1.0	0.2	0.5	1.0
max	54.9	270.0	7.7	12.0	23.0	13.8	0.6	2.0	5.0	0.5	0.5	1.1
2012-2020												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
mean	46.8	37.2	7.3	21.4	11.9	4.5	0.5	0.5	1.7	0.2	0.3	0.9
std	11.2	22.2	0.4	22.7	7.5	1.3	0.2	0.1	1.9	0.2	0.3	0.7
min	33.5	4.0	6.7	7.3	5.0	3.7	0.2	0.5	0.5	0.1	0.1	0.2
25%	38.2	23.0	7.0	10.3	6.0	3.7	0.5	0.5	0.5	0.1	0.1	0.5
50%	48.1	47.0	7.2	13.0	6.0	3.7	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.8
75%	56.1	52.0	7.8	23.7	18.0	5.0	0.5	0.5	1.5	0.2	0.5	1.1
max	64.4	64.0	7.9	79.6	24.0	7.3	0.9	0.9	5.0	0.5	0.9	2.4

Tabela 3.13 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD 30/09.

Catarina VTD 30/09												
index	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO3)	Bicarbonatos (mg/L HCO3-)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)	
count	18.0	18.0	18.0	18.0	17.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	
mean	72.1	6.8	19.5	12.5	7.4	0.7	0.9	2.3	0.2	0.4	1.4	
std	75.3	0.4	15.4	9.6	6.2	0.3	1.3	2.8	0.2	0.4	0.7	
min	0.0	6.0	6.9	6.0	2.0	0.1	0.3	0.5	0.0	0.1	0.2	
25%	15.5	6.5	14.1	7.0	3.7	0.5	0.5	0.5	0.1	0.1	1.0	
50%	51.5	6.9	16.0	8.8	4.2	0.7	0.5	1.0	0.2	0.5	1.5	
75%	102.3	7.2	17.0	16.5	9.8	0.8	0.8	3.3	0.4	0.5	1.7	
max	270.0	7.4	78.8	46.0	27.6	1.2	6.1	11.0	0.5	2.0	3.0	
2003-2011												
index	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO3)	Bicarbonatos (mg/L HCO3-)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)	
count	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	
mean	107.0	6.6	15.0	12.7	10.2	0.8	0.6	1.5	0.2	0.5	1.5	
std	94.0	0.5	4.1	12.6	7.9	0.3	0.4	1.4	0.2	0.6	0.7	
min	0.0	6.0	6.9	6.5	2.0	0.1	0.3	0.5	0.0	0.1	0.2	
25%	13.0	6.4	13.0	7.4	6.7	0.7	0.3	1.0	0.1	0.2	1.1	
50%	112.0	6.6	15.8	8.7	9.4	0.7	0.5	1.0	0.2	0.5	1.6	
75%	167.0	6.8	16.8	9.8	10.9	0.9	1.0	1.4	0.2	0.5	1.6	
max	270.0	7.4	22.0	46.0	27.6	1.2	1.3	5.0	0.5	2.0	2.4	
2012-2020												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade e elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO3)	Bicarbonatos (mg/L HCO3-)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
mean	14.6	37.2	7.0	24.1	12.3	4.8	0.6	1.2	3.0	0.2	0.4	1.4
std	5.9	22.2	0.3	20.9	6.0	2.7	0.2	1.9	3.6	0.2	0.3	0.8
min	7.1	4.0	6.4	13.0	6.0	3.7	0.4	0.5	0.5	0.0	0.1	0.6
25%	8.1	23.0	6.9	14.9	6.4	3.7	0.4	0.5	0.5	0.1	0.1	0.8
50%	17.9	47.0	7.1	16.8	12.0	3.8	0.5	0.5	0.5	0.2	0.5	1.2
75%	18.3	52.0	7.2	21.0	18.0	4.2	0.7	0.6	5.0	0.5	0.5	1.7
max	22.4	64.0	7.4	78.8	19.0	12.0	1.0	6.1	11.0	0.5	0.7	3.0

A correlação observada nas matrizes de correlação de Pearson entre as variáveis do Ribeirão Catarina, encontram-se na Figura 3.14. A correlação inversa entre o conteúdo de cátions e ânions em geral é esperada uma vez que o volume de água maior tende a reduzir a concentração dos elementos, embora a maior concentração de sulfatos possa estar relacionada com maior oxidação de sulfetos presentes em filitos da Formação Batatal, nos períodos de maior fluxo hidráulico. Também não se descarta a possibilidade de o sulfato ser de origem antropogênica, principalmente quando se avalia o conjunto de dados do segundo período de análise.

As mudanças de correlações entre os dois períodos de análise, que incluem inversão de correlação de positiva para negativa, e variações nos valores indicam que provavelmente há controle antropogênico nas variações. Caso o controle da distribuição e correlação entre as substâncias fosse geogênica ou pedogênica, não seriam esperadas mudanças críticas de correlação, mas apenas mudanças de concentrações em função das vazões do curso d'água.

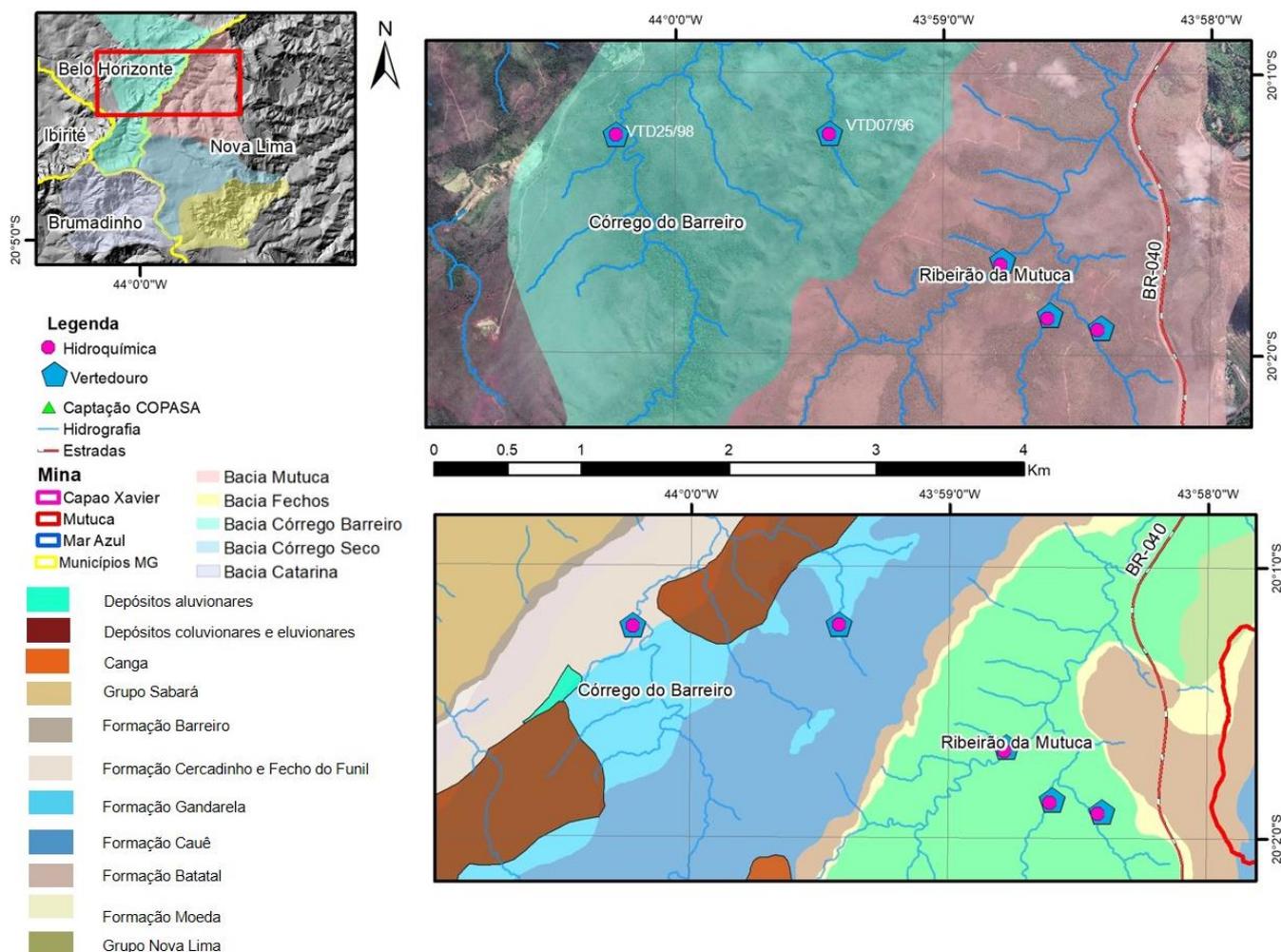


Figura 3.15 - Localização da sub-bacia Córrego do Barreiro com litologia associada e rede de monitoramento utilizada.

Para o Córrego do Barreiro, nota-se que ocorreu redução das vazões, médias, e mínimas, e a vazão máxima teve aumento sutil para o VTD 07/96 (Tabela 3.14)

Tabela 3.14 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para os vertedouros VTD 04/94 e VTD 30/09 referentes ao Ribeirão Catarina.

ΔQ Ciclo (2003/2011 - 2012/2020)	ΔQ (VTD 07/96)	ΔQ (VTD 25/98)
Média	7.86	28.94
Mediana	11.46	25.18
Mínima	10.01	20.7
Máxima	-4.93	0.87

Os dados apresentam menor coeficiente de variação pré 2012, cuja redução das vazões mínimas ocorre de maneira mais expressiva. O perfil de contribuição à montante é dissecado e não possui coberturas expressivas. É importante destacar que a região é isolada da região do Sinclinal Moeda por filitos da Formação Batatal (Figura 3.15).

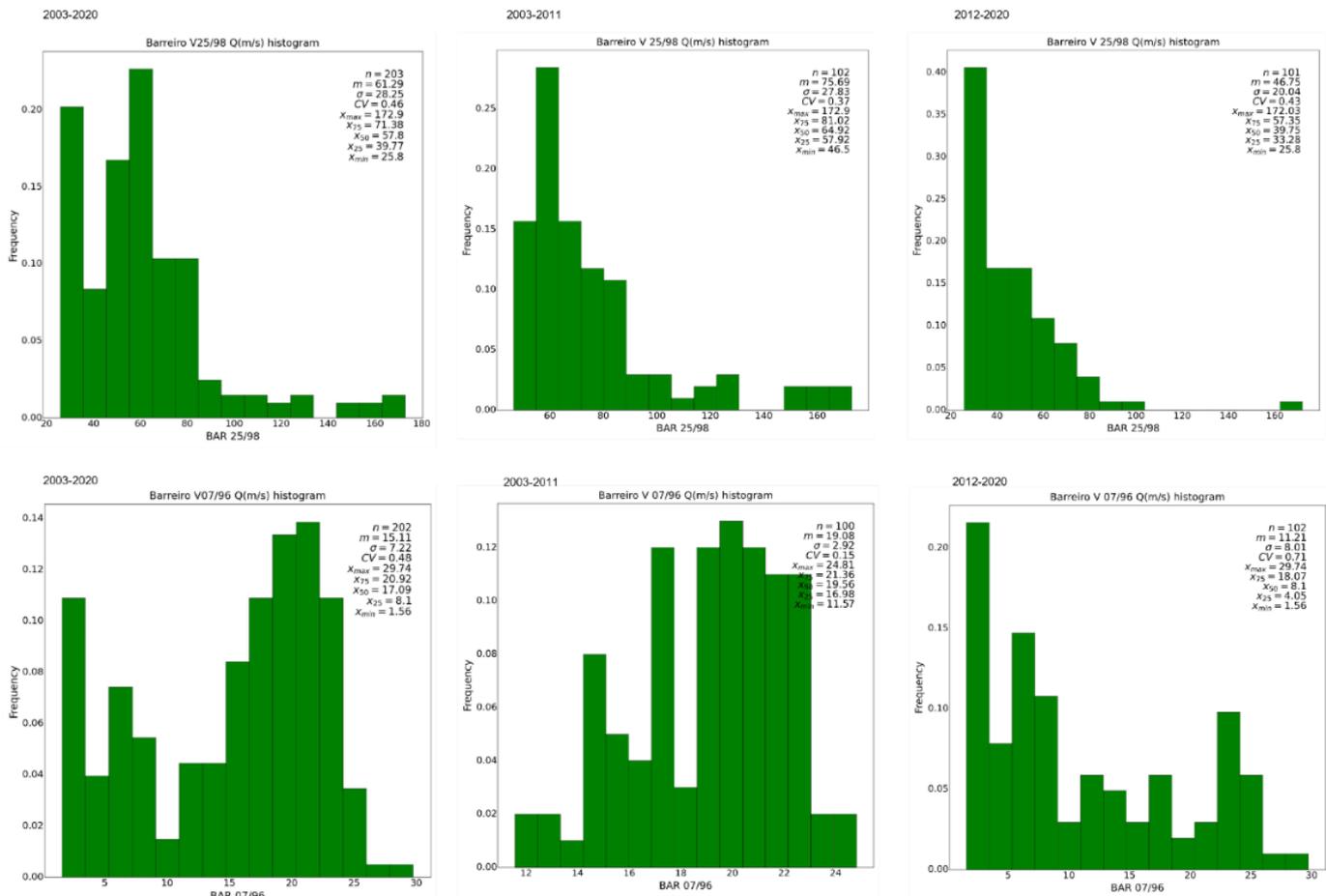


Figura 3.16 - Estatística descritiva dos dados de vazão para os pontos de monitoramento analisados para o Córrego Barreiro.

Barreiro VTD 25/98: a relação dos parâmetros hidroquímicos para o VTD 25/98 encontram-se disponíveis na Tabela 3.15. Apresenta valores de pH neutros e expressiva variação dentre os ciclos, com baixa mineralização.

Barreiro VTD 07/96: a relação dos parâmetros hidroquímicos para o VTD 07/96 encontram-se disponíveis na Tabela 3.16. Apresenta valores de pH ligeiramente menores do que o VTD 25/98, mas também figura com águas de baixa mineralização.

Os resultados analíticos obtidos nos dois pontos de coleta mostram conjuntos de águas naturais com restrita ou nenhuma contaminação por agentes externos. A composição química é em grande parte compatível com o contexto geológico e pedológico com o qual as águas mantêm contato.

Tabela 3.15 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD 25/98.

Barreiro VTD 25/98												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO3)	Bicarbonatos (mg/L HCO3-)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	16.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
mean	47.6	72.1	7.3	23.1	14.4	8.5	1.0	0.7	1.6	0.2	0.5	2.0
std	13.3	75.3	0.4	16.7	6.8	4.4	0.4	0.4	1.6	0.2	0.4	0.5
min	25.8	0.0	6.4	11.0	6.0	3.0	0.2	0.3	0.5	0.1	0.1	0.7
25%	33.7	15.5	7.1	17.3	10.0	5.0	0.9	0.5	0.5	0.1	0.2	1.8
50%	52.3	51.5	7.3	19.0	11.5	8.0	1.0	0.5	1.0	0.2	0.5	2.1
75%	58.8	102.3	7.4	21.4	18.7	11.9	1.1	0.7	1.8	0.3	0.5	2.4
max	63.3	270.0	8.2	87.9	29.9	17.9	2.0	1.8	5.0	0.5	2.1	2.6
2003-2011												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO3)	Bicarbonatos (mg/L HCO3-)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	7.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
mean	56.6	107.0	7.3	18.7	13.2	10.8	1.1	0.7	1.4	0.2	0.4	1.9
std	4.6	94.0	0.5	4.1	6.5	5.3	0.4	0.5	1.4	0.1	0.2	0.5
min	49.1	0.0	6.4	11.0	9.4	3.0	0.7	0.3	0.5	0.1	0.1	0.9
25%	52.7	13.0	7.2	18.0	10.0	7.9	0.9	0.3	1.0	0.1	0.2	1.8
50%	57.2	112.0	7.3	18.8	11.0	11.8	1.0	0.5	1.0	0.2	0.5	2.0
75%	59.9	167.0	7.4	21.6	12.0	13.4	1.1	1.0	1.0	0.2	0.5	2.4
max	63.3	270.0	8.2	24.0	29.9	17.9	2.0	1.8	5.0	0.5	0.8	2.5
2012-2020												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO3)	Bicarbonatos (mg/L HCO3-)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
mean	38.5	37.2	7.3	27.5	15.6	6.7	0.9	0.7	1.8	0.2	0.6	2.0
std	13.0	22.2	0.4	23.0	7.4	2.6	0.3	0.3	1.9	0.2	0.6	0.5
min	25.8	4.0	6.6	17.0	6.0	3.7	0.2	0.5	0.5	0.1	0.1	0.7
25%	31.8	23.0	7.1	17.0	10.0	5.0	1.0	0.5	0.5	0.1	0.2	2.0
50%	33.3	47.0	7.3	19.2	13.0	5.2	1.0	0.5	0.5	0.2	0.5	2.1
75%	40.5	52.0	7.5	21.0	20.5	8.0	1.1	0.7	2.5	0.3	0.5	2.4
max	62.7	64.0	7.8	87.9	26.0	12.0	1.2	1.5	5.0	0.5	2.1	2.6

Tabela 3.16 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD 07/96.

Barreiro VTD 07/96												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO3)	Bicarbonatos (mg/L HCO3-)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	17.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
mean	14.6	72.1	7.0	18.3	10.9	6.1	0.8	0.6	1.9	0.2	0.4	1.4
std	7.4	75.3	0.4	11.9	5.6	3.0	0.3	0.4	1.9	0.2	0.5	0.5
min	1.6	0.0	6.2	6.2	5.0	2.6	0.2	0.3	0.5	0.1	0.1	0.5
25%	8.0	15.5	6.7	13.0	7.1	3.7	0.6	0.5	0.7	0.1	0.1	1.2
50%	17.1	51.5	7.1	14.9	8.5	5.0	0.8	0.5	1.0	0.2	0.4	1.5
75%	20.0	102.3	7.2	17.8	16.3	8.0	1.0	0.5	1.8	0.2	0.5	1.6
max	23.7	270.0	7.7	60.9	23.4	14.3	1.4	2.0	5.9	0.5	2.5	2.3
2003-2011												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO3)	Bicarbonatos (mg/L HCO3-)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
mean	19.1	107.0	6.9	14.6	9.4	7.4	0.8	0.7	2.1	0.2	0.3	1.5
std	2.3	94.0	0.5	6.5	5.6	3.7	0.3	0.6	1.9	0.1	0.2	0.5
min	15.2	0.0	6.2	6.2	5.0	2.6	0.4	0.3	1.0	0.1	0.1	0.5
25%	17.5	13.0	6.7	12.4	6.6	4.8	0.6	0.3	1.0	0.1	0.1	1.6
50%	19.7	112.0	6.8	13.9	7.5	7.7	0.7	0.5	1.0	0.2	0.3	1.6
75%	20.0	167.0	7.3	15.2	9.8	9.2	1.0	1.0	2.0	0.2	0.5	1.7
max	22.6	270.0	7.7	30.0	23.4	14.3	1.4	2.0	5.9	0.5	0.6	2.3
2012-2020												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO3)	Bicarbonatos (mg/L HCO3-)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
mean	10.1	37.2	7.1	22.0	12.5	4.9	0.8	0.5	1.6	0.2	0.6	1.3
std	8.1	22.2	0.3	15.2	5.4	1.6	0.3	0.0	1.9	0.2	0.8	0.4
min	1.6	4.0	6.6	13.0	6.0	3.7	0.2	0.5	0.5	0.1	0.1	0.6
25%	3.6	23.0	6.9	14.7	8.0	3.7	0.8	0.5	0.5	0.1	0.2	1.1
50%	7.6	47.0	7.1	17.0	10.0	3.8	0.9	0.5	0.6	0.2	0.5	1.5
75%	14.6	52.0	7.2	20.0	18.0	5.5	1.0	0.5	1.2	0.5	0.5	1.5
max	23.7	64.0	7.4	60.9	18.3	8.0	1.0	0.6	5.0	0.5	2.5	1.6

As matrizes de correlação de Pearson entre as variáveis são apresentadas na Figura 3.17. A maior correlação é observada entre vazão e sulfatos, efeito também observável no VTD04/94 no Ribeirão Catarina, e pode ter relação com a circulação com águas de maior integração entre dolomitos da Formação Gandarela, tendo em vista sua zona de contribuição.

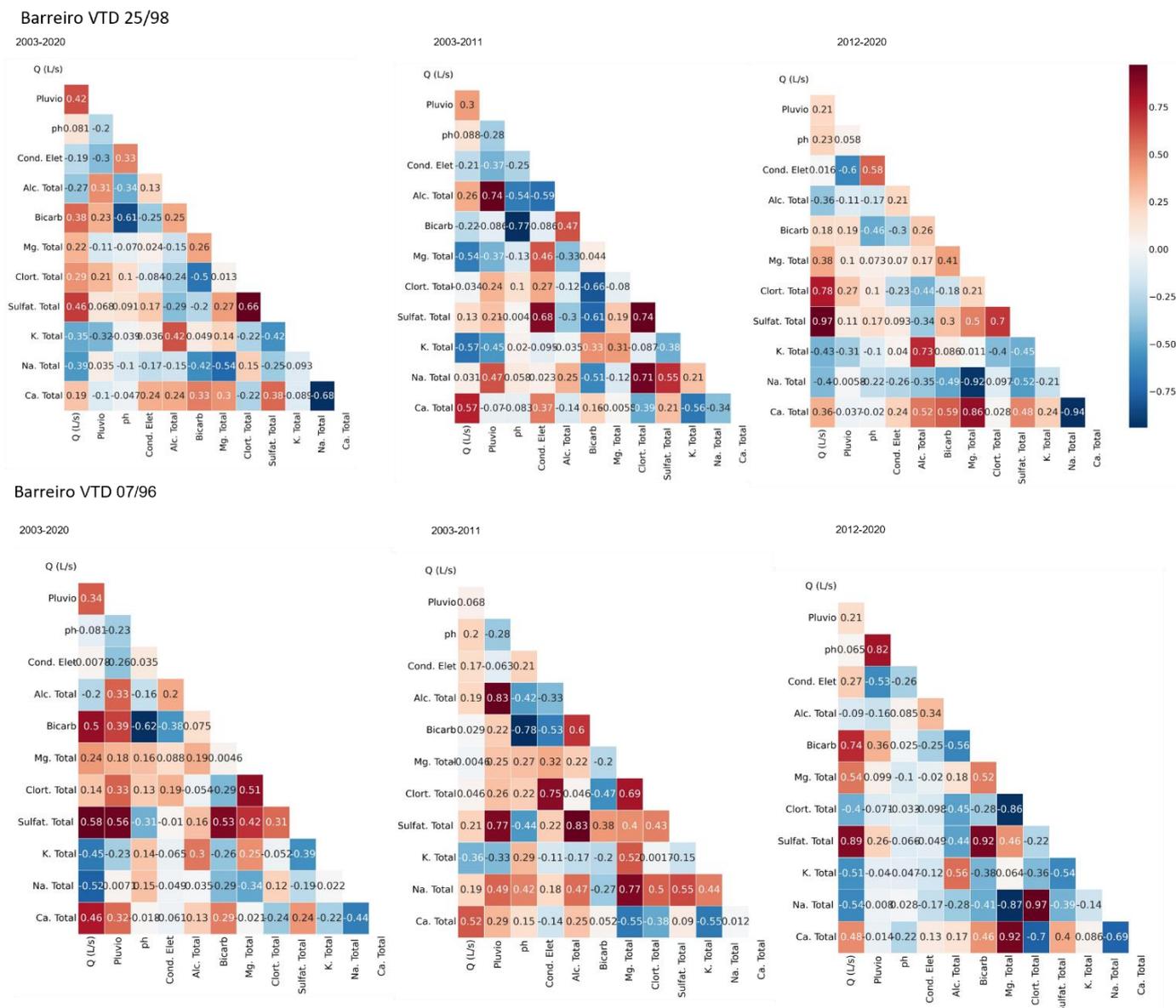


Figura 3.17 - Síntese de valores de correlação de Pearson entre os parâmetros analisados para os pontos de monitoramento no Córrego Barreiro.

3.2.4 Ribeirão Mutuca

Esta sub-bacia encontra-se à norte da cava de Capão Xavier, e ocorre restrita à margem oeste da BR-040. A zona de contribuição principal abarca principalmente rochas do Grupo Nova Lima e formações Moeda e Batatal, as quais integram metadiamicritos, quartzitos e filitos (Figura 3.18). Os vertedouros e pontos de amostragem coincidem e configuram os pontos, VTD 01/94 (cota em 1156 m), VTD 02/94 (Cota em 1150 m) e VTD 03/94 (Cota em 1151 m).

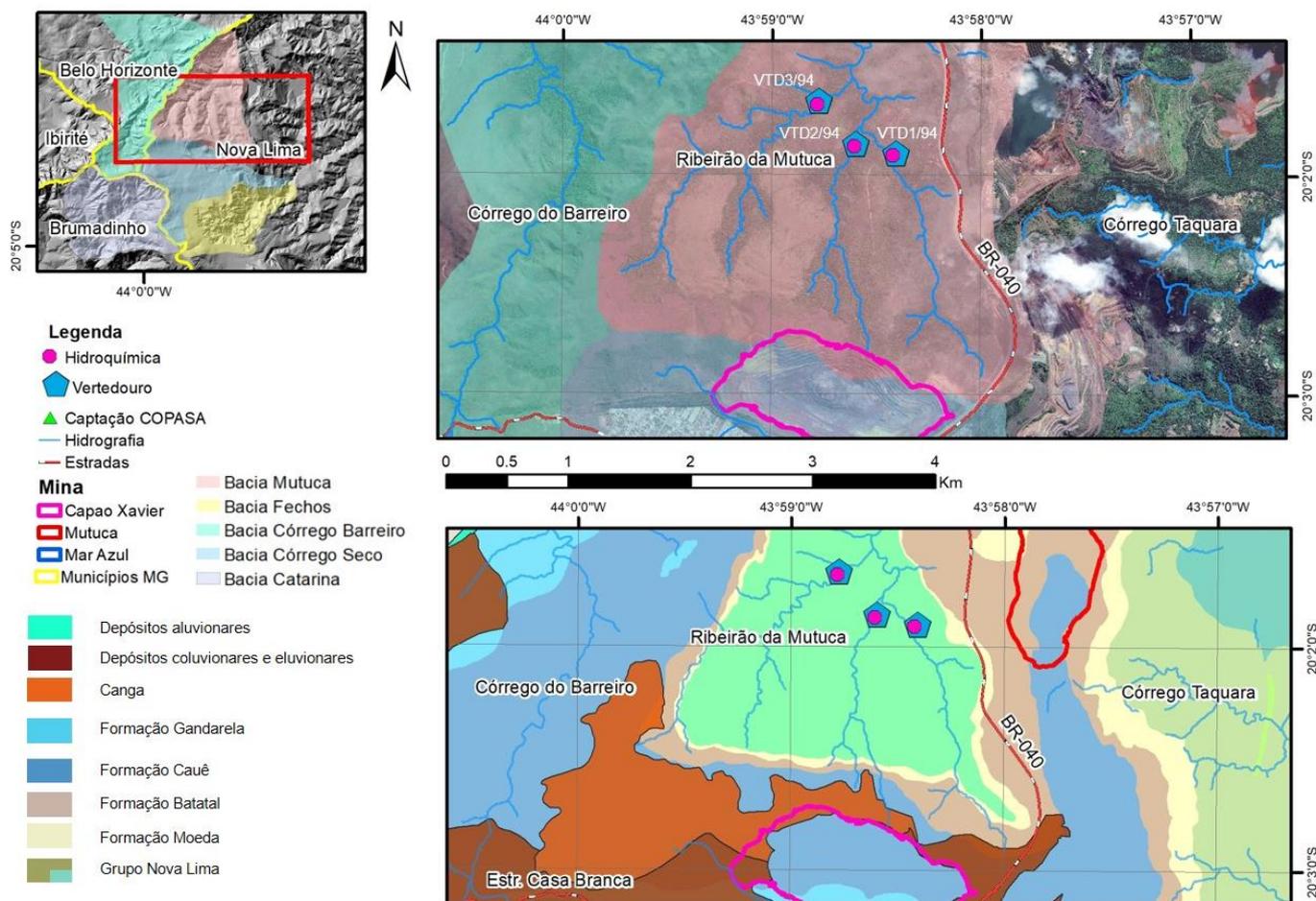


Figura 3.18 - Localização da sub-bacia Ribeirão da Mutuca com litologia associada e rede de monitoramento utilizada.

Ao avaliar a relação de tendência entre os ciclos, nota-se que ocorreu redução das vazões, médias, máximas e mínimas em todos os vertedores da Mutuca, sendo as mais significativas as de vazão máxima para os vertedores VTD 01/94 e VTD/02/94 (Tabela 3.17).

Tabela 3.17 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para os vertedores 04/94 e 30/09 referentes ao Ribeirão Catarina.

Ciclo 2003/2011 - 2012/2020	ΔQ (VTD 01/94)	ΔQ (VTD 02/94)	ΔQ (VTD 03/94)
Média	17.22	13.08	16.89
Mediana	11.89	11.07	16.02
Mínima	5.29	4.41	6.52
Máxima	96.82	88.79	12.74

Os maiores coeficientes de variação ocorrem para os VTD 01/94 e 02/94, para os quais a contribuição das coberturas à montante é menor (Figura 3.19). Por figurar a sub-bacia que bordeja a cava de CPX, se esperaria que a influência de rebaixamento da cava atuasse de maneira mais intensa nas zonas dos exultórios, porém a presença dos filitos da Formação Batatal limita em termos hidráulicos esta conexão esperada.

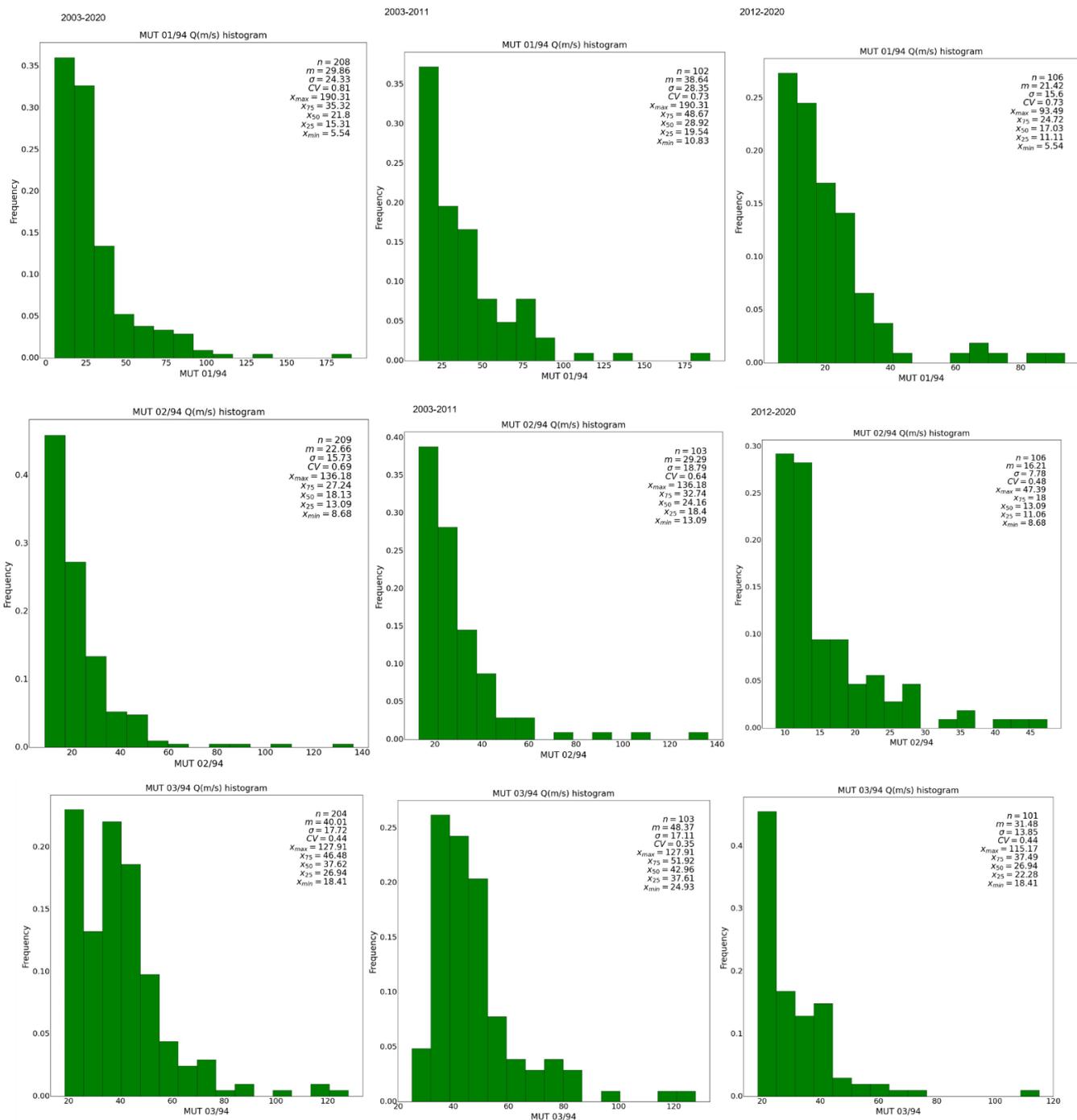


Figura 3.19 - Estatística descritiva dos dados de vazão para os pontos de monitoramento analisados para o Ribeirão da Mutuca.

Os parâmetros hidroquímicos para o VTD 01/94 estão sumarizados na Tabela 3.20. Em geral não houve mudanças significativas entre os ciclos, no que se refere aos parâmetros analisados. De certa forma, integram águas ligeiramente menos mineralizadas que aquelas cuja interação superficial é maior com rochas do Grupo Nova Lima (Ferreira et al., 2017).

Tabela 3.20 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD 01/94.

VTD 01/94 2003-2020												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	18.0	18.0	18.0	17.0	15.0	14.0	17.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
mean	14.8	72.1	7.2	28.6	18.6	10.0	1.4	0.8	1.8	0.3	0.4	2.6
std	6.1	75.3	0.3	22.6	8.1	3.9	0.4	0.9	1.8	0.2	0.2	2.3
min	5.9	0.0	6.4	14.0	6.0	3.7	0.6	0.3	0.5	0.1	0.1	0.2
25%	10.4	15.5	7.0	18.4	12.4	7.3	1.2	0.5	0.6	0.2	0.4	1.8
50%	14.3	51.5	7.2	21.8	16.0	9.5	1.3	0.5	1.0	0.2	0.5	2.1
75%	18.3	102.3	7.5	26.0	24.0	11.0	1.5	0.9	2.2	0.3	0.5	2.5
max	31.7	270.0	7.7	94.6	32.0	17.9	2.4	4.1	6.1	0.9	0.8	11.1
2003-2011												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	9.0	9.0	9.0	8.0	6.0	5.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
mean	18.9	107.0	7.1	28.1	20.2	13.5	1.4	1.0	1.9	0.3	0.4	3.2
std	5.4	94.0	0.4	21.4	8.6	3.8	0.5	1.2	1.7	0.3	0.2	3.1
min	13.5	0.0	6.4	14.0	11.9	9.0	0.9	0.3	0.5	0.1	0.2	0.9
25%	16.2	13.0	7.0	17.8	14.5	10.3	1.2	0.5	1.0	0.2	0.4	1.9
50%	18.8	112.0	7.1	22.4	16.6	14.5	1.2	0.5	1.0	0.2	0.4	2.2
75%	19.8	167.0	7.4	25.2	26.7	16.0	1.6	1.0	2.2	0.3	0.5	2.6
max	31.7	270.0	7.6	80.0	32.0	17.9	2.4	4.1	6.1	0.9	0.8	11.1
2012-2020												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
mean	10.7	37.2	7.3	29.1	17.5	8.1	1.3	0.6	1.7	0.2	0.5	2.0
std	3.5	22.2	0.2	25.0	8.1	2.3	0.3	0.2	1.9	0.2	0.2	0.9
min	5.9	4.0	7.0	15.0	6.0	3.7	0.6	0.5	0.5	0.1	0.1	0.2
25%	8.8	23.0	7.2	19.0	11.4	7.2	1.3	0.5	0.6	0.2	0.4	1.7
50%	10.3	47.0	7.2	20.0	14.5	7.4	1.3	0.5	0.7	0.2	0.5	2.0
75%	13.5	52.0	7.5	26.0	24.0	10.0	1.4	0.5	1.1	0.2	0.6	2.3
max	16.4	64.0	7.7	94.6	30.0	11.0	1.7	1.2	5.0	0.5	0.8	3.6

Para o VTD 02/94, os parâmetros hidroquímicos encontram-se na Tabela 3.21. Em geral a mineralização é bastante similar ao VT01/94.

Tabela 3.21 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD 02/94.

VTD 02/94 2003-2020												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	17.0	16.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
mean	14.8	72.1	7.2	21.0	13.0	8.1	0.8	0.7	1.8	0.3	0.5	1.4
std	4.9	75.3	0.3	23.6	9.4	5.6	0.6	0.8	2.0	0.2	0.4	2.6
min	8.8	0.0	6.5	6.8	3.8	3.7	0.1	0.3	0.5	0.1	0.1	0.2
25%	10.7	15.5	7.0	8.2	6.0	4.7	0.5	0.5	0.5	0.1	0.2	0.3
50%	13.8	51.5	7.2	13.5	10.3	6.0	0.6	0.5	1.0	0.2	0.5	0.6
75%	17.9	102.3	7.3	19.5	18.0	9.0	1.0	0.5	1.8	0.5	0.5	0.9
max	26.9	270.0	7.8	94.2	40.9	24.5	2.3	3.7	6.5	0.9	1.7	11.0
2003-2011												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
mean	17.5	107.0	7.1	16.5	12.9	9.4	0.8	0.9	1.4	0.4	0.5	1.9
std	4.3	94.0	0.3	21.1	12.7	6.4	0.7	1.1	1.4	0.3	0.3	3.5
min	13.3	0.0	6.5	6.8	3.8	4.7	0.1	0.3	0.5	0.1	0.1	0.3
25%	14.1	13.0	6.8	7.8	4.8	5.7	0.4	0.3	1.0	0.1	0.3	0.4
50%	16.8	112.0	7.1	8.3	6.0	7.6	0.6	0.5	1.0	0.2	0.5	0.6
75%	19.1	167.0	7.3	11.0	17.2	9.4	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.8
max	26.9	270.0	7.5	72.0	40.9	24.5	2.3	3.7	5.0	0.9	1.3	11.0
2012-2020												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
mean	12.1	37.2	7.3	25.5	13.1	7.0	0.8	0.5	2.2	0.3	0.4	0.9
std	4.0	22.2	0.3	26.4	5.1	4.8	0.5	0.1	2.5	0.2	0.5	1.1
min	8.8	4.0	6.6	7.4	6.0	3.7	0.4	0.5	0.5	0.1	0.1	0.2
25%	10.3	23.0	7.2	13.9	9.5	3.7	0.6	0.5	0.5	0.1	0.2	0.2
50%	10.7	47.0	7.3	17.0	11.7	5.8	0.7	0.5	0.5	0.3	0.2	0.5
75%	11.9	52.0	7.4	23.0	18.0	7.2	0.9	0.5	5.0	0.3	0.5	0.9
max	21.0	64.0	7.8	94.2	18.3	18.0	1.8	0.7	6.5	0.5	1.7	3.7

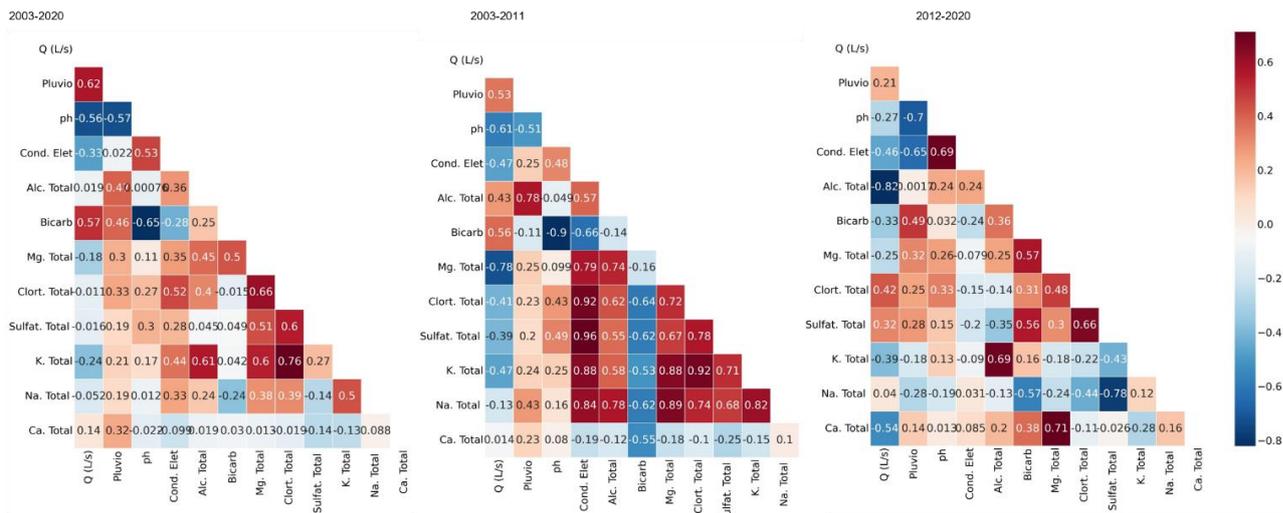
A relação dos parâmetros hidroquímicos para o VTD 03/94 é apresentada na Tabela 3.22. Dentre os pontos analisados em todas as sub-bacias estudadas, o Ribeirão da Mutuca apresenta os menores valores de mineralização, efeito possivelmente relacionado com seus maiores valores de vazão e comportamento mais inerte dos tipos de rochas e solos com os quais as águas fazem contato.

Tabela 3.22 - Sumário estatístico dos parâmetros analisados para o VTD 03/94.

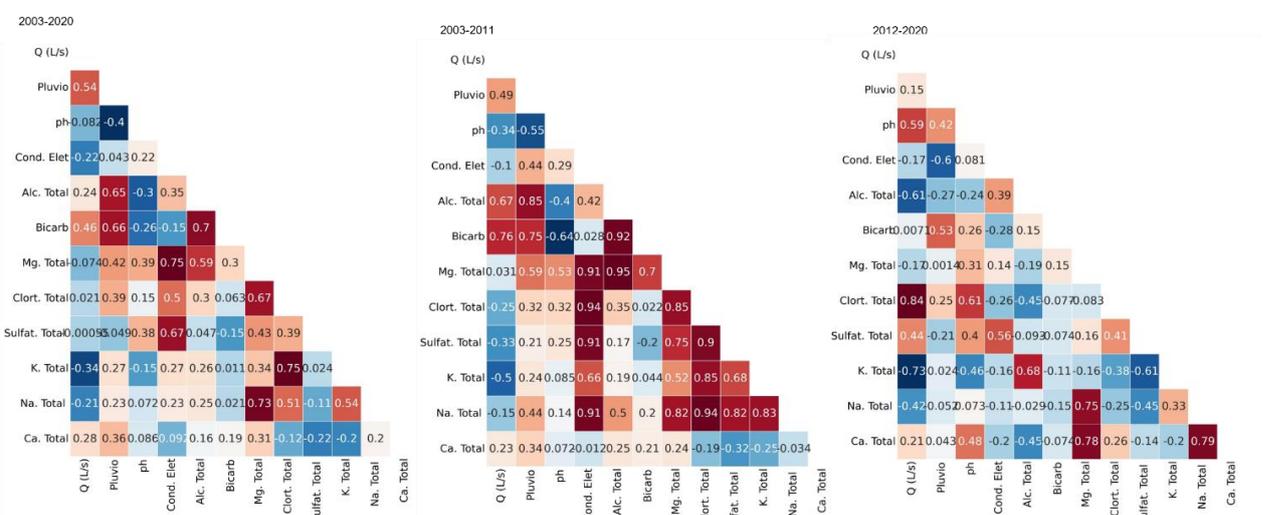
VTD 03/94 2003-2020												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	17.0	17.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
mean	33.4	72.1	7.1	11.8	11.0	5.9	0.8	0.6	5.5	0.2	0.3	0.8
std	12.1	75.3	0.3	11.7	6.1	2.9	0.5	0.5	16.9	0.1	0.2	0.9
min	18.4	0.0	6.6	0.1	3.8	1.9	0.0	0.3	0.5	0.0	0.1	0.1
25%	21.1	15.5	6.9	0.8	7.1	4.6	0.5	0.5	0.5	0.1	0.2	0.3
50%	34.6	51.5	7.1	8.8	10.0	5.2	0.9	0.5	1.0	0.2	0.3	0.5
75%	38.4	102.3	7.2	18.5	12.8	6.2	1.1	0.5	1.8	0.3	0.5	0.8
max	60.4	270.0	7.8	38.3	23.0	13.8	1.8	2.2	73.0	0.5	0.7	3.8
2003-2011												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
mean	41.7	107.0	7.0	4.8	8.3	5.7	0.7	0.7	1.4	0.2	0.3	0.8
std	9.9	94.0	0.4	7.9	6.1	3.8	0.4	0.6	1.4	0.1	0.2	1.2
min	32.2	0.0	6.6	0.1	3.8	1.9	0.2	0.3	0.5	0.1	0.1	0.1
25%	35.0	13.0	6.8	0.4	4.1	4.0	0.4	0.3	1.0	0.2	0.2	0.2
50%	38.0	112.0	7.0	0.8	7.4	4.9	0.6	0.5	1.0	0.2	0.2	0.4
75%	48.1	167.0	7.2	7.0	9.0	6.1	0.9	1.0	1.0	0.3	0.5	0.6
max	60.4	270.0	7.8	24.0	23.0	13.8	1.4	2.2	5.0	0.5	0.5	3.8
2012-2020												
index	Q (L/s)	Pluvio	ph	Condutividade elétrica (µS/cm)	Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	Bicarbonatos (mg/L HCO ₃ ⁻)	Magnésio total (mg/L)	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Potássio total (mg/L)	Sódio total (mg/L)	Cálcio total (mg/L)
count	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
mean	25.1	37.2	7.1	18.8	13.6	6.0	1.0	0.5	9.6	0.2	0.3	0.7
std	7.7	22.2	0.2	10.9	5.0	2.2	0.5	0.0	23.9	0.2	0.2	0.5
min	18.4	4.0	6.7	7.0	7.0	3.7	0.0	0.5	0.5	0.0	0.1	0.3
25%	20.8	23.0	7.1	10.0	10.2	5.0	0.9	0.5	0.5	0.1	0.2	0.4
50%	20.8	47.0	7.1	17.0	12.0	5.5	1.0	0.5	0.5	0.2	0.4	0.5
75%	30.2	52.0	7.2	20.0	18.0	6.2	1.1	0.5	5.0	0.2	0.5	1.1
max	38.6	64.0	7.6	38.3	21.0	11.0	1.8	0.6	73.0	0.5	0.7	1.6

Existe boa correlação entre os dados de pluviometria e vazão para todos os vertedouros com valores de *p* acima de 0.5. Este efeito denota maior sensibilidade destas vazões frente efeitos de variação climática sazonal. Porém os perfis de contribuições entre os diferentes cátions perdem força entre as correlações nos ciclos entre 2012 e 2020 (Figura 3.20)

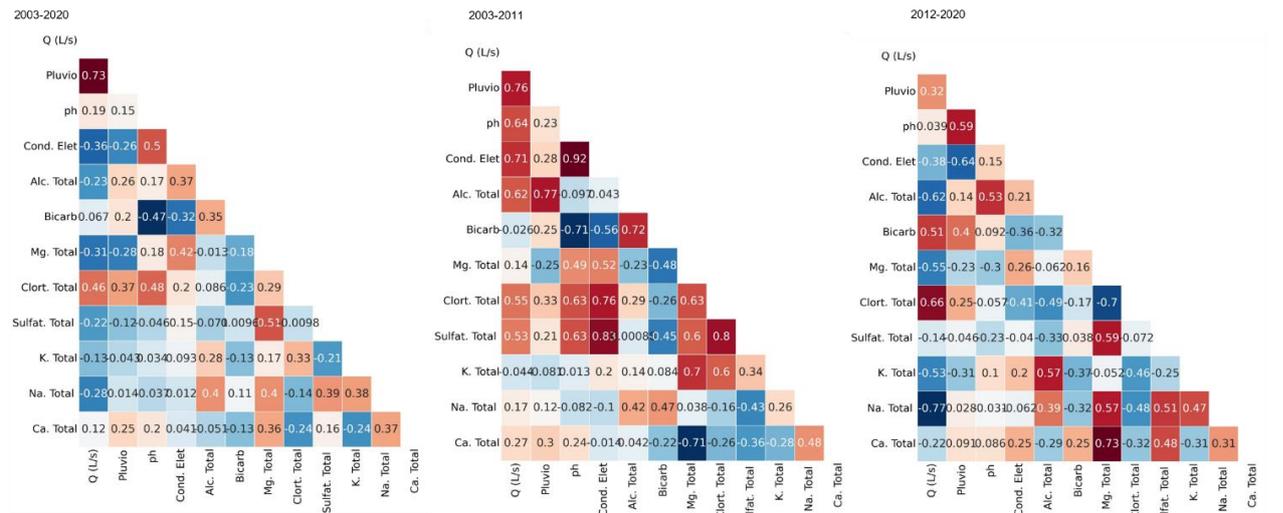
Mutuca VTD 01/94



Mutuca VTD 02/94



Mutuca VTD 03/94



2012 a 2020. As reduções dialogam com os menores valores de pluviometria, os quais apresentam correlação positiva com as vazões.

A análise global dos dados hidroquímicos de todas as bacias mostra que há forte contraste entre os dados nos dois períodos de análise entre 2003 e 2011 e 2012 e 2020. Este dado muito certamente está relacionado com mudanças no padrão e intensificação do uso do solo, sendo interpretada como decorrente de controle antropogênico, isto é, função de aumento de contaminação.

Caso a composição química das águas fosse exclusivamente decorrente do controle geogênico e pedogênico não seriam esperadas mudanças da composição e das correlações observadas nas matrizes de Pearson. Adicionalmente, o número relativamente reduzido de amostras para cada ciclo e o fato de as águas serem muito pouco mineralizadas também contribui para alterações com respostas diferenciadas nas correlações.

De qualquer modo, a eventual contaminação é restrita, pois a elevação das substâncias, que podem materializar a condutividade elétrica das águas é limitada (em geral com aumento de algumas dezenas de $\mu\text{S}/\text{cm}$). A sub-bacia do Córrego Seco é uma exceção dentre as estudadas, sendo um caso que recebe ampla carga de contaminação (esgotos domésticos) nos dois períodos de análise.

Para se avaliar de forma assertiva se o processo de rebaixamento dos níveis poderia causar misturas das águas de diferentes aquíferos seria necessário que as análises fossem realizadas em um mesmo período do ano (por exemplo, pico do período seco) e que as análises fossem avaliadas em função do aprofundamento da cava e aumento do rebaixamento. Contudo, não é possível realizar esta separação no conjunto de dados disponível e assim, apenas é possível avaliar eventual contaminação ou explicar a concentração de certas substâncias.

Concentrações pontuais de cálcio, magnésio, pH e alcalinidade total mais elevadas, são compatíveis com maior contato da água com rochas carbonáticas. As correlações positivas entre estas substâncias são particularmente elevadas na surgência cárstica. Entretanto, as águas subterrâneas e superficiais da região apresentam baixa mineralização, o que é compatível com os tipos petrográficos mais comumente observados na região: quartzitos, filitos, metaconglomerados, itabiritos e seus solos derivados.

3.3 Geologia Estrutural Local e suas Relações com o Fluxo Subterrâneo

Estruturas geológicas como falhas, fraturas, acamamento e planos de discordâncias desempenham importante papel no direcionamento das águas subterrâneas, uma vez que influenciam a permeabilidade dos materiais em subsuperfície (Fetter, 1994). Mediante interação de tais anisotropias com a porosidade intrínseca do meio, os mecanismos de fluxo ao longo dos

aquíferos podem apresentar caminhos variáveis, de modo que a correta definição das estruturas e principais frequências configura elemento fundamental na investigação hidrogeológica dos meios anisotrópicos.

Por integrar sistemas com naturezas reológicas variadas, os caminhos de fluxo hidrogeológico possuem forte relação com as anisotropias, cuja escala, origem e evolução se deram em tempos distintos.

O contexto local da Mina de Capão Xavier, por estar inserido na junção do Homoclinal Curral com o Sinclinal Moeda (Pires, 1979) se enquadra em um cenário de divergências quanto à origem das estruturas paleoproterozoicas e a real natureza dos seus indicadores cinemáticos. Em linhas gerais, Alkmim & Marashak (1998) atribuem para as estruturas paleoproterozoicas vergência com sentido NW, enquanto Endo (1997) sugere como principal direção de transporte de massa a vergência NNE. Apesar de não haver consenso quanto ao papel destas feições muitas vezes obliteradas, é bem aceita a relação e a superimposição das componentes da Orogenia Brasileira (0.7 a 0.45 Ga, Neves et al., 2016), responsável por reorientações de cunho regional e local, sob regime transpressivo com vergência WNW (Farina et al., 2016; Endo et al., 2020).

A estrutura principal observável na Mina de Capão Xavier consiste na superfície de bandamento Sb, cuja maior densidade de medidas permitiu o traçado das linhas da continuidade entre os *strikes* (Figura 3.21-B). Tal superfície varia em torno de dois eixos os quais conformam padrão de vergência e transporte principal para NW, e de maneira subordinada para SE. Os eixos apresentam direção principal em 108/30, com variações locais e outra componente de menor expressão com direção 80/35 (Figura 3.21 C-D).

A foliação remete à duas direções principais oblíquas às superfícies de bandamento, e sua componente principal em relação ao ângulo de bandamento corrobora o padrão transpressivo sinistral (Figura 3.21-E). O arranjo geométrico observável indica maior propensão para direções de fluxo de NW para SE, uma vez que, esta configura a principal componente entre os diferentes planos. Adicionalmente, a orientação, de tais estruturas, em torno dos eixos com caimento para sudeste, atua de modo a favorecer a permeabilidade neste sentido, cuja lineação de interseção mineral e os eixos de dobras ocorrem subparalelos.

Uma vez que a capacidade de transmitir água entre as diferentes unidades não se relaciona apenas com a porosidade do material e seu bandamento, a interconexão entre elas deve ser considerada mediante a interação com elementos da trama rúptil. O item seguinte irá discutir os elementos e técnicas empregadas na investigação local.

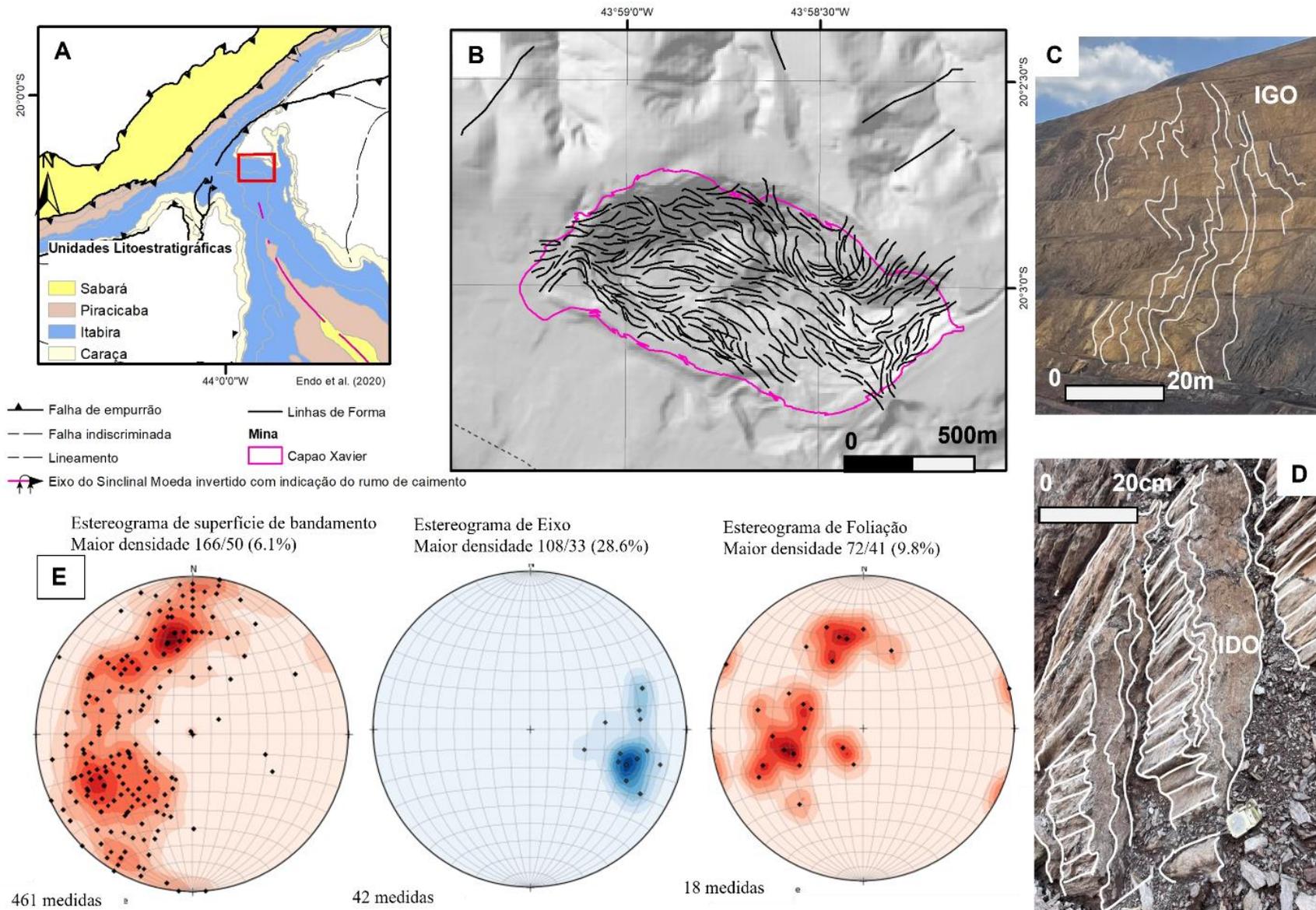


Figura 3.21 - Quadro com o contexto local das principais estruturas observadas na cava de Capão Xavier (CPX). **A)** Unidades litoestratigráficas na junção entre o Homoclinal Curral e Sinclinal Moeda. **B)** Linhas de forma oriundas do traçado entre os strikes das superfícies de bandamento. **C)** Dobras assimétricas com vergência para oeste em itabirito goethítico (IGO). **D)** Dobras assimétricas em itabirito dolomítico com vergência leste. **E)** Estereogramas de polos da superfície de bandamento Sb, Eixos de dobras E, e Foliação Sn.

3.3.1 Geofísica e os Elementos da Trama Rúptil

Os métodos geofísicos fornecem informações para investigação de recursos hídricos subterrâneos. No Quadrilátero Ferrífero, Carlos et al. (2016) destacam o relevante papel da análise de lineamentos geofísicos regionais, cuja expressão tem relação com traços de contato existentes na cava ou estruturas evidentes como fraturas ou falhamentos. Embora dados de magnetometria não sejam comumente utilizados como fontes primárias para o estudo hidrogeológico, o método provê informações relevantes acerca das estruturas em subsuperfície, uma vez que a região acumula expressivas mineralizações de ferro e integra complexo arcabouço estrutural. O método apresenta relevante resposta nos contrastes de susceptibilidade magnética, cuja relação se estabelece com o vetor campo magnético total, composto por uma componente vertical Z , e horizontal H na direção do norte magnético.

Para esta etapa foram considerados produtos de magnetometria disponibilizados pela VALE, que incluem imagens processadas da segunda derivada vertical (DZ2) e Amplitude do Sinal Analítico (ASA). Neste contexto, o filtro da primeira derivada vertical (DZ) pode ser aplicado para realçar as fontes geológicas rasas, de tal forma que acentua os gradientes nas bordas dos corpos, e o produto da Amplitude do Sinal Analítico apresenta relevância uma vez que permite o mapeamento da projeção horizontal do corpo magnético, pela combinação dos gradientes horizontais e verticais (Blakely 1996).

Mediante análise das principais direções e traçados dos produtos da magnetometria (Figura 3.22-D), é possível observar a relação entre o controle das principais coberturas que bordejam a cava de Capão Xavier. A distribuição da laterita e argilito ao sul da cava ocorrem bem alinhados às zonas de contraste magnético evidente no produto ASA (Figura 3.22-A). Já para o produto DZ2 (Figura 3.22-B) cuja frequência e resposta para feições rasas é maior, o destaque dos lineamentos ocorre para feições a oeste da cava, região onde ocorrem tipos petrográficos com maior proporção de minerais hidratados como a goethita e gibsitita.

É importante destacar que a avaliação dos produtos de geofísica aérea não se deu de forma isolada, mas integrada com os estudos de superfície e de afloramento das áreas de cavas que permitem a visualização em três dimensões das estruturas em escalas mesoscópicas.

Da mesma forma, a avaliação regional foi sempre realizada a partir da confirmação de feições hidrogeológicas locais.

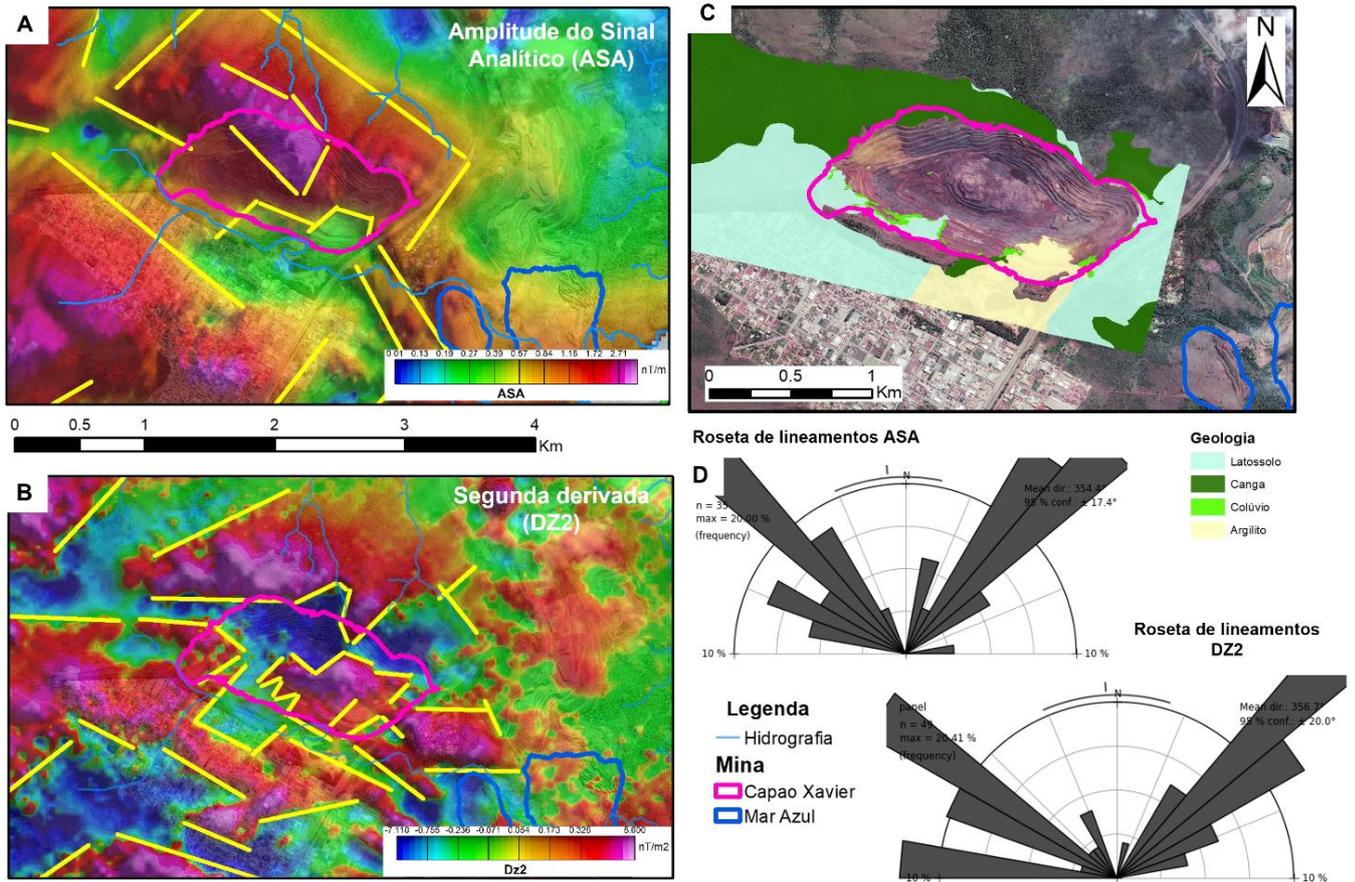


Figura 3.22 - Produtos geofísicos de magnetometria e diagramas de roseta associados. **A)** Mapa de Amplitude do sinal analítico (ASA). **B)** Mapa da Segunda derivada em Z (DZ2). **C)** Mapa da distribuição de coberturas que bordejam a cava de CPX. **D)** Diagramas de rosetas com frequências das principais direções de lineamentos obtidos dos produtos geofísicos.

Por meio da confecção de rosetas mediante a direção dos planos de diáclase, nota-se que as principais frequências mostram forte relação com o controle das coberturas, à sul da cava (Figura 3.23-C). Os lineamentos que marcam o contato entre a laterita e argilas com a formação ferrífera são correlacionáveis com componentes NW/SE e NE/SW (Figura 3.23-A-C). Estas direções encontram-se associadas com os poços tubulares de mais alta vazão observáveis na cava, sendo coincidentes com a componente NW/SE (Figura 3.23-D).

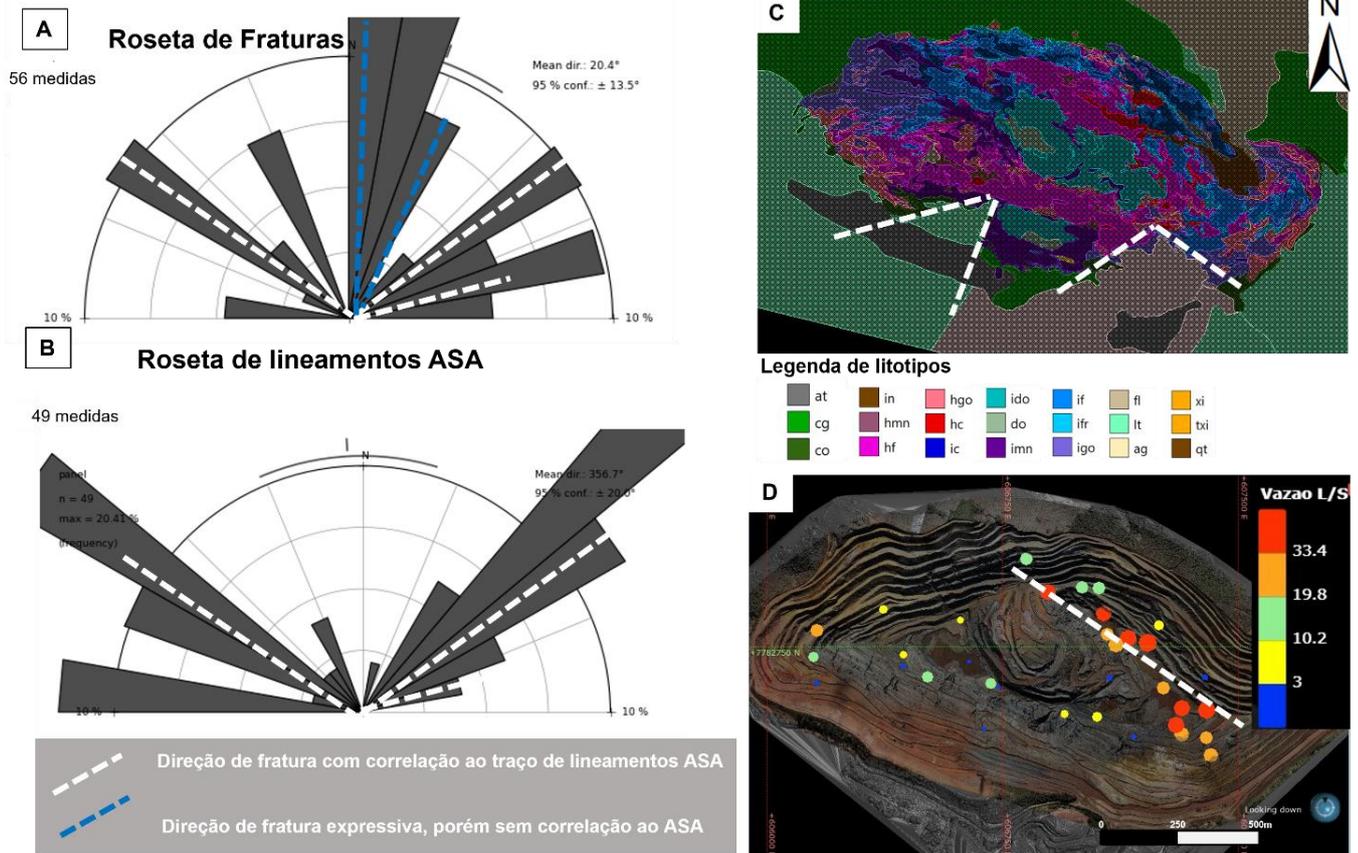


Figura 3.23 - Relação entre elementos da trama rúptil, direção de alinhamentos magnéticos do produto de amplitude do sinal analítico (ASA). **A**) Roseta de frequências das direções principais de fraturas observadas na cava de Capão Xavier (CPX). **B**) Diagramas de rosetas com frequências das principais direções do mapa de ASA. **C**) Mapa de tipos petrográficos da cava de Capão Xavier, com chave de classificação utilizada pela VALE at - aterro, ag - argilito, txi - talco xisto; imn - itabirito manganêsífero; igo - itabirito goetítico; ifr - itabirito friável rico; IF - itabirito friável; ido - itabirito dolomítico; ic - itabirito compacto; hmn - hematita manganêsífera; hgo - hematita goetítica; hf - hematita friável; hc - hematita compacta e do - dolomito. **D**) Mapa de poços tubulares com indicativo de vazão em litros/segundo (l/s) e relação com direção de fratura com expressiva frequência (observável no produto ASA).

As componentes com relevância N/S e NNE/SSW não foram observadas nas direções principais dos produtos geofísicos, entretanto representam planos com expressiva frequência na região central da cava associado à fraturas de itabiritos dolomíticos e dolomitos (Figuras 3.24 C e D). Embora estes litotipos representem rochas compactas na qual seria esperada menor capacidade de transmissão de água, o índice de conexão entre fraturas pode ser elevado (Figura 3.24-A) o que resulta em padrões de fluxo laminar, mesmo em períodos de menor taxa de precipitação (Figura 3.24-B). Em zonas com maior abertura de fraturas pode ocorrer a presença de fluxo turbulento, cuja evidência pode estar relacionada com marcas de dissolução e precipitação de calcita e sílica em faces de planos subverticais (Figura 3.24-C).

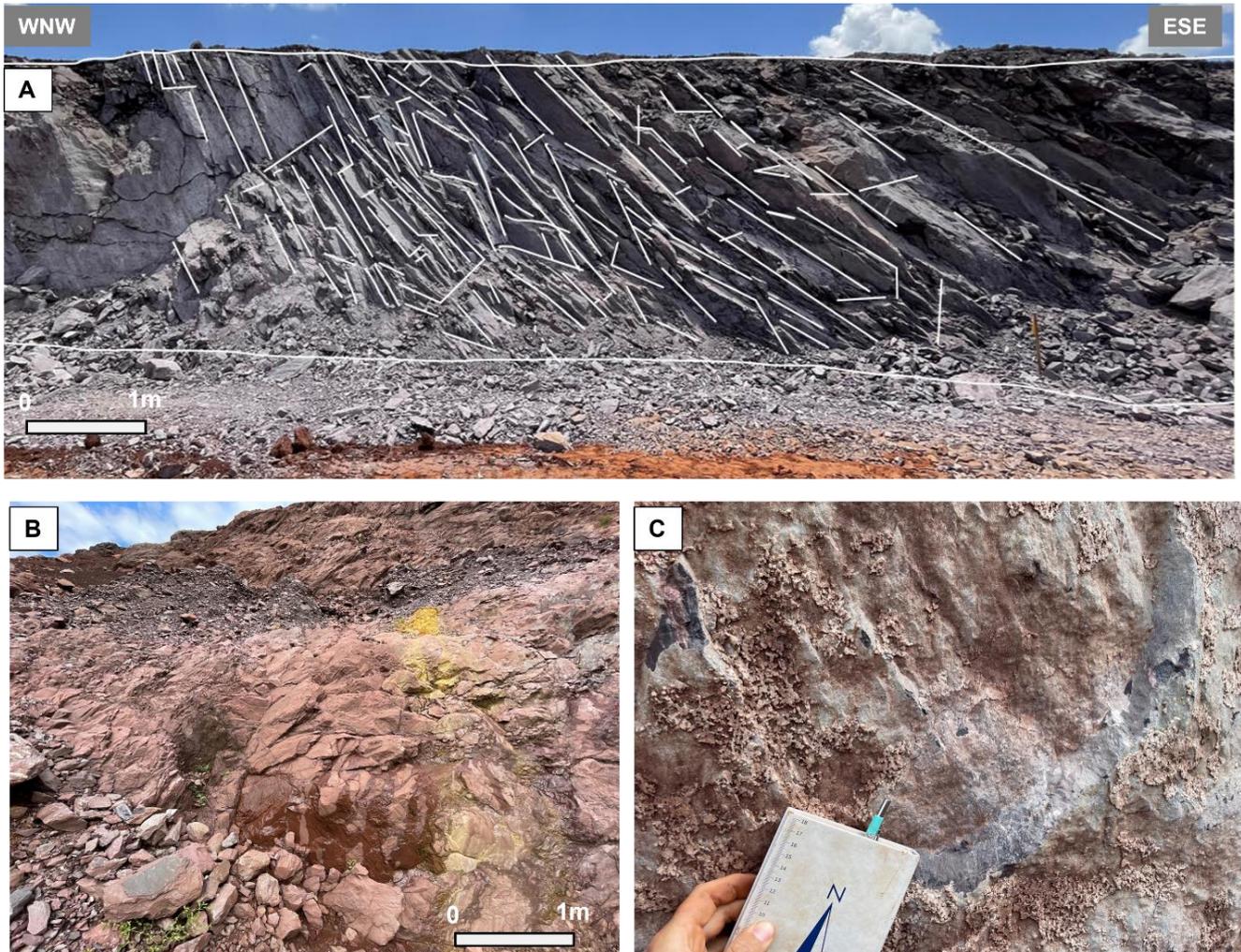


Figura 3.24 - Planos de fratura e evidências de fluxo em itabirito dolomítico na região da cava de Capão Xavier. **A)** Conjunto de fraturas interconectadas observável em talude na região central da cava. **B)** Fluxo laminar no período se seca (Mês de maio) em dolomito. **C)** Concreções de carbonatos e sílica em plano de fratura aberta observado em itabirito dolomítico na região central da cava.

Com base na interconexão entre elementos da trama rúptil e dúctil, o minério com elevado teor de Fe ($> 52\%$) associado ao espesso manto de intemperismo, abrange em geral condições de meio físico com elevado potencial para armazenar e transmitir água (Mourão 2007). Esta condição muitas vezes representa desafios para cenários de lavra em diversas minas do Quadrilátero Ferrífero. Diante de tais relações, é necessário considerar que tal enriquecimento, teve a componente expressiva relacionada à circulação de águas no meio, como considerado por alguns autores que afirmam que a mineralização supergênica prepondera sobre a hipogênica (Ribeiro 2004; Motta 2016; Ribeiro, 2020).

Neste contexto de sistema mineral, Spier et al. (2006) estabeleceram a idade de concentração do Ferro que remete ao Paleógeno com cerca de 62 Ma, portanto atribuída à processos posteriores a fases tectônicas compressivas ou distensionais do paleoproterozoico e neoproterozoico. Sua importância remete ao desenvolvimento de relevantes depósitos minerais

no Quadrilátero Ferrífero associados aos mantos de intemperismo e saprólitos de rochas das Formações Cauê e Gandarela.

Egglseider et al. (2017) consideram a seguinte evolução com formação de estruturas assimétricas com redistribuição de sílica e mobilização do ferro: i) Estágios iniciais de precipitação de sílica e ferro; ii) Diagênese e compressão que pode potencialmente gerar estruturas *pinch and swell*; iii) Início do encurtamento que gera estruturas do tipo *mulion* e amplificam as estruturas *pinch and swell*; iv) Dobramento por cisalhamento simples que permite o desenvolvimento de estruturas assimétricas; v) Progressão do encurtamento que desenvolvem bandas de cisalhamento causadas pela intensificação da dissolução e precipitação de arrasto; vi) Encurtamento progressivo que incorre na mudança de rumo na banda de cisalhamento, formando falhas reversas e vii) Com a progressão do encurtamento pode ocorrer a nucleação de zonas de fraquezas nas regiões de charneiras das dobras, gerando meios mais permeáveis estabelecidos em diferentes escalas de observação, desde locais até regionais (ao longo do eixos das dobras de grande porte).

O paralelo entre as direções principais evidenciadas corroboram os processos de formação dos diferentes tipos litológicos ao longo da cava, condicionados pela lixiviação dos minerais como quartzo e calcita, que levam a concentração de ferro e de maneira subordinada manganês. Desta forma, o avanço desses processos está associado não apenas ao campo de colapso e abatimentos oriundos de carstificação, mas também são relacionados com os campos de tensão presentes a partir do cenozoico.

3.3.2 Neotectônica e sua Relação com Aquíferos Intergranulares

A partir dos processos oriundos da deriva do continente Sul-Americano iniciados no Cretáceo, Hasui (1990) define para o território brasileiro, o conceito de Neotectônica, cuja abordagem também pode ser referenciada como tectônica cenozoica ou tectônica ressurgente. As marcas deste regime deformacional no Quadrilátero Ferrífero estão associadas com reativação de estruturas pretéritas, como falhas transcorrentes e empurrões sub-horizontais (Saadi, 1993). Neste regime de componentes extensionais, o registro sedimentar, remonta a formação de bacias encaixadas em vales e encostas, com associações de fácies com naturezas e registros espaciais descontínuos (Barros & Magalhães, 2016).

Apesar de reconhecida por diferentes autores, existem poucos estudos que se propõem a uma correlação sistemática da relação entre instalação de bacias cenozoicas e os processos neotectônicos. A maior parte destas pequenas bacias é associada a subsidências em ambientes cársticos ou a erosão diferencial.

Os principais depósitos terrígenos localizados na região de estudo, foram compartimentados por Castro e Varajão (2020) em diferentes fácies: fragmentar, nodular, arenosa, quartzo arenosa, argilosa maciça e conglomerática. Cabe destacar que as relações entre as fácies descritas anteriormente têm relação com os tipos petrográficos sedimentares observados na cava de Capão Xavier, e apesar da nomenclatura não ser exatamente a mesma, possíveis correlações podem ser consideradas. Neste sentido, colúvios, são associados com a fácies Fragmentar e Nodular, enquanto as Argilas e Lateritas associadas com a fácies Argilosa Quartzo Arenosa. A presença deste meio intergranular com natureza composicional distinta decorrente de aspectos mineralógicos, estruturação, forma das partículas e espessura, representa meios com variada interação entre a zona vadosa e saturada e suas relações potenciais entre o que pode ser aquífero ou aquítarde. As diferentes propriedades hidráulicas condicionam capacidades de transmissão e armazenamento complexas no que tangem ao modelamento específico de integrações de fluxo entre aquíferos intergranulares e confinados.

Em Capão Xavier, as evidências destas estruturas podem ser observadas nas relações de contatos planares, condicionadas por zonas de falhas normais entre os variados tipos de itabirito e os depósitos terrígenos (Figura 3.25A-B-D). Para estas zonas é notória a presença de fácies fragmentárias (Figura 3.25-A-B) nas regiões de transição que migram lateralmente para fácies de composição argilosa. Mediante os contrastes de permeabilidade, para estas zonas são comuns fluxos de água mesmo em períodos de estiagem, os quais confluem para o aparecimento de erosões, e rupturas dos tipos planares e em cunha (Figura 3.25-D).

As evidências de tais abatimentos e as discordantes relações estratigráficas estabelecidas, são observáveis por meio da presença de itabiritos de idade paleoproterozoica (Babinski et al., 1995) justapostos à argilitos nos quais notam-se a presença de bioturbações (Figura 3.26-B-C). Estruturas de cunho tracional integram feições do tipo *slickenside* (Figura 3.26-A), além de conjuntos de fraturas em aspecto conjugado e com baixo ângulo, típicas de acomodações e falhas de transferências locais (Fossen, 2020) (Figura 3.26-D).

O conjunto de estruturas observadas na face sul da cava de Capão Xavier representam registros incontestáveis da atividade neotectônica na área. Além das feições já descritas merecem destaque: i) O plano de acamamento sedimentar marcado por intercalações de fácies com granulometrias distintas; ii) Leve basculamento do conjunto, indicando que o processo tectônico se deu em pulsos sucessivos; iii) Os contatos bruscos de rochas proterozoicas com materiais cenozoicos; iv) Presença de icnofósseis indicadores de idade cenozoica dos sedimentos e v) Estruturas de deslizamentos e orientação de argilominerais nos planos de descolamentos preservados em sedimentos recentes.

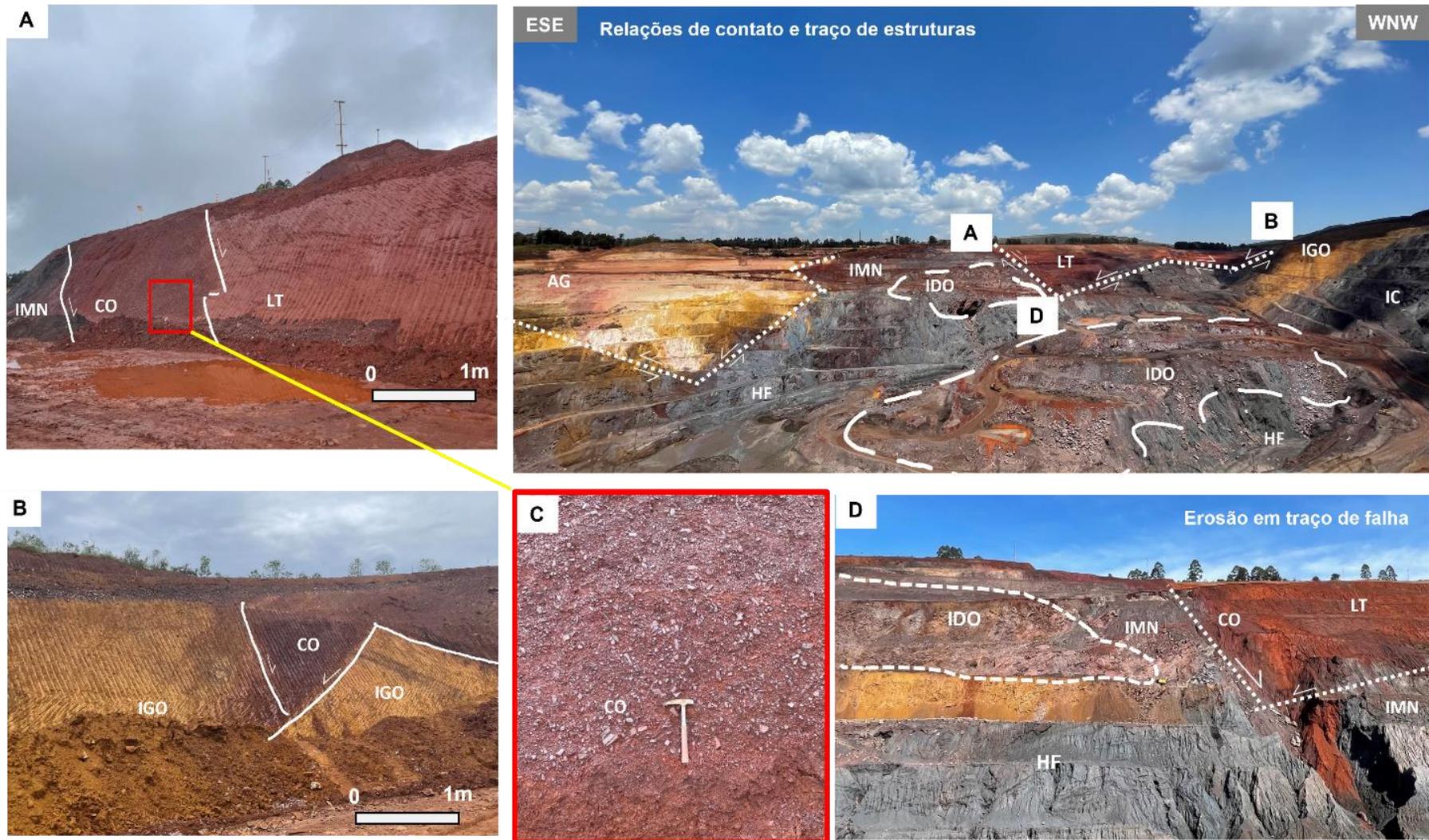


Figura 3.25 - Quadro com relações de contato e evidências de neotectônica observados na cava de Capão Xavier as letras indicam posição relativa das imagens na vista panorâmica com direção ESSE-WNW . As siglas nas imagens são referentes aos tipos petrográficos: Itabirito manganesífero (IMN), Colúvio (CO), Laterita (LT), Argilito (AG), Itabirito Dolomítico (IDO), Itabirito Goethítico (IGO), Itabirito Compacto (IC) e Hematita Friável (HF). **A**) Vista do talude sul da cava, no qual se se observa o traço de contato marcado por falhamentos normais entre tipos geológicos de naturezas distintas. **B**) Traço de pequeno gráben associado na região oeste da cava no contato entre IGO e CO. **C**) Seta amarela em detalhe para CO composto por grânulos centimétricos sub angulosos de hematita, comumente associado às zonas de falhas normais observadas na região. **D**) Vista do talude sul da cava, no qual é observada a relação de falha normal no contato entre itabiritos e deposição de colúvios.

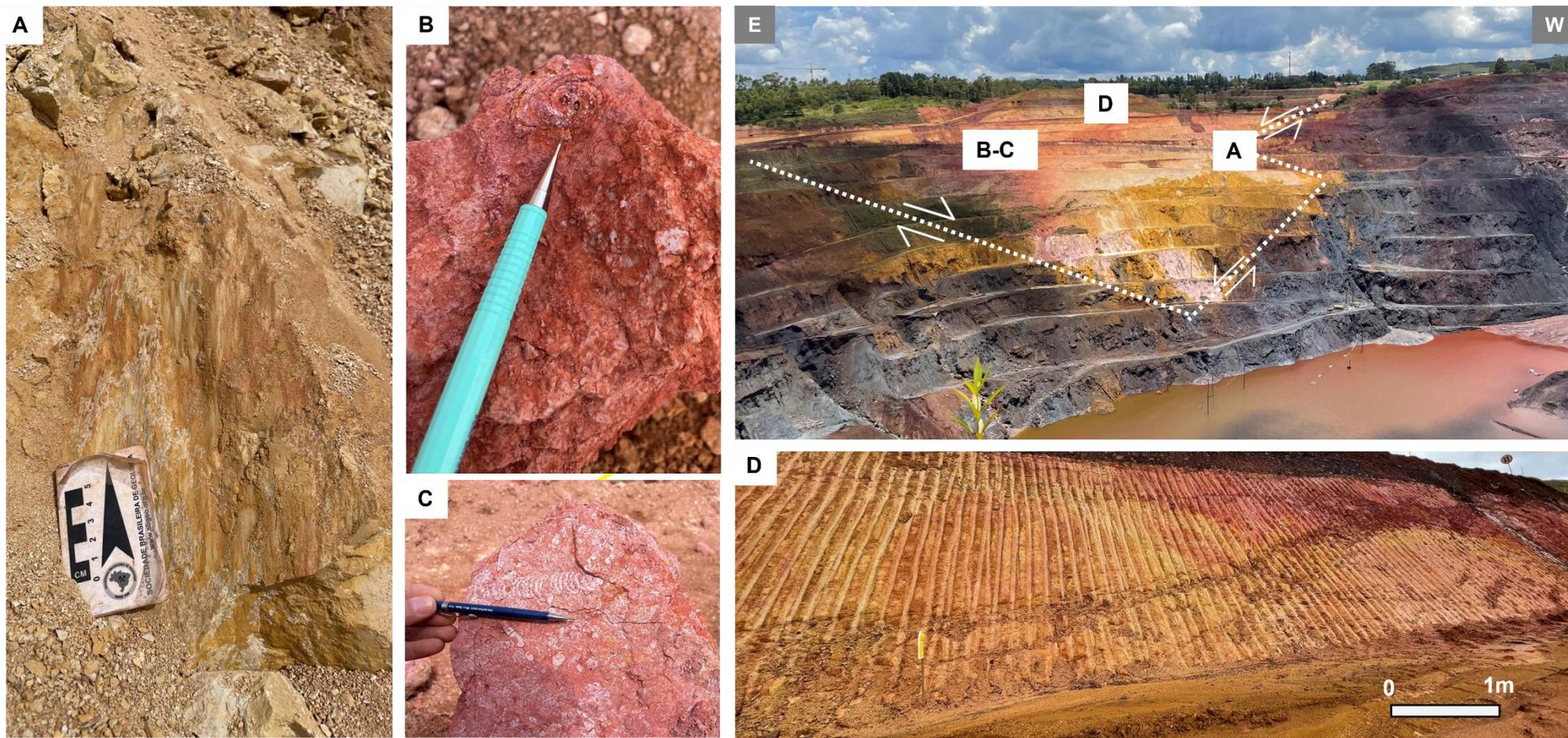


Figura 3.26 - Relações de traçado entre trama rútil e sedimentos cenozoicos na cava de Capão Xavier (CPX). **A)** Estrutura do tipo *slickenside* observada em argilito. **B)** e **C)** Detalhes de estruturas de bioturbação e icnofóssil em argilito, vista em planta e longitudinal respectivamente. **D)** Fraturas conjugadas de baixo ângulo associadas á argilito na parede sul da cava de CPX.

A atividade neotectônica apresenta forte controle no condicionamento dos aquíferos intergranulares da região, uma vez que as zonas afetadas por movimentos recentes de blocos geram faixas com maior condutividade hidráulica, com maiores espessuras do manto de intemperismo, resultando na maior circulação de águas subterrâneas.

Na cava de Capão Xavier existe uma zona de exudação de água subterrânea que forma uma “nascente antrópica” na forma de um tubo de água exatamente ao longo do plano de uma feição identificada e interpretada como um plano de estrutura com movimentação tectônica recente.

Como estas estruturas são formadas por reativações de anisotropias preexistentes, sua presença favorece a circulação das águas mesmo nos meios fraturados sotopostos, o que explica a ocorrência de poços tubulares com vazões anômalas ao longo destas direções preferenciais.

Da mesma forma, estas estruturas imprimem controle na estabilidade geotécnica dos maciços que afeta. Não raramente são observadas em cavas de minas ou taludes artificiais movimentos de massas cuja ruptura se dá no plano principal de deslocamentos entre os blocos em estruturas neotectônicas.

3.4 Potenciometria e Modelo Conceitual de Fluxo

Foram selecionados poços de monitoramento instalados previamente à operação da cava e com abrangência em todas as bacias hidrográficas que circundam a mina. A relação da escala temporal de aquisição dos dados encontra-se na Tabela 3.22. Embora apresentem abrangência significativa, não são conhecidos os perfis construtivos de todos os instrumentos.

Tabela 3.22 - Instrumentos utilizados para análise potenciométrica e quantitativo de dados aferidos.

Instrumento	Tipo	Primeira aferição	Última Aferição	Cota da superfície	Número de aferições
INA 01/93 PC	Indicador de nível d'água	28/10/1993	25/04/2019	1.289	334
INA 19/93	Indicador de nível d'água	23/09/1993	29/12/2015	1.334	467
INA 21/93	Indicador de nível d'água	06/10/1993	23/09/2014	1.392	308
INA 22/93 PC	Indicador de nível d'água	17/11/1993	11/02/2021	1.383	486
INA 32/99	Indicador de nível d'água	09/11/1999	03/02/2021	1.359	316
INA 33/99	Indicador de nível d'água	12/11/1999	03/02/2021	1.378	308
INA 35/99	Indicador de nível d'água	14/12/1999	09/02/2021	1.173	305
PZ 02/02 - A	Piezômetro	08/02/2002	24/04/2019	1.331	255
PZ 02/02 - B	Piezômetro	08/02/2002	21/03/2011	1.331	126
PZ 29/99 - A	Piezômetro	04/10/1999	03/02/2021	1.361	313
PZ 29/99 - B	Piezômetro	04/10/1999	03/02/2021	1.361	310
PZ 36/99 - A	Piezômetro	11/01/2000	03/02/2021	1.365	309
PZ 36/99 - B	Piezômetro	11/01/2000	20/05/2011	1.366	86

Para análise da influência de rebaixamento oriundo da cava de Capão Xavier (Iniciado em 2004), o conjunto de dados foi separado em duas fases. A primeira entre a data da construção do instrumento até 2003, e outra de 2004 até sua última medição. Para evidenciar as zonas com maior interferência entre os ciclos, foi elaborado um mapa cujo tamanho da simbologia do poço se relaciona com as diferenças entre nível potenciométrico (Figura 3.27).

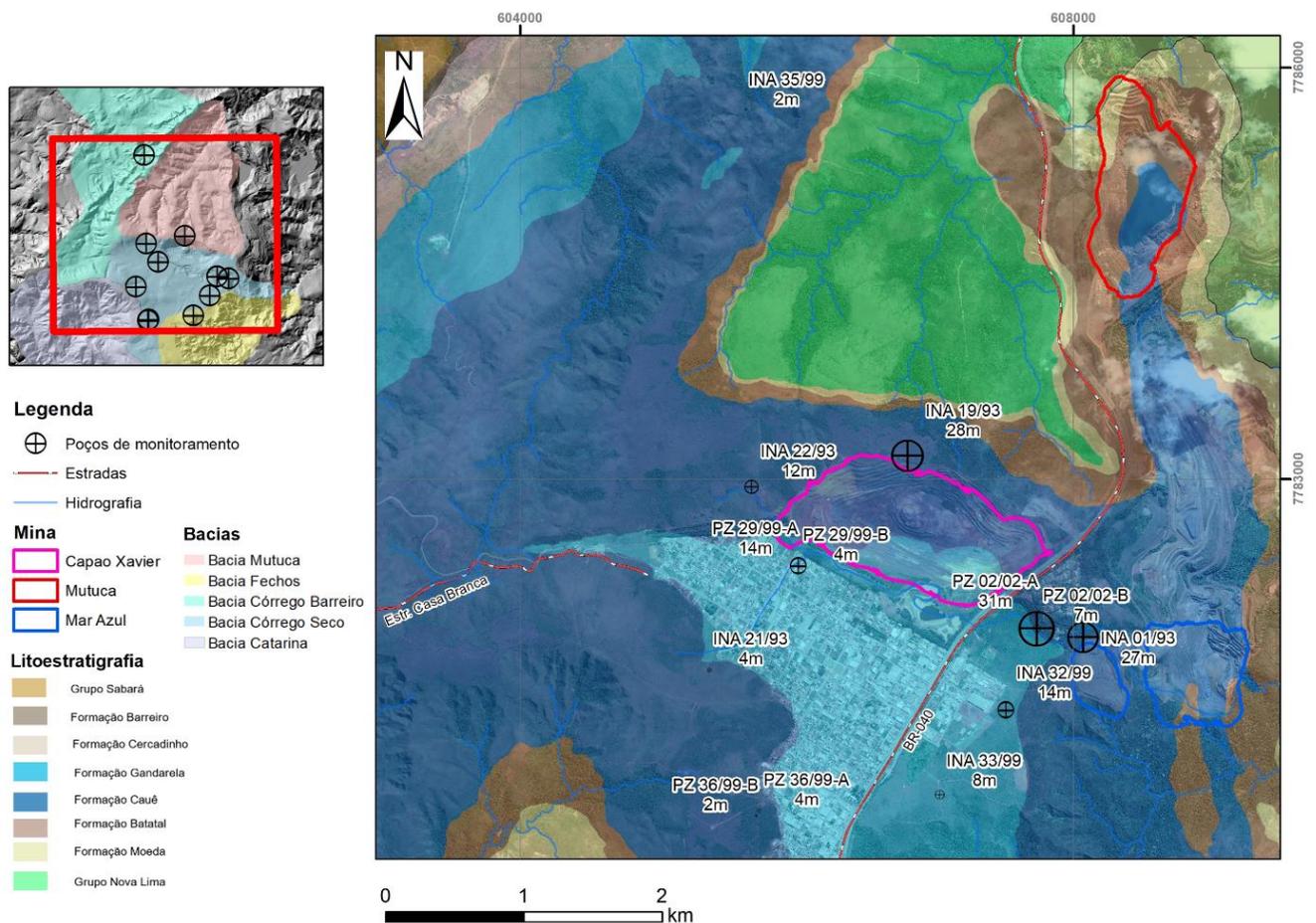
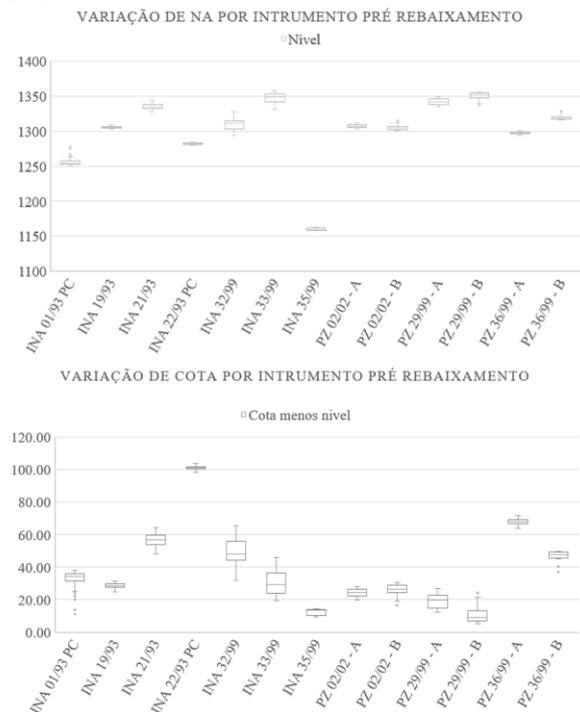


Figura 3.27 - Mapa com poços de monitoramento e indicação de variação de carga hidráulica entre os períodos pré 2004 e pós 2004. Nota-se redução dos valores principalmente para os poços alinhados NW/SE rumo às sub-bacias de Fechos e Córrego Seco.

Os maiores efeitos foram observados nos poços de sentido sudeste, rumo às sub-bacias de Fechos e Córrego Seco. A direção integra principalmente rochas da Formação Cauê (Itabiritos e variações saprolitizadas) e bordejando lateralmente o contato com a Formação Gandarela (Dolomitos, variações saprolitizadas e carbonatos), paralelo à direção destas camadas. As tendências de variação entre os ciclos podem ser observadas nos gráficos boxplot (Figura 3.28), os quais constam a diferença no nível potenciométrico em valor absoluto e a variação relativa entre o nível da leitura e a cota da superfície (Ambos em metros).

Para os instrumentos de câmara rasa, associados aos piezômetros com sufixo B, as variações são usualmente menores do que os de câmara profunda, sufixo A (Tabela 3.23). É observável aumento nas variações de cargas hidráulicas entre o máximo e mínimo, exceto para o INA35/99 e PZ 36/99-B, que representam os pontos de monitoramento mais distantes da cava, inseridos na região da Sub-bacia do Barreiro e Catarina, respectivamente.

Pré 2004



Pós 2004

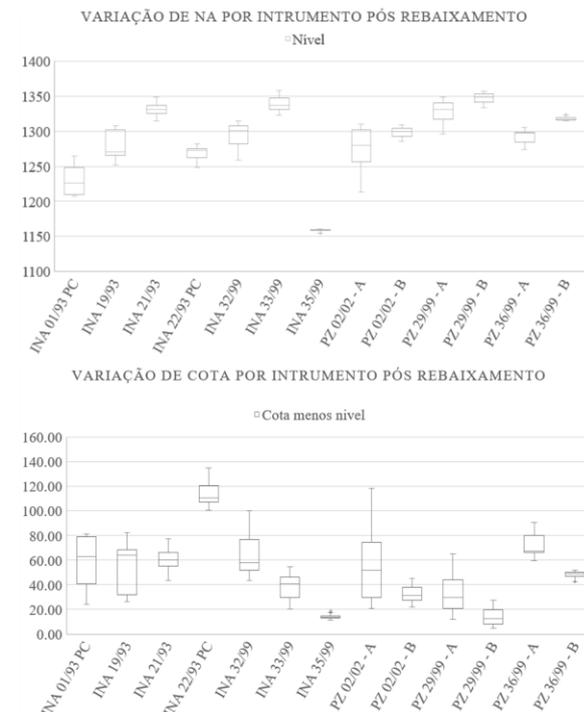


Figura 3.28 - Gráficos de boxplot das variações de cota e nível potenciométrico dos ciclos pré 2004 e pós 2004.

Tabela 3.23 - Relação estatística das variações entre os ciclos das variações de cota e nível potenciométrico dos ciclos pré 2004 e pós 2004

Nível d'água total													
index	PZ 02/02 - A	PZ 02/02 - B	PZ 36/99 - A	PZ 36/99 - B	INA 35/99	INA 19/93	INA 22/93 PC	PZ 29/99 - A	PZ 29/99 - B	INA 01/93 PC	INA 32/99	INA 33/99	INA 21/93
count	255	126	309	86	305	467	486	313	310	334	316	308	308
mean	1278	1299	1294	1318	1159	1284	1271	1330	1347	1238	1298	1340	1332
std	28	7	7	3	2	20	9	14	6	20	14	10	6
min	1213	1286	1274	1314	1154	1252	1248	1296	1333	1208	1259	1323	1315
25%	1259	1294	1289	1316	1158	1268	1264	1321	1342	1218	1290	1333	1329
50%	1285	1301	1297	1317	1159	1278	1274	1334	1349	1248	1302	1338	1333
75%	1303	1304	1299	1319	1160	1305	1280	1341	1353	1254	1309	1350	1337
max	1311	1315	1306	1329	1163	1309	1285	1349	1356	1278	1327	1358	1348
CV	2%	1%	1%	0%	0%	2%	1%	1%	0%	2%	1%	1%	0%
Nível d'água pré 2004													
index	PZ 02/02 - A	PZ 02/02 - B	PZ 36/99 - A	PZ 36/99 - B	INA 35/99	INA 19/93	INA 22/93 PC	PZ 29/99 - A	PZ 29/99 - B	INA 01/93 PC	INA 32/99	INA 33/99	INA 21/93
count	19	19	45	18	41	109	63	47	47	112	47	46	113
mean	1307	1305	1297	1319	1160	1306	1282	1342	1351	1256	1310	1347	1335
std	2	4	2	3	2	1	1	4	5	5	8	8	4
min	1303	1300	1293	1316	1159	1303	1279	1334	1337	1250	1293	1332	1328
25%	1305	1302	1296	1317	1159	1305	1281	1338	1348	1253	1303	1341	1332
50%	1307	1304	1297	1319	1159	1305	1282	1341	1352	1254	1311	1348	1335
75%	1309	1307	1298	1320	1162	1307	1283	1346	1354	1257	1315	1353	1338
max	1311	1315	1301	1329	1163	1309	1285	1349	1356	1278	1327	1358	1344
CV	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	0%
Nível d'água pós 2004													
index	PZ 02/02 - A	PZ 02/02 - B	PZ 36/99 - A	PZ 36/99 - B	INA 35/99	INA 19/93	INA 22/93 PC	PZ 29/99 - A	PZ 29/99 - B	INA 01/93 PC	INA 32/99	INA 33/99	INA 21/93
count	236	107	264	68	264	358	423	266	263	222	269	262	195
mean	1276	1298	1293	1318	1159	1278	1270	1328	1347	1229	1296	1339	1331
std	28	7	7	2	2	18	9	14	6	18	14	10	7
min	1213	1286	1274	1314	1154	1252	1248	1296	1333	1208	1259	1323	1315
25%	1257	1293	1285	1316	1158	1266	1263	1317	1341	1210	1282	1331	1326
50%	1279	1300	1297	1317	1159	1270	1272	1331	1348	1226	1301	1337	1331
75%	1301	1304	1299	1319	1160	1302	1276	1340	1353	1248	1307	1348	1337
max	1310	1309	1306	1324	1161	1308	1282	1349	1356	1265	1315	1357	1348
CV	2%	1%	1%	0%	0%	1%	1%	1%	0%	1%	1%	1%	1%
Δ Médias Pré - Pós	-31	-7	-4	-2	-2	-28	-12	-14	-4	-27	-14	-8	-4

Para interpretação dos mecanismos de fluxo e redes de contribuição, foram considerados os resultados da caracterização isotópica feita pela empresa MDGEO, cuja campanha de aquisição dos dados ocorreu nos meses de setembro e outubro nos anos de 2009 e 2010. Na região de estudo constam 10 pontos do levantamento, e os respectivos tempos de renovação (em anos) encontram-se na Figura 3.29. Os pontos de amostragem consistiram em regiões de nascentes ou poços tubulares, e os tempos de renovação foram calculados essencialmente utilizando as curvas de regressão do Trítio. Embora em função do seu tempo de meia vida ($T_{1/2}$) 12,43 anos, o Trítio é mais preciso para datar águas entre 0 e 50 anos (Santiago et al., 2008). Todavia, a utilização da curva do modelo de renovação exponencial foi aplicada, em integração com os métodos do modelo de fluxo em pistão - *piston flow model* (MDGEO, 2012).

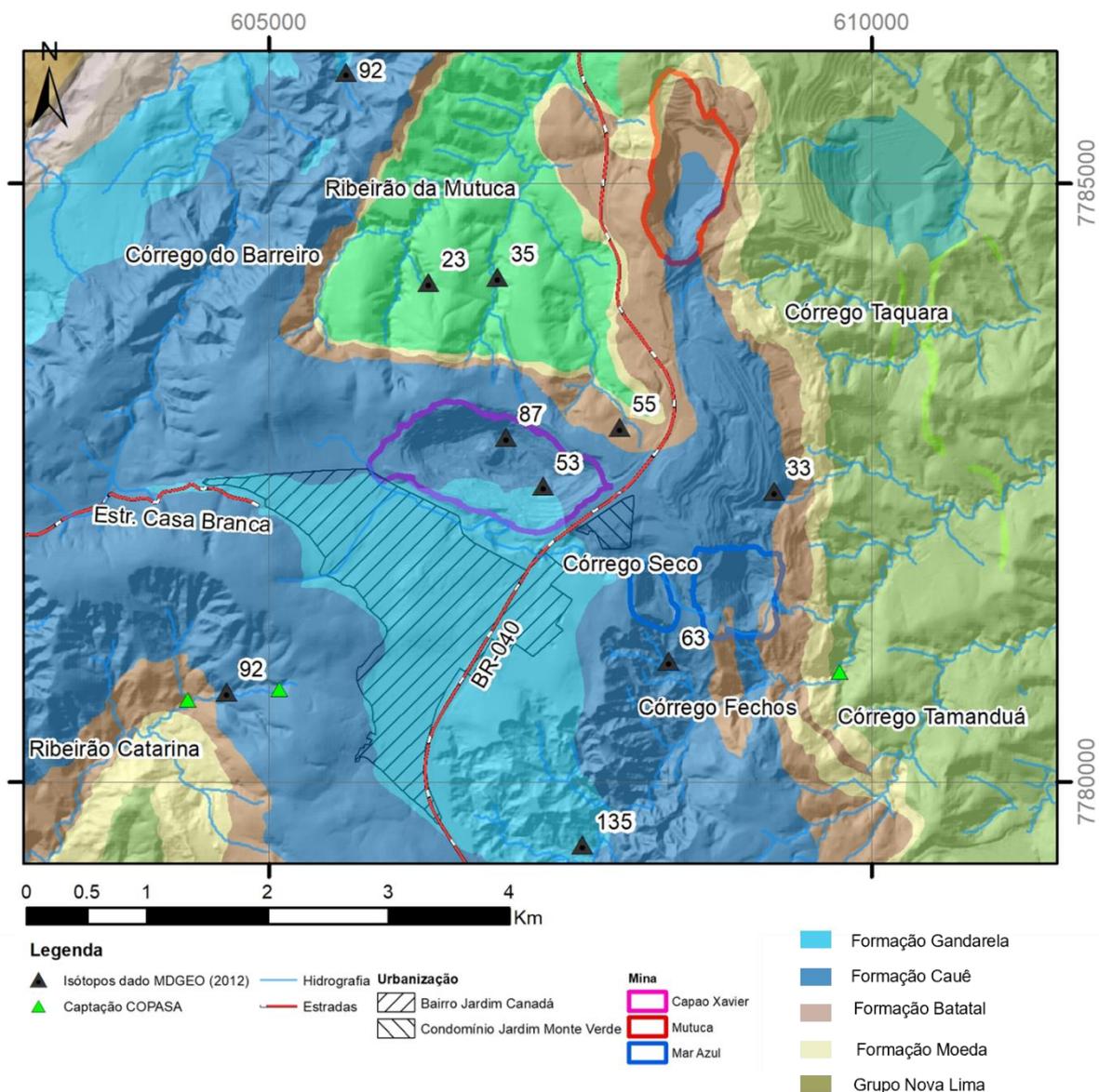


Figura 3.29 - Mapa dos pontos de caracterização isotópica com tempos de renovação das águas plotados em anos. Mapa litológico base Endo et al. (2020).

Com base na relação espacial da distribuição dos pontos amostrais e sua relação com o meio geológico, nota-se que águas relacionadas com circulação associada ao Aquífero Gandarela apresentam tempos de residência maiores. Os tempos de renovação da região, para os meios do Aquífero Cauê não são elevados e indicam fluxos com maior contribuição local.

A compartimentação de relevo local com cotas elevadas acima de 1400 m nos divisores, associados aos vales com altitude de 1000 m e sua relação com as estruturas subjacentes, resulta em certos conjuntos de interação entre os fluxos do pacote heterogêneo de sedimentos e suas relações como camada confinante ou camada aquífera. Os níveis de integração entre as componentes encontram-se no esquema conceitual apresentado na Figura 3.29, na qual são evidenciadas as principais direções de fluxo e suas redes de contribuição.

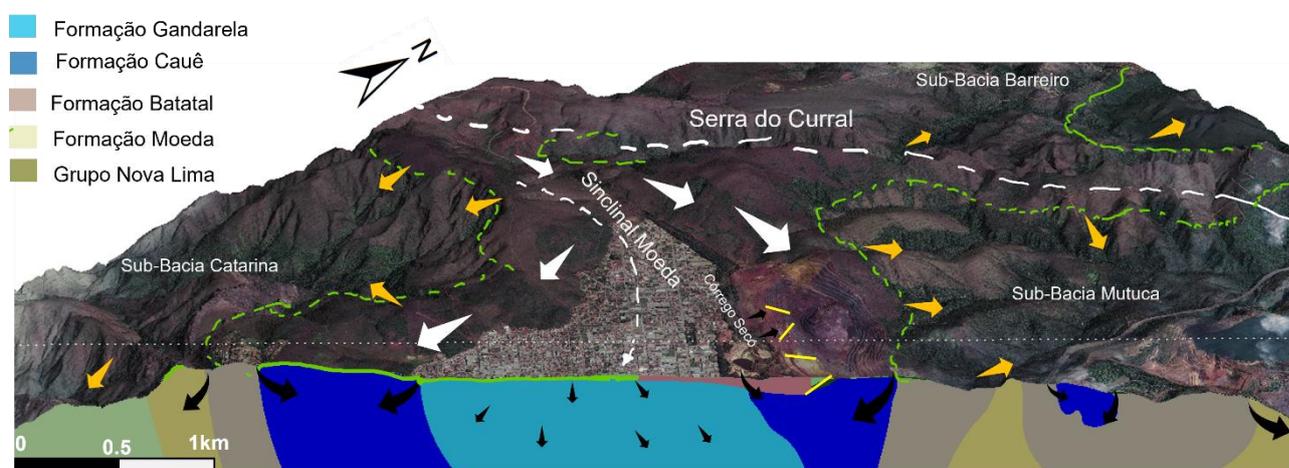


Figura 3.29 - Diagrama com a representação do modelo conceitual de fluxo com as direções principais de contribuição. As setas de cor laranja indicam a componente de fluxo regional associada a quebras relevo e contatos da cobertura com o meio sotoposto. Setas brancas indicam a componente de fluxo local no meio intergranular. Setas pretas indicam as componentes locais e regionais de fluxo verticais, nos quais também ocorreria a circulação de águas entre as formações Cauê e Gandarela. Os traços em verde indicam os limites das bacias controlados pelas coberturas de platôs. Linhas tracejadas em branco indicam o traçado do Sinclinal Moeda e Homoclinal Curral.

3.5 Discussão Integrada

As águas dos poços são predominantemente bicarbonatadas magnesianas, na qual o cálcio e magnésio ocorrem em proporções semelhantes, e o bicarbonato, o ânion predominante. No geral, 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, onde as superficiais e subterrâneas integram o mesmo tipo geral de classificação. O efeito de aumento da concentração local de alguns analitos se relaciona ao contato e contribuição das rochas da Formação Gandarela e carbonatos associados ao topo da Formação Cauê (Junia, 2017), como observado nos poços 9, 20 e 23 (Figura 3.30).

As relações entre as variações de pH e condutividade para os diversos pontos de amostragem superficiais, revela valores de pH neutros mesmo quando o meio de circulação da água superficial integra itabiritos silicosos, metaconglomerados ou quartzitos. Esta relação de tendência, associada com valores regulares, corrobora o efeito de mistura de águas entre aquíferos distintos, cujos mecanismos de interação possivelmente se relacionam aos conjuntos de fraturas que integram camadas de menor e maior capacidade de circulação de águas.

Os tempos de circulação, obtidos mediante a modelagem com trítio indicam que fluxos associados à região do platô do Bairro Jardim Canadá ocorrem de maneira mais lenta quando condicionados por zonas com maior espessura do manto de intemperismo. E que de maneira regional acompanham as variações de cota potencial com direções de fluxo favorecidas em torno das direções das camadas de formação ferrífera e suas variações associadas.

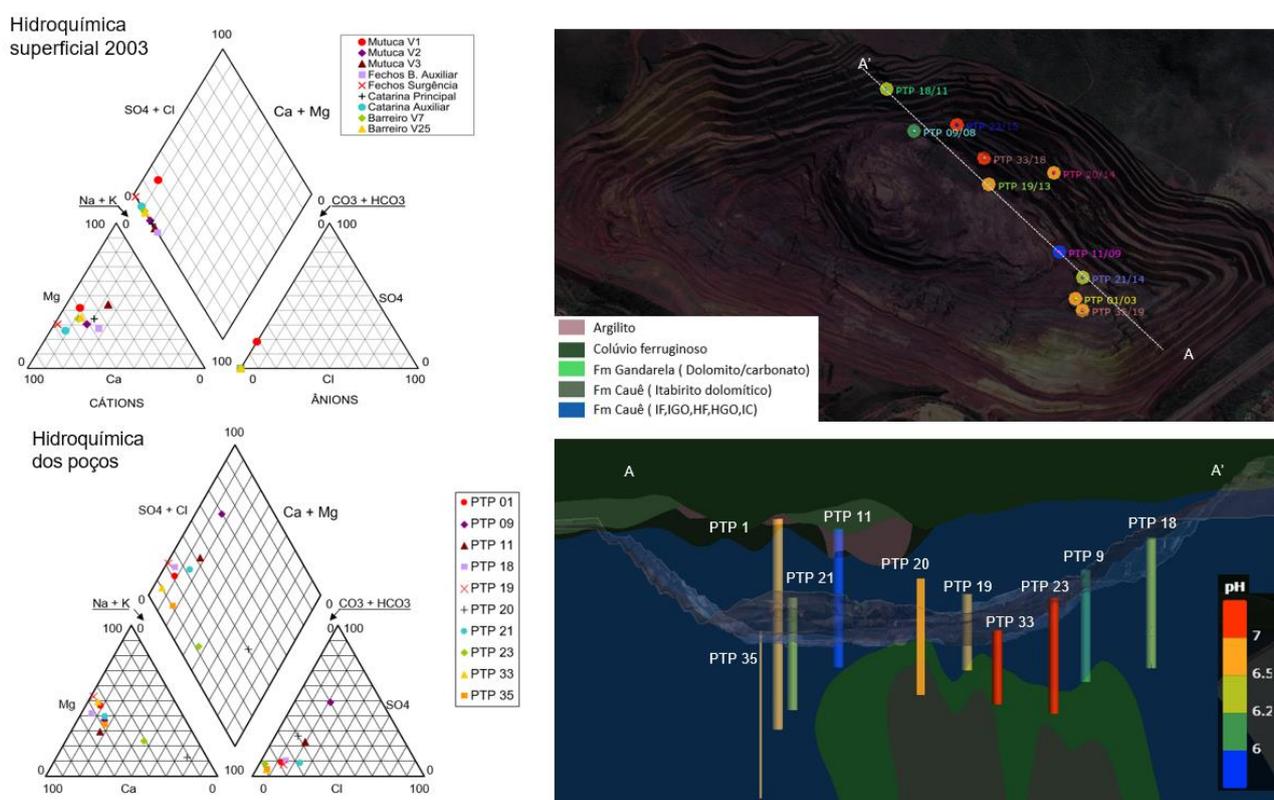


Figura 3.30 - Parâmetros hidroquímicos e relação com poços de bombeamento mediante interação com seção geológica.

Ao comparar as interações entre os elementos da trama rúptil e dúctil, aos traçados evidentes em anomalias aerogeofísicas é possível estabelecer relações que atuam no controle e conformação de bacias cenozoicas (Figura 3.31-B), condicionamento dos tipos petrográficos e consequentemente a presença de poços de alta vazão. Tal integração configura elementos característicos de um sistema de estruturas conjugadas do tipo Riedel com cinemática sinistral (Figura 3.31-A).

A análise feita com base nas direções principais de contato entre os tipos petrográficos, permite explicar a ampla variação tipológica existente, cuja formação se relaciona com o processo supergênico, discutido também por autores como Viel et al. (1987) e Ribeiro (2004). Notam-se fraturas abertas em itabiritos compactos, essencialmente compostos por quartzo e hematita, onde essas estruturas são recobertas por óxido de manganês, e relacionam com a passagem de fluxo de água laminar, cuja fonte dos óxidos possivelmente remete à percolação de águas entre os meios dos aquíferos Gandarela e Cauê (Figura 3.31-C).

Como efeito de abertura de fraturas interpretadas com componentes do tipo Ridel mediante suas reativações, se estabelece relação com as propriedades hidráulicas e suas variações locais, as quais podem conformar meios intergranulares mais ou menos eficientes (Bense et al., 2003). De certa forma o conjunto de lineamentos associados com a componente tipo X (Figura 3.31-A) se relaciona com as zonas de mais alta vazão e circulação de água. O componente associado ao plano de deslocamento principal (PDZ) integraria zona limítrofe para estas estruturas e remete a porções com menor permeabilidade.

Uma vez que é esperado que zonas de cisalhamento profundas condicionem redução na permeabilidade (Davis et al., 1999), a setorização e forma dos compartimentos gerados apresentam sistemas de fluxo preferencial estabelecidos mediante elementos de tectônica distensiva, cuja tendência principal envolve a reativação de estruturas pretéritas, efeito que se observa na parede sul da cava de CPX (Figura 3.31-B). A análise similar sob o entendimento destas estruturas típicas permite a correlação entre os elementos gerais dessa trama com as eventuais reativações de idade cenozoica (Lipski, 2002; Rossi, 2014). Tal mecanismo de deformação é descrito com boa representatividade e abrangência em meios geológicos em ambientes nos quais este conjunto de falhamentos ocorre entre meios de maior competência e meio intergranular (Davis et al., 1999; Ren et al., 2021).

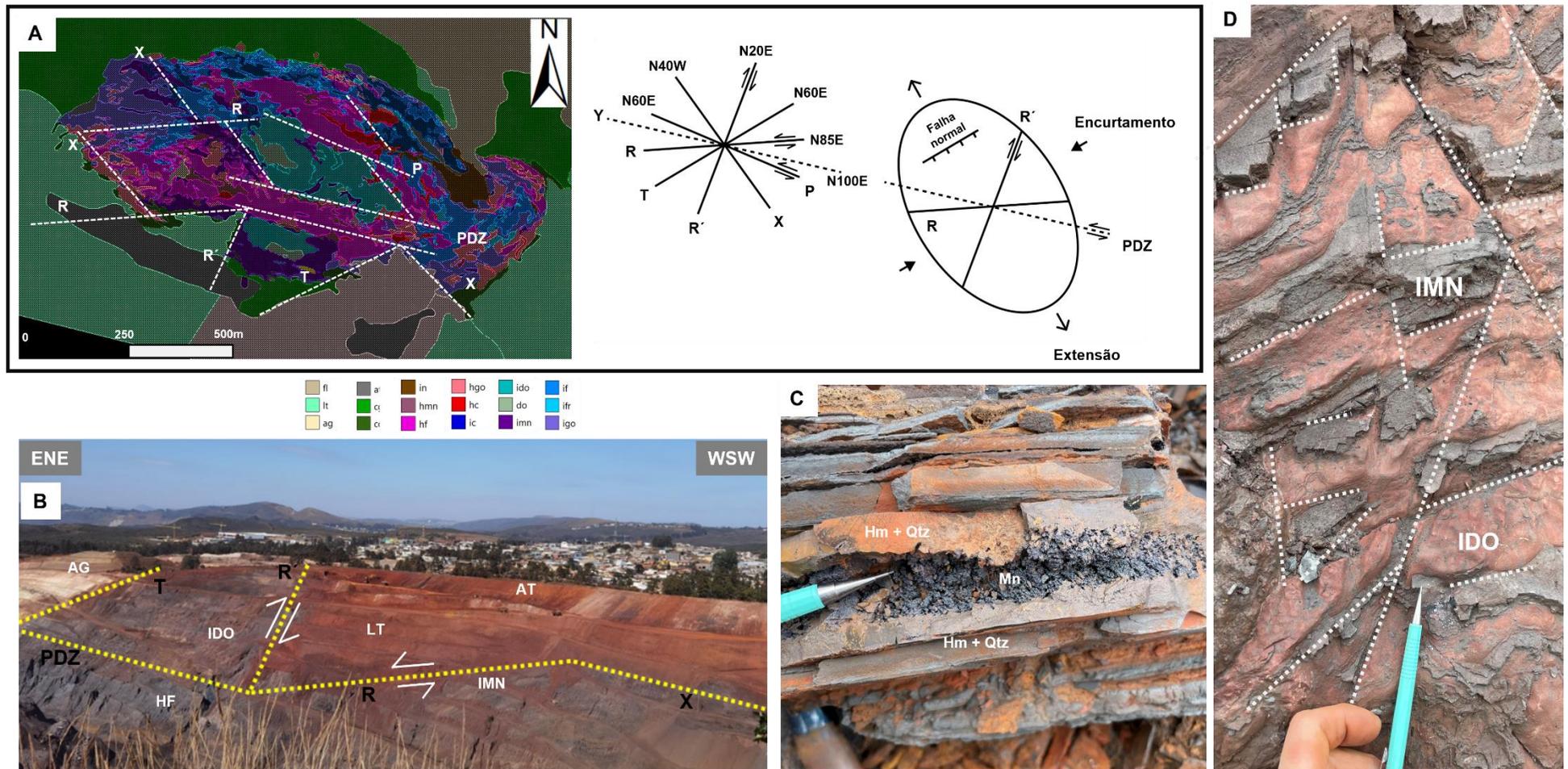


Figura 3.31 - Quadro com evidências da relação entre estruturas de deformação do tipo Riedel e controle das variações petrográficas da cava de Capão Xavier (CPX) e seus elementos associados com a formação de bacias cenozoicas e meio intergranular associado ao intemperismo de rochas da Formação Gandarela e Formação Cauê **A)** Mapa de tipos petrográficos da cava de Capão Xavier e conjunto de estruturas Riedel, com chave de classificação utilizada pela VALE at- aterro, ag- argilito, txi - talco xisto; imn - itabirito manganésífero; .igo - itabirito goetítico; ifr - itabirito friável rico; IF - itabirito friável; ido - itabirito dolomítico; ic - itabirito compacto; hmn - hematita manganésífera; hgo - hematita goetítica; hf - hematita friável; hc - hematita compacta e do - dolomito. **B)** Vista panorâmica de CPX com destaque para as componentes Riedel e controle das bacias cenozoica. **C)** Amostra de mão com detalhe para fratura aberta em IC composto por hematita -Hm e quartzo - Qtz com fratura preenchida por óxido de manganês - Mn. **D)** Relações de contato entre itabirito dolomítico e itabirito manganésífero associado ao conjunto de fraturas regulares locais, este comportamento se propaga na formação dos tipos petrográficos regionais.

CAPÍTULO 4 - GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

Na indústria mineral a aplicação dos princípios de hidrogeologia desempenha papel fundamental no componente operacional, manejo hídrico e administração ambiental. A caracterização do regime do aquífero é necessária durante o planejamento e desenvolvimento de minas a céu aberto e subterrâneas, em estruturas de deposição de materiais estéreis e rejeitos, além de barragens e tanques de lixiviação. De modo que impactos primários associados, integram a segurança e eficiência na extração do minério durante a fase operacional, como exemplo do rebaixamento e controles de despressurização. Outro ponto relevante envolve a proteção do aquífero de modo a garantir a qualidade das águas subterrâneas e superficiais (Smith, 2020). Dessa forma, para garantir operações seguras e sustentáveis, o setor é responsável por expressiva coleta de dados sobre o meio hídrico.

Outro aspecto relevante é que o desenvolvimento de empreendimentos minerários se dá em locais diversos, com amplo espectro de condições de geologia, relevo, clima gerando condições particulares da hidrogeologia e dos condicionantes dos demais recursos hídricos.

Ao analisar as interferências na região específica de estudo, faz-se necessário considerar a ocupação urbana, mediante perspectiva histórica. Sendo assim, o bairro Jardim Canadá, município de Nova Lima, representa uma 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 90, de modo que em 2016 Araújo & Moraes (2016) destacam a presença de mais de 1000 empresas sediadas no bairro. A ocupação territorial da região é marcada por interferências entre mineração e expansão urbana, tanto a condicionada por empreendimentos imobiliários, quanto a vinculada à expansão da indústria local, pautada em logística, serviços e comércio. Por outro lado, os usos da água para diferentes aplicações, suas fontes de abastecimento e o número de captações irregulares (não outorgadas ou não autorizadas) nos mananciais utilizados, também não são conhecidos.

Sob este efeito de ordenamento inconstante e inadequado, 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 domésticos não captados e não tratados do bairro que são direcionados para o Córrego Seco, o qual drena para Bacia do córrego Fechos (Figura 4.1).

Na Figura 4.1 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 pela 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 e novos galpões logísticos (Araújo & Moraes, 2016). Na Figura 4.1, nota-se que o ordenamento e ocupação desta porção são prévios a operação da cava de Capão Xavier, iniciada em 2004, porém já mediado entre as cavas de Mutuca e Mar Azul.

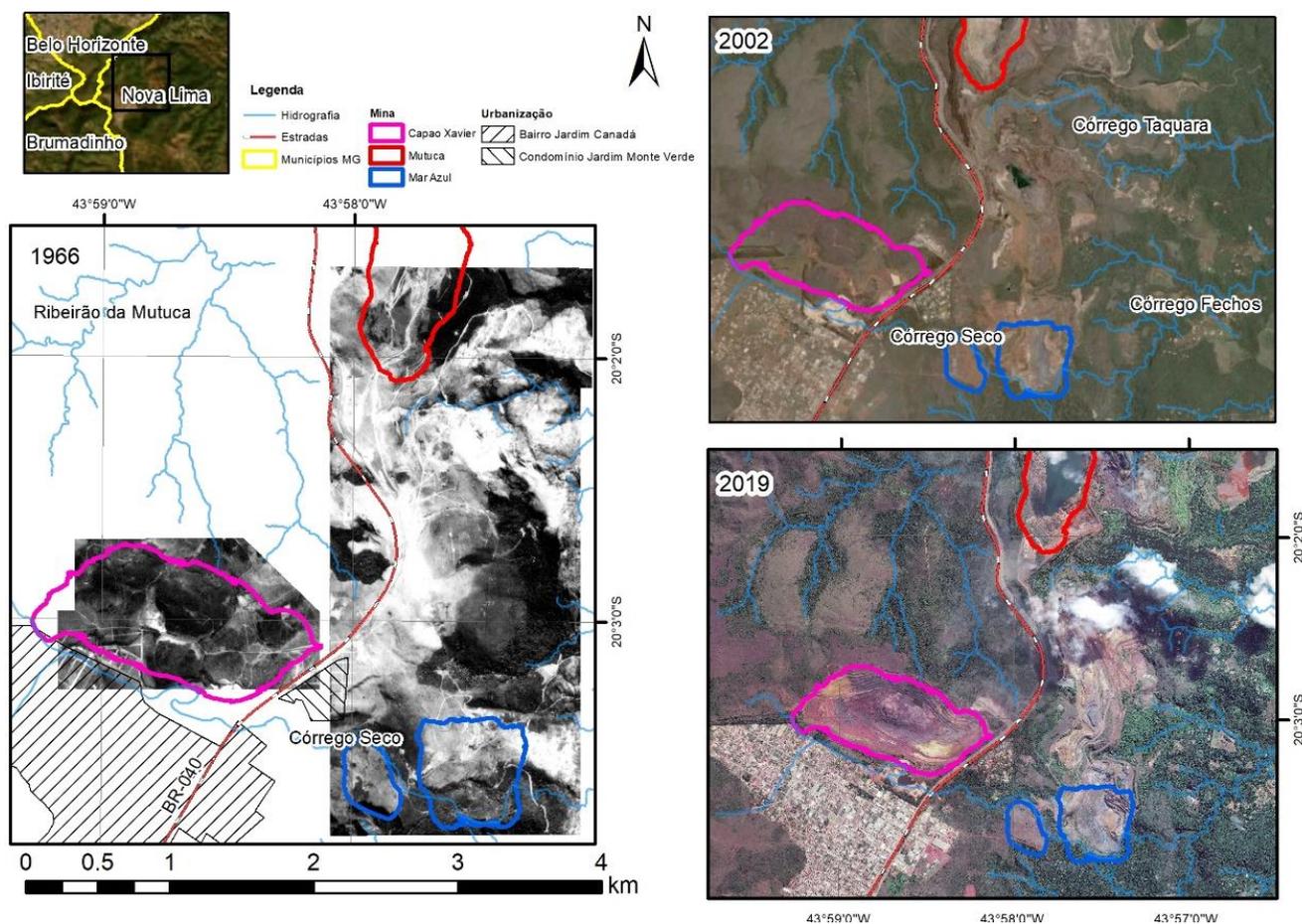


Figura 4.1 - Mapas de evolução temporal da ocupação territorial na região de estudo. Imagem de 1966 reconstituição VALE- GIS mineral. Imagem 2002 Google Earth. Imagem 2019 ortoimagem VALE- GIS mineral.

No contexto da gestão de recursos hídricos subterrâneos para a extração mineral, o manejo dos fluxos de entrada e saída do aquífero é necessário para mensurar as condições de trabalho em zona não saturada, ou seja, sem influência de água, mediante o controle do rebaixamento dos níveis potenciométricos. Este representa elemento crítico para garantir a estabilidade das paredes da cava, túneis e estruturas de disposição de estéril, uma vez que a presença de elevada poro pressão pode comprometer a estabilidade das encostas, estruturas de pilhas ou barragens (Fontes & Peroni, 2020).

As escalas nas quais os efeitos podem ocorrer variam entre centenas de metros a muitos quilômetros quadrados e com abrangência em domínios com dezenas de quilômetros quadrados (Smith, 2020). A caracterização das condições hidrogeológicas devem ser consideradas para o manejo de situações nas quais o potencial de contaminação ocorre nos rejeitos/estéreis e o

programa de remediação deve ser implantado para melhorar/aperfeiçoar os impactos no ambiente de recebimento. A quantificação dos efeitos potenciais indesejados deve ser aliada a medidas para minimizar estes impactos. Os quais requerem a caracterização detalhada dos fluxos do aquífero e principais direções do condicionamento na região da mina, além da definição acurada dos parâmetros hidráulicos.

Para região em estudo nota-se que o meio intergranular associado ao manto de intemperismo e o meio fraturado vinculado às rochas frescas (variações não alteradas do Supergrupo Minas) apresentam elevados valores de transmissividade, condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento o que corrobora a relevante função dos aquíferos da região para resiliência hídrica local e regional.

Nos estudos de manejo de recursos hídricos e segurança hídrica futura, são fundamentais as considerações sobre as condições climáticas, mediante variações da precipitação para entendimento dos mecanismos de recarga (Fetter, 1994), uma vez que esta variável controla as principais reservas e condições de circulação dos aquíferos. Esta perspectiva integra fator primário no direcionamento da variabilidade espaço-temporal das condições de recarga, pois a distribuição temporal da precipitação representa o elemento climático que mais diretamente afeta as condições de recarga dos aquíferos.

Em períodos mais recentes (principalmente nas últimas três décadas) são bastante relevantes as correlações entre as perturbações no clima e os níveis potenciométricos que indicam decréscimo para aquíferos ao redor do mundo, mesmo em regiões de clima úmido e tropical (Green et al., 2011; Amanambu, 2020). Este elemento deve ser levado em conta uma vez que as tendências atuais revelam expressivas variações nos padrões das chuvas quando comparados aos ciclos históricos (Pörtner et al., 2022).

Desta forma, com o aquecimento global e mediante eventos mais extremos de precipitação e evaporação, as condições e fluxo da água superficial tendem a ocorrer sobre variações mais críticas, o que justifica em parte, os efeitos observados na redução na recarga local, as quais não se relacionam unicamente com o processo de rebaixamento.

Outro ponto relevante nesta discussão, envolve a relativa recessão hídrica entre os anos de 2011 e 2019, seguida por aumento, a partir de 2020 de eventos extremos de precipitação, como chuvas que ocorreram em janeiro de 2020, com intensidades superiores a 180 mm em 2 horas (90 mm por hora), e também em janeiro de 2022 com eventos que entre 8 e 10 de janeiro acumularam 315 mm, e representaram valores 5 vezes acima do esperado para média da região (Inmet, 2022).

Eventos extremos de precipitação se relacionam fortemente com os picos de maiores vazões aferidos para todos os vertedores de monitoramento das vazões superficiais, cuja média

tende a ser menor, porém são notórios os valores de picos para períodos mais recentes (pós 2011). Condições como esta acentuam eventos de *runoff* e desfavorecem as condições de recarga uma vez que a superfície do Jardim Canadá, fora da mancha urbana, é recoberta por extensas coberturas com variadas condições de permeabilidade. E por isso, a manutenção do padrão das chuvas com precipitações regulares seria o principal controle para que as condições de fluxo de infiltração fossem efetivas na recarga mediante a transferência de plumas de umidade entre a zona vadosa e a saturada (Dias & Bacellar, 2021).

O incremento da expansão territorial não apenas do bairro Jardim Canadá, mas também da região metropolitana de Belo horizonte tende a aumentar a demanda por água subterrânea e as pressões por seus usos. A região do bairro representa importante região de recarga para relevantes bacias de captação. Neste contexto, a instalação de sistemas de recarga artificial configura importante medida a ser adotada no mérito de políticas públicas, para enfrentar os efeitos futuros das variações sazonais do clima. As formas de implantação e os ganhos ambientais de sua implementação abrangem o incremento efetivo nos fluxos de infiltração, melhoria da qualidade das águas, diminuição do escoamento superficial, elevação dos níveis potenciométricos entre outras vantagens (Campos et al., 2021; Cadamuro et al., 2005).

O cone de depressão do nível potenciométrico induzido pela atividade de rebaixamento afeta de maneira mais proeminente as adjacências da cava rumo a bacia de Fechos. Porém mediante o fim da atividade de bombeamento, prevê-se a formação de um lago no interior da cava. A formação do lago é uma condição que tende a se materializar mediante o preenchimento da água por pulsos temporais que progressivamente deverão ocasionar variações nos níveis equipotenciais locais até atingir a total inundação. Este modelo de estabilização, de maneira esquemática encontra-se ilustrado na Figura 4.2. Em função das condições de misturas e rápidos tempos de circulação os riscos associados a incrementos de interações químicas entre água e rocha tendem a ser mínimos (Bozan et al., 2022).

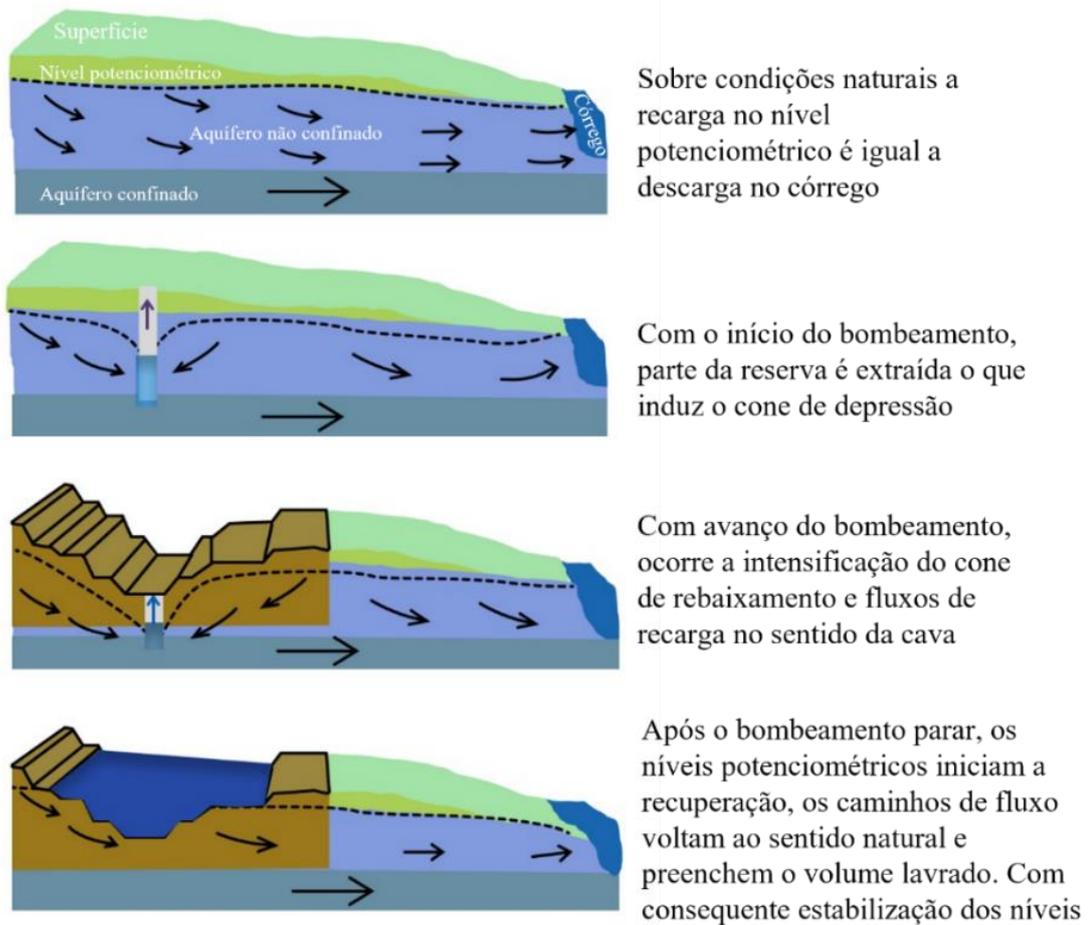


Figura 4.2 - Ilustração esquemática dos efeitos do bombeamento e recarga, com conceitos adaptados de Konivow & Bredehoeft (2020).

Por fim, com intuito de sistematizar as medidas de controle e mitigação gerais associadas aos efeitos das interações entre mineração e ambiente urbano, foi proposta a Tabela 4.1, na qual constam as ações aplicáveis de mitigação e controle indicadas para diferentes contextos e compartimentos afetados pelo desenvolvimento das atividades mineiras.

Tabela 4.1 - Síntese dos principais impactos potenciais associados com a atividade de mineração e medidas de controle aplicáveis.

Nicho	Impacto potencial	Como acontece	Aplicação de medidas no contexto de estudo	Medidas de controle e escalas
Poluição das águas	Contaminação orgânica	Contato com esgoto em áreas de apoio e adjacências	Aplicado	Tratamento biológico de efluentes
	Contaminação por óleos e graxas	Contato com resíduos de oficinas e oriundos de maquinário	Aplicado	Caixas separadoras de graxas e óleos
	Contaminação por cianeto e mercúrio	Contato com reagentes utilizados no beneficiamento do ouro	Não se aplica	Degradação química Filtros com carvão ativado Construção de barragens impermeabilizadas
	Mudanças de pH	Em mudança para caráter ácido, mediante contato com minério sulfetado ou carvão Em mudança para caráter básico, contato com calcário ou dolomito	Não se aplica Está relacionada a mudança em condições de maior circulação em meio básico. As condições de misturas de águas e tempos de circulação observados indicam que este não deve ser problema potencial essencialmente na fase pós operação e incorporação da cava como condição de corpo hídrico	Usualmente é feita a utilização de ácidos para neutralização de pH entre 6 e 9, porém a solução não se aplica no contexto da formação de grandes corpos hídricos
	Contaminação por metais pesados (Pb, Cd)	Contato com efluentes ácidos	Não se aplica	Condicionamento adequado de drenagens e isolamento destas
	Aumento de sólidos dissolvidos	Mediante aumento de nitrato, cloreto, fosfato, sódio, cálcio, magnésio ou ferro	Aplicável no contexto de ferro e manganês	Construção de caixas de decantação, para assentamento de particulados e aplicação de filtros na saída
	Contaminação por reagentes orgânicos	Efluentes do beneficiamento aplicados no processo de flotação. Com coletores (Amina) e depressores (Amido)	Não se aplica	Gestão adequada do reuso de águas e filtragem
	Mudanças de coloração	Contaminação por Ferro ou manganês cores avermelhadas e cores esbranquiçadas para argilas	Aplicado	Condicionamento adequado de drenagens Construção de tanques de decantação
	Contaminação por aumento de sólidos em suspensão	Incremento de material inerte nos corpos hídricos, derivado do não aproveitamento de sílica no beneficiamento	Aplicado	Reuso de águas no circuito hidráulico fechado , com a otimização máxima
	Aumento de turbidez	Contaminação por argilas e coloides mediante o condicionamento inadequado de drenagens	Aplicado	Condicionamento adequado de drenagens Construção de tanques de decantação

Tabela 4.1 - Continuação. Síntese dos principais impactos potenciais associados com a atividade de mineração e medidas de controle aplicáveis.

Nicho	Impacto potencial	Como acontece	Aplicação de medidas no contexto de estudo	Medidas de controle e escalas
Poluição das águas	Radioatividade	Associada a lavra de urânio e tório	Não se aplica	Isolamento das fontes Acondicionamento das drenagens
	Eutrofização associada aos cursos superficiais	Mediante processo de enriquecimento em nutrientes nos corpos lênticos com consequente explosão de microrganismos e decorrente eliminação de macrorganismos. Aumento de fósforo e nitrogênio	Aplicável, essencialmente na fase pós operação e incorporação da cava como condição de corpo hídrico	Monitoramento das condições de fósforo, nitrato e pH
	Desoxigenação	Redução do oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO)	Aplicável, essencialmente na fase pós operação e incorporação da cava como condição de corpo hídrico	Monitoramento dos parâmetros OD, DBO, DQO
Poluição do ar	Aumento de particulados sólidos	Material oriundo de detonação e movimentação de máquinas, ventos associados a frentes de lavra pilhas de estéreis e pátios de produtos, especialmente sobre materiais friáveis, com baixo valor de umidade	Aplicado	Enclausuramento da fonte e retenção do particulado sólido Aspersão de água Utilização de filtros estanque Pavimentação de vias permanentes
	Aumento de particulados gasosos	Monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxido nítrico e dióxido de silício, oriundos da queima de combustíveis fósseis	Aplicado	Filtros em escapamentos e motores Substituição de motores a combustão por elétricos
Poluição sonora	Impactos associados á ruídos e vibrações	Atividades de detonação, operação de maquinários como bombas, perfuratrizes, caminhões, fluxo de veículos leves	Aplicado	Construção de barreiras acústicas Plano de fogo adequado ás dimensões operacionais
Poluição Visual	Mudança no perfil topográfico	Formação de cavas, pilhas de materiais estéreis e produtos, barragens, áreas desmatadas	Aplicado	Revegetação e hidrossemeadura em taludes Manutenção do perfil topográfico Cortina arbórea

A seguir, são apresentadas descrições sucintas dos impactos potenciais, seus mecanismos de desencadeamento e medidas mitigadoras, especificamente para o caso de Capão Xavier, e integram:

Aumento da turbidez das águas: A elevação da turbidez se dá mais comumente em função da supressão da vegetação e aumento do escoamento superficial. Em diferentes etapas do ciclo de urbanização e desenvolvimento da cava, foram necessárias obras que envolveram a construção de acessos para sondas, terraplanagens para instalações de edificações como galpões, escritórios e obras de apoio. Nestes casos, a exposição da superfície dos solos ao trabalho erosivo das águas de chuvas faz com que ocorra aumento da turbidez das águas, mediante o aumento de particulados minerais (argilas, óxidos e hidróxidos). A minimização deste problema envolve medidas que contemplem a minimização da supressão da vegetação estritamente para áreas necessárias, instalação de baciões ou *sumps* secundários, e outros sistemas de dissipação de energia do escoamento pluvial. De modo que a efetividade destas medidas deve estar alinhada ao processo de revegetação de áreas sem interesse mineral e instalação de paisagismo nas adjacências das áreas de apoio.

Secamento de nascentes: Este efeito pode decorrer do rebaixamento dos níveis potenciométricos nas adjacências da cava, que é obrigatório para viabilização da própria lavra. Neste caso, os exutórios e cursos d'água alimentados por eles podem secar a partir da inversão do fluxo subterrâneo. Em alguns casos pode ter ocorrido a diminuição das vazões e não seu secamento total. Trata-se de um impacto comum em áreas de lavra mineral, sendo sua mitigação associada à manutenção das vazões naturais com a própria água do rebaixamento. Apesar de este ser um efeito potencial, insta destacar que no caso de Capão Xavier, foi aumentado a disponibilidade hídrica da região em função do bombeamento direcionado para o fornecimento de água à população.

Perda de captações subterrâneas: Os poços tubulares e escavados situados no raio dos cones de depressão da área de lavra sofreram perda no potencial de captação, cuja reversão é presumível ao final do ciclo de rebaixamento. Nos casos em que esta questão foi efetiva, a forma de mitigação envolve a construção de novos poços com maiores profundidades para manutenção do abastecimento da área afetada.

Contaminação das águas superficiais e subterrâneas: A mudança da qualidade dos recursos hídricos ocorre a partir de diferentes fontes de contaminantes, incluindo: efluentes das áreas de apoio (Dormitórios e refeitórios), hidrocarbonetos de áreas de abastecimento e oficinas, além de efluentes das áreas urbanas adjacentes. Para minimizar os efeitos da contaminação dos corpos hídricos e aquíferos são mantidas estações de tratamento de efluentes produzidos nas áreas de refeitórios; caixas separadoras e controles ambientais nas áreas de oficinas, de tancagem

e abastecimento de combustíveis; manutenção de aterros controlados e controle ambiental nas demais áreas de risco (Áreas de geração potencial de contaminantes). Contudo, o ponto mais crítico que gera poluição dos recursos hídricos na região, não é vinculado à atividade mineral, mas à ocupação urbana que não coleta e trata os esgotos das áreas de ocupação consolidada, com destaque para o bairro Jardim Canadá e as interações associadas ao Córrego Seco.

Limitação da recarga natural dos aquíferos: A diminuição da recarga está associada às áreas que foram impermeabilizadas para construção de obras civis (Galpões, refeitórios e portarias), vias de acessos, pátios de estacionamentos, e demais áreas compactadas. A minimização deste impacto pode ser alcançada com o desenvolvimento de sistemas de infiltração ou sistemas de recarga artificial dos aquíferos. Estas estruturas têm a função de maximizar a percolação das águas para a zona saturada dos aquíferos. Preferencialmente devem ser utilizadas águas captadas nas coberturas das edificações, por se tratar de águas limpas, desprovidas de particulados ou outras impurezas. Os sistemas de infiltração são diversos, sendo que os mais comuns são representados por trincheiras revestidas com manta geotêxtil permeável (Tipo bidin) e preenchidas com material de elevada condutividade hidráulica (seixos ou pedra marroada). Para máxima efetividade dos sistemas, estudos prévios de condutividade hidráulica a diferentes profundidades devem ser realizados. Outras iniciativas como baciões adjacentes a vias de acesso, manutenção de áreas verdes e jardins próximos às áreas de apoio também complementam as medidas mitigadoras.

Eutrofização do corpo hídrico lântico: A eutrofização corresponde ao aumento de nutrientes, desenvolvimento demasiado de organismos, consumo do oxigênio das águas de corpos hídricos como lagos ou outros corpos de água sem fluxo. O resultado da eutrofização é um corpo hídrico anóxico, no qual é frequente a de produção de gases e odores. No caso em estudo, este impacto pode ocorrer no lago formado após o descomissionamento da lavra de Capão Xavier. A eliminação do risco de eutrofização pode ser alcançada a partir do tratamento de efluentes orgânicos (Esgotos domésticos) antes que estes sejam lançados nos corpos receptores. Caso não seja possível tratar os efluentes, a alternativa é desviar o lançamento para corpos hídricos lóticos, com maior capacidade de depuração natural das cargas contaminantes.

Após o descomissionamento da lavra, é possível que seja necessário continuar o bombeamento dos poços para complementar o abastecimento público na região. No entanto, é essencial garantir a qualidade das águas subterrâneas dos aquíferos produtores. Para isso, é fundamental manter o monitoramento qualitativo dos aquíferos locais, com ênfase nos parâmetros que determinam a potabilidade das águas, além de indicadores específicos vinculados à atividade de produção do minério de ferro. É importante levar em consideração o histórico de possíveis misturas de águas dos aquíferos da região.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

A mensuração da sustentabilidade de aquíferos é uma questão-chave, que requer suporte de dados em diferentes indicadores relevantes. A variação do nível potenciométrico em ambientes de minas a céu aberto em fases de operação e pós-operacionais envolve interações entre vários fatores, incluindo hidrogeologia local, topografia, cobertura vegetal, clima e práticas de mineração.

A complexidade hidrogeológica da região resulta em misturas de águas de aquíferos sobrepostos e formação de padrões de fluxo hidrogeológico locais e intermediários, como observado nos parâmetros hidrodinâmicos obtidos do tratamento de dados de testes de bombeamento, das relações geomorfológicas regionais, dos resultados hidroquímicos e do monitoramento dos recursos hídricos superficiais.

Embora a melhor correlação dos dados de testes de bombeamento seja obtida com o método de um 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 integração dos dados hidroquímicos de todas as sub-bacias analisadas foi fundamental para observar os contrastes entre os períodos pré- e pós-operação da cava de Capão Xavier. Tais variações denotam o componente antrópico nos efeitos, que se relacionam com o processo de intensificação da ocupação urbana e industrial que as permeia, de modo que a variação de concentração em diversos parâmetros está também relacionada com a fase de maior redução das chuvas observadas no ciclo pós 2011.

A lavra e o conseqüente rebaixamento dos níveis potenciométricos resultam em misturas de águas entre diferentes compartimentos aquíferos, como pode ser observado nos resultados das análises de águas superficiais em períodos iniciais à lavra (2003 a 2011) e em momentos com maiores taxas de rebaixamento (2012 a 2020). Os resultados mostram mudanças significativas e inclusive inversões de concentrações de algumas substâncias. Apenas o córrego Seco mantém sua condição, uma vez que sempre recebeu esgotos domésticos sem tratamento.

Foi possível destacar os principais elementos e direções de controle da trama neotectônica, associados ao controle de direções com maior potencial de transmissão de água,

por meio da integração dos dados estruturais. As principais frequências demonstram forte relação com o controle das coberturas ao sul da cava.

Os lineamentos que marcam o contato entre a laterita e argilas com a formação ferrífera são correlacionáveis com componentes NW/SE e NE/SW, e estas direções estão associadas com os poços tubulares de mais alta vazão observáveis na cava, coincidindo com a componente NW/SE. Embora esses litotipos representem rochas compactas que teriam menor capacidade de transmissão de água, o índice de conexão entre fraturas é elevado, resultando em padrões de fluxo laminar, mesmo em períodos de menor taxa de precipitação. O paralelo entre as direções principais evidenciadas corrobora os processos de formação dos diferentes tipos litológicos ao longo da cava, condicionados pela lixiviação de sílica e carbonato, que levam à concentração de ferro e, de maneira subordinada, manganês.

Dessa forma, o avanço desses processos está associado não apenas ao campo de colapso e abatimentos oriundos de carstificação, mas também aos campos de tensão presentes a partir do Cenozoico. Em Capão Xavier, as evidências e registros de estruturas neotectônicas podem ser observadas nas relações de contatos planares, condicionadas por zonas de falhas normais entre os variados tipos de itabirito e os depósitos terrígenos recentes. Para essas zonas, são comuns fluxos de água mesmo em períodos de estiagem, os quais confluem para o aparecimento de erosões e rupturas dos tipos planares e em cunha.

Do ponto de vista da análise da interação de lavra de minérios *versus* recursos hídricos *versus* ocupação urbana, o caso da mina de Capão Xavier é considerado particular. Outras regiões de produção mineral não têm a proximidade urbana observada na região Metropolitana de Belo Horizonte ou se trata de minas de pequeno porte próximas a pequenos centros urbanos. Tendo em vista a rede de monitoramento existente previamente à ocupação, sua manutenção 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. Desta forma, esta dissertação apresentou resultados que podem ser aplicados na melhoria do modelo de fluxo existente para a mina de Capão Xavier

A Empresa VALE, além de produtora de minério de ferro, no Quadrilátero Ferrífero, também é uma grande produtora de água. A água proveniente de poços de rebaixamento e de poços produtores é fornecida para a companhia de saneamento e por isso tem-se grande preocupação com a gestão sustentável dos recursos hídricos nas áreas de operação de minas a céu aberto.

5.2 Recomendações

Investigar a influência das estruturas geológicas na hidrogeologia do local, utilizando técnicas como modelagem geológica 3D e geofísica para mapear as estruturas existentes e evidenciar novas feições, principalmente da trama rúptil. Isso permitiria a melhor compreensão da distribuição e relações de continuidade para construção de modelos hidrogeológicos numéricos mais precisos.

A continuidade do monitoramento hidroquímico deve perdurar após fim do ciclo minerário e abarcar análises de pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, nitrato, ortofosfato, sólidos totais dissolvidos, carbono orgânico dissolvido. A partir da fonte geogênica local (excluída contribuição por esgotos domésticos) não é esperada contaminação por metais pesados como chumbo, mercúrio, cádmio, cromo e níquel. Portanto, esses metais de transição não necessitam ser priorizados para o monitoramento futuro. É relevante manter análises de Ferro e Manganês, considerando os valores de background locais, que em função do meio geológico já são naturalmente mais elevados.

Seria importante o desenvolvimento de trabalhos que comparem diferentes áreas de mineração para avaliar a eficácia das práticas de monitoramento e mitigação implantadas em diferentes contextos. Isso poderia auxiliar na identificação de quais práticas são mais eficazes em diferentes condições geológicas e socioeconômicas e orientar a implantação de boas práticas em outras áreas de mineração.

Para garantir uma compreensão mais completa da hidrogeologia da região, podem ser realizados novos estudos isotópicos com maior suporte em amostras coletadas em poços de monitoramento e em poços de bombeamento. Com análises de Carbono 14 (Radiocarbono) para determinar a idade das águas subterrâneas possivelmente mais antigas (Oriundas de poços mais profundos de meios fraturados), e isótopos estáveis de hidrogênio e oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$) para identificar os modelos de fluxo locais e regionais, assim como para avaliar variações nas condições de recarga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ackerer, P., Trottier, N., Delay, F. 2014. Flow in double-porosity aquifers: Parameter estimation using an adaptive multiscale method, *Advances in Water Resources*, Volume 73, 2014, Pages 108-122, ISSN 0309-1708, <https://doi.org/10.1016/j.advwat>.
- Alkmim, F.F., Marshak, S.1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais Brazil: Evidence for a Paleoproterozoic collision and collapse in Quadrilátero Ferrífero. *Precamb. Res.*, 90:29-58.
- Amanambu, A. C., Obarein, O. A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S. S., Balogun, O, Oyebamiji A., Ochege, F. U. 2020. Groundwater system and climate change: Present status and future considerations, *Journal of Hydrology*, Volume 589, 2020, 125163, ISSN 0022-1694. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125163>.
- AMB. 2021. <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb-2021-ano-base-2020.pdf>. 11-13p.
- Amorim, L.Q., Rubio, R.F., Alkmim F.F. 1999. The effects of mining Capão Xavier Iron ore deposits on the water Supply of Belo Horizonte. Mine, Water & Environment. IMWA Congress Sevilla Spain.
- Araújo, L.E.M., Moraes, F.B. 2016. O 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. IV ENANPARQ. Porto Alegre.
- Azevedo, J.H. 2019. Fluxos Subterrâneos e Recarga do Sistema Aquífero Alter do Chão em Lateritos Amazônicos: Estudo de Caso em Porto Trombetas, Pará. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade de Brasília.
- Barenblatt, G.I., Zheltov I.P., Kochina, I.N.1960. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, (24):1286-1303.
- Barros, L., Magalhães, J.A. 2018. Morfogênese no Quadrilátero Ferrífero/MG no Quaternário Superior: Processos Fluviais e Condicionantes Paleoambientais na Bacia do Rio das Velhas. 19. 10.20502/rbg.v19i3.1305.
- Beato D. A. C., Monsorens A. L. M., Bertachini A. C.. 2005. 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
- Bense, V.F., Van den Berg, E.H., Van Balen, R.T. 2003. Deformation mechanisms and hydraulic properties of fault zones in unconsolidated sediments; the Roer Valley Rift System, The Netherlands. *Hydrogeology Journal*. DOI: 10.1007/s10040-003-0262-8.
- Blakely, R. J., 1996. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press. 464 p.
- Bozan, C., Wallis, I., Cook, P.G., Drogamaci, S. 2022. Groundwater-level recovery following closure of open-pit mines. *Hydrogeol J* 30, 1819–1832. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02508-2>
- Cadamuro, A.L.M.; Campos, J.E.G. 2005. Recarga Artificial de Aquíferos Fraturados no Distrito Federal: uma Ferramenta para a Gestão dos Recursos Hídricos. *Revista Brasileira de Geociências*. 35(1):89-98.
- Campos, J.E.G.C., Rodrigues, D.S., Rocha., A.B.A, Gonçalves, T.D. 2021. Diretrizes para Implantação de Recarga Artificial de Aquíferos no Domínio dos Cerrados do Brasil. Anuário do Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio de Janeiro. ISSN 0101-9759. DOI: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_35827.

- Carlos, D.U., Uieda, L., Barbosa, V.C.F. 2016. How two gravity-gradient inversion methods can be used to reveal different geologic features of ore deposit — A case study from the Quadrilátero Ferrífero (Brazil), *Journal of Applied Geophysics*, V130.P153-168. ISSN 0926-9851. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.04.011>.
- Castro, P.T.A., Varajão, A.D.D.C. 2020. O Cenozoico no Quadrilátero Ferrífero. . *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. 72-84p. 2020. P168-191.
- Castro E. C. C., Ferreira J. E., Castro P. de T. A.. 1998. Formação Cata Preta: uma nova unidade estratigráfica definida em rochas cenozóicas no extremo leste do Quadrilátero Ferrífero - MG. In: XL Congresso Brasileiro de Geologia, 1998, Belo Horizonte. *Anais do XL Congr. Bras. de Geol.* Belo Horizonte, v. 1. p. 82-82;
- CCG. 2015. <https://www.ccgaberta.com/pygeostat/index.html>. Centre for Computational Geostatistics.
- Davis, G.H., Bump, A.P., García, P.E., Ahlgren, S.G. 2000. Conjugate Riedel deformation band shear zones. *Journal of Structural Geology*. 22. 169-190. DOI: 10.1016/S0191-8141(99)00140-6.
- Dias, J.C.S., Bacellar, L.A.P. 2021. A hydrogeological conceptual model for the groundwater dynamics in the ferricretes of Capão Xavier, Iron Quadrangle, Southeastern Brazil, *CATENA*, Volume 207.
- Endo, I. 1997. Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais. São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 243p.
- 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. 2020. Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. 72-113p.
- Farina F., Albert C., Dopico C. M., Aguilar C. G., Moreira H., Hippert J., Cutts K., Alkmim F. F., Lana C. C. 2016. The Archean-Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil: current models and open questions. *Jour. South Am. Earth Sci.* 68, 4-21.
- Ferreira, C.A., Palmieri, H.E.L., Menezes, M.A de B.C., Auler, L.M.L. 2017. Hydrochemical Assessment of Spring Waters from the Iron Quadrangle Region, Minas Gerais, Brazil. *American Journal of Water Resources* DOI:10.12691/ajwr-5-2-2.
- Fetter, C.W. 1994. *Applied Hydrogeology*. 4th Edition. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey. 598p.
- Fontes, M. P., & Peroni, R. de L. 2020. Influence of water level in mine sequencing applied to strategic mining planning. *REM - International Engineering Journal*, 73. <https://doi.org/10.1590/0370-44672019730082>
- Fossen, H. 2020. Fault classification, fault growth and displacement. DOI: 10.1016/B978-0-444-64134-2.00007-9.
- FRASA. 2020. Mina de Capão Xavier, Relatório de Acompanhamento Hidrogeológico. Ciclo Hidrogeológico 2018/2019. Relatório Técnico, Belo Horizonte, Vale.
- Gomes, A.W. 2019 Impactos da Variabilidade Temporal do Regime Pluviométrico da Recarga de Aquíferos: Estudo de Caso em Caetité, BA. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade de Brasília.
- Green, T. R., Taniguchi M., Kooi, Henk., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Hiscock, K. M., Holger., Treidel A.A. 2011. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater, *Journal of Hydrology*, Volume 405, Issues 3–4, 2011, Pages 532-560, ISSN 0022-1694. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.002>.
- Eggsleder, M.S., Alexander, R., Cruden, R., Hilke J.D., Leigh, N. 2017 The role of deformation in the formation of banded iron formation-hosted high-grade iron ore deposits, Hamersley Province (Australia), *Precambrian Research*, Volume 296, 2017, Pages 62-77, ISSN 0301-9268, <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.04.034>.

- Hantush, M.S. Modification of the theory of leaky aquifers. *Journal of Geophysics Research*, 65(11):3713-3725. 1960.
- Hasui, Y. 1990. Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil. In: Workshop sobre Neotectônica e Sedimentação Cenozoica Continental no Sudeste Brasileiro, 1, Belo Horizonte. Boletim. Belo Horizonte, SBG-MG. p.1-31
- Inmet. 2022. Acessado em 15/10/2022. <https://portal.inmet.gov.br/noticias/inmet-divulga-o-diagn%C3%B3stico-das-chuvas-ocorridas-no-per%C3%ADodo-de-08-a-10-de-janeiro-de-2022-em-minas-gerais>.
- Junia, N.L.D.C.D. 2017. Caracterização Mineralógica, Geoquímica e Tecnológica das Formações Ferríferas Carbonáticas do Depósito de Jangada, Visando aproveitamento Econômico, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal De Minas Gerais.
- Konikow, L.F., Bredehoeft, J.D. 2020. Groundwater Resource Development: Effects and sustainability. The Groundwater Project. ISBN: 978-1-7770541-4-4. 96 P
- Lazarim, H.A., Loureiro C.O. 2000. Modelagem Hidrogeológica Computacional do Sistema de Fluxo de Águas Subterrâneas no Bairro Jardim Canadá - Quadrilátero Ferrífero, Nova Lima, MG. ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas.
- Lipski, M. 2002. Tectonismo Cenozoico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. DEGEO/EM/UFOP, Ouro Preto.
- MDGEO. 2012. Caracterização isotópica dos aquíferos Cauê e Gandarela nas áreas do sinclinal Moeda e homoclinal Serra do Curral. Relatório Interno. VALE
- Motta, E.G.M., Santos, P.A., Ribeiro, D.T., Cunha Filho, E.M.C. 2016. Incorporating mineralogical and density parameters in ferrous resource evaluation using Mineralogical Norm Calculation—MNC. In Proceedings of the 24th World Mining Congress, Rio de Janeiro, Brazil, 18–21. Volume 13, pp. 209–221.
- Moench, A.F. Double porosity models for fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resources Research*. 20(7):831-846. 1984
- Mourão, M.A.A. 2007. Caracterização Hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 94-136p.
- Neves, B. B. B., Fuck, R.A., Pimentel, M.M. 2014. The Brasiliano collage in South America: a review. *Brazilian Journal of Geology*. <https://doi.org/10.5327/Z2317-4889201400030610>.
- NRCAN. 2020. <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/minerals-mining/minerals-metals-facts/iron-ore-facts/20517>. Acessado em 18/03/2022
- Owor, M., Okullo, J., Fallas, H. 2022. Permeability of the weathered bedrock aquifers in Uganda: evidence from a large pumping-test dataset and its implications for rural water supply. *Hydrogeol J* **30**, 2223–2235. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02534-0>
- Paula, T.L.F., Campos, J.E.G. 2016. Aquíferos com fluxos controlados simultaneamente por porosidade intergranular e planar: Aplicação a rochas metassedimentares do Alto Paraguai, MT. RBRH. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(1):11-24.
- Pires, F. R. M. 1979. Structural Geology and Stratigraphy at the Junction of the Curral Anticline and the Moeda Syncline, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. PhD Dissertation, Michigan Technological University. 220p.
- Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., Rama, B. 2022. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 37–118, doi:10.1017/9781009325844.002.
- Ramos, M.L.S., Cordeiro, V.F., Fernandes, R.A. 2020. Histórico e Arcabouço Hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero. *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. 382-413p.

- Ren, J., Zhang, Z., Gai, H., Kang, W. 2021. Typical Riedel shear structures of the coseismic surface rupture zone produced by the 2021 Mw 7.3 Maduo earthquake, Qinghai, China, and the implications for seismic hazards in the block interior. *Natural Hazards Research*. DOI: 1. 10.1016/j.nhres.2021.10.001.
- Ribeiro, D. T. 2004. Enriquecimento Supergênico de Formações Ferríferas Bandadas: Estruturas de Colapso e Desordem. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Rio de Janeiro. 123p.
- Ribeiro, D., Moraes, I., Kwitko-Ribeiro, R., Braga, D., Spier, C., Santos, P. 2021. From Fresh Itabirites and Carbonates to Weathered Iron Ore: Mineral Composition, Density and Porosity of Different Fresh and Altered Rocks from the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Minerals* 2021, 11, 29. <https://doi.org/10.3390/min11010029>
- Rossi, D.Q. 2014. Estratigrafia e arcabouço estrutural da região de Fábrica Nova, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Dissertação de mestrado. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. 103 p.
- Roy Hill. 2020. Roy Hill Iron Ore Pty Ltd - Revised Proposal for the Roy Hill Iron Ore Mine - Environmental Review. 176p
- Saadi, A. 1993. Neotectônica da Plataforma Brasileira: esboço e interpretação preliminares. *Geonomos*, 1(1): 1-15.
- Samuels, P., Gilchrist, M. 2014. Pearson Correlation. Stats Tutor. University of Sheffield
- Santiago, M.F., Frischkorn, H., Silva, C.M.S.V. 2008. Métodos Isotópicos. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. CPRM/LABHID. 3a Edição Revisada e Ampliada. 255-264p.
- Shinzato, E., Carvalho Filho, A. 2005. Projeto APA Sul Região Metropolitana de Belo Horizonte: Estudos do meio físico, pedologia. Belo Horizonte: CPRM/EMBRAPA/SEMAD.
- Smith, L. 2020. Hydrogeology and Mineral Resource Development. The Groundwater Project. ISBN: 978-1-77470-002-0
- Spier, C.A., Vasconcelos, P.M., Oliveira, S.M.B. 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the evolution of lateritic iron deposits in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Chem. Geol.* 234, 79–104.
- Theis, C.V. 1940. The source of water derived from wells— Essential factors controlling the response of an aquifer to development: *Civil Engineering*, v. 10, no. 5, p. 277–280.
- Viel R.S., Moreira P.C.H., Alkmin F.F. 1987. Faciologia da Formação Cauê e gênese do minério de ferro friável de Águas Claras Serra do Curral-MG. In: *Simpósio Sobre Sistemas Depositionais No Pré-Cambriano*, Ouro Preto. p. 137-153.
- Warren, J.E., Root, P.J. The behavior of naturally fractured reservoirs. *Society of Petrol. Engrs. Journal*, 3:245-255. 1963.
- WorleyParsosns. 2012. Pilbara Iron Ore Project. Groundwater Impact Assessment. 352p.

ANEXO I - Configurações para confecção de gráficos no Python

```
# Importações iniciais
import numpy as np
import pandas as pd
#!pip install pandas-profiling==2.7.1
#from pandas_profiling import ProfileReport
import seaborn as sns
# to make this notebook's output stable across runs
np.random.seed(42)
# Configuração da imagem
%matplotlib inline
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
plt.rcParams['axes.labelsize'] = 20
plt.rcParams['xtick.labelsize'] = 20
plt.rcParams['ytick.labelsize'] = 20

from scipy.stats import linregress

# we are going to use pygeostat as main package for geostatistical algorithms
# http://www.ccgalbarta.com/pygeostat/welcome.html
try:
    import pygeostat as gs
except:
    !pip3 install pygeostat
    import pygeostat as gs
gs.get_executable(source='GSLIB')
#histograma
mtqpos = pd.read_csv ("mut_q_pos.csv")
lim_inferior = 4
lim_superior = 200
#
dat_temp= mtqall[(mtqall['MUT 01/94'] > lim_inferior) & (mtqall['MUT 01/94'] < lim_superior)].copy()

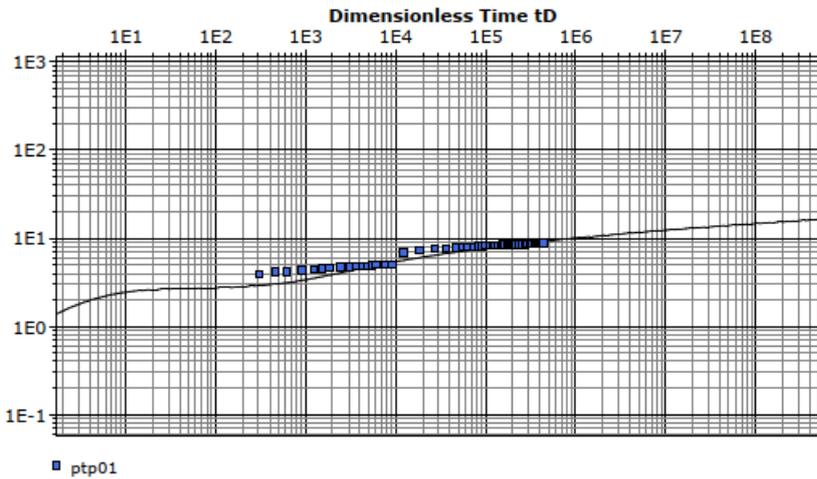
_ = gs.histogram_plot(dat_temp,
                      var='MUT 01/94',
                      title='MUT 01/94 Q(m/s) histogram',
                      color='green',
                      #lower=10,
                      #upper=20,
                      #xlim=(30,40)
                      )
fig = _.get_figure()
fig.savefig('mt1_q_all.jpg',bbox_inches='tight',dpi=200)

#gráfico pearson
mtv1all = pd.read_csv ("mut_v1_all.csv")
mask = np.zeros_like(mtv1all.corr())
triagle_indices = np.triu_indices_from(mask)
mask[triagle_indices]= True

plt.figure(figsize=(15,15))
#sns.heatmap(df.corr(),annot = True, linewidths=0.5, cmap='RdBu_r',mask=mask)
svm= sns.heatmap(mtv1all.corr(),annot = True,annot_kws={'size': 21}, linewidths=0.5, cmap='RdBu_r', mask=mask)
#Save image
figure = svm.get_figure()
figure.savefig('mt_v1_all.jpg',bbox_inches='tight',dpi=200)
```

ANEXO II - Gráficos de rebaixamento e análise de parâmetros

Location:	Pumping Test: PTP01	Pumping Well: ptp01
Test Conducted by:		Test Date: 8/7/2005
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 10/24/2022
Aquifer Thickness: 190.00 m	Discharge: variable, average rate 146.48 [m³/h]	

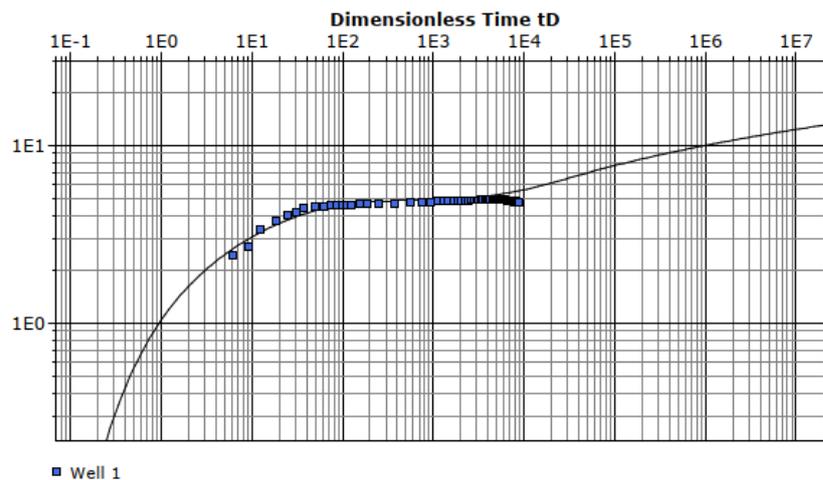


Calculation using Double Porosity

Observation Well	Transmissivity [m²/s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Sigma	Lambda	Radial Distance to PW [m]
ptp01	1.05×10^{-3}	5.52×10^{-6}	1.28×10^{-2}	1.00×10^2	1.00×10^{-1}	0.13

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 01.

Location:	Pumping Test: Ptp 02	Pumping Well: Well 1
Test Conducted by:		Test Date: 6/21/2005
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 10/25/2022
Aquifer Thickness: 170.00 m	Discharge: variable, average rate 54.746 [m³/h]	

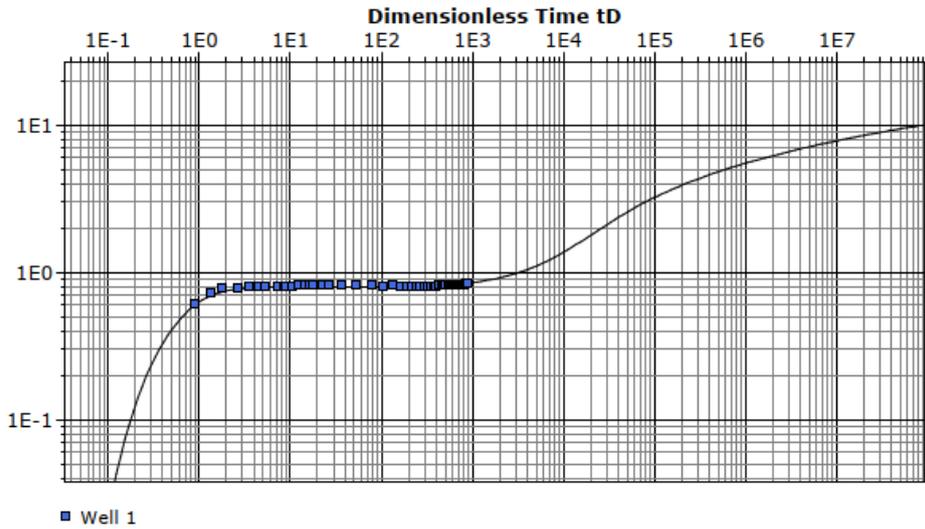


Calculation using Moench Fracture Flow

Observation Well	Transmissivity [m²/s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Sigma	Gamma	SF	Radial Distance to PW [m]
Well 1	5.74×10^{-5}	3.38×10^{-7}	1.89×10^{-2}	1.00×10^2	1.00×10^{-1}	1.00×10^0	0.17

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 02.

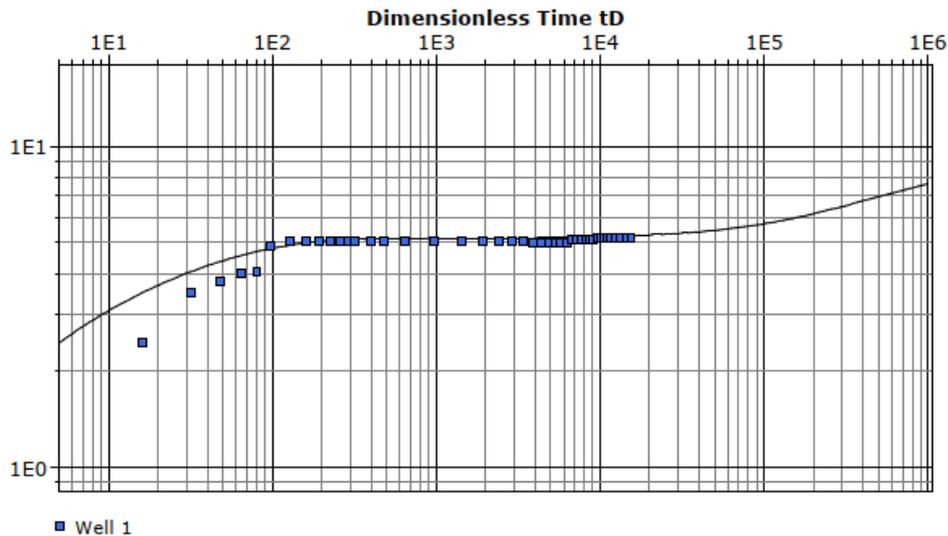
Location:	Pumping Test: Ptp 03	Pumping Well: Well 1
Test Conducted by:		Test Date: 6/4/2005
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 10/27/2022
Aquifer Thickness: 91.00 m	Discharge: variable, average rate 121.61 [m³/h]	



Calculation using Double Porosity						
Observation Well	Transmissivity [m²/s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Sigma	Lambda	Radial Distance to PW [m]
Well 1	5.71×10^{-5}	8.27×10^{-7}	2.17×10^{-3}	9.18×10^3	1.10×10^0	0.17

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 03.

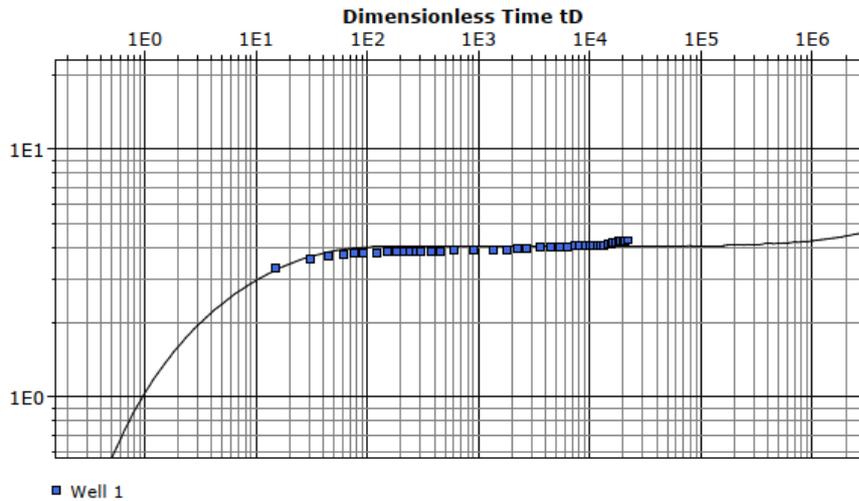
Location:	Pumping Test: Pumping Test 1	Pumping Well: Well 1
Test Conducted by:		Test Date: 4/10/2005
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 10/27/2022
Aquifer Thickness: 183.00 m	Discharge: variable, average rate 13.873 [m³/h]	



Calculation using Double Porosity						
Observation Well	Transmissivity [m²/s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Sigma	Lambda	Radial Distance to PW [m]
Well 1	1.20×10^{-5}	6.57×10^{-8}	1.52×10^{-3}	1.07×10^3	7.35×10^{-3}	0.17

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 04.

Location:	Pumping Test: Pumping Test 1	Pumping Well: Well 1
Test Conducted by:		Test Date: 2/16/2006
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 10/30/2022
Aquifer Thickness: 135.96 m	Discharge: variable, average rate 116.02 [m³/h]	

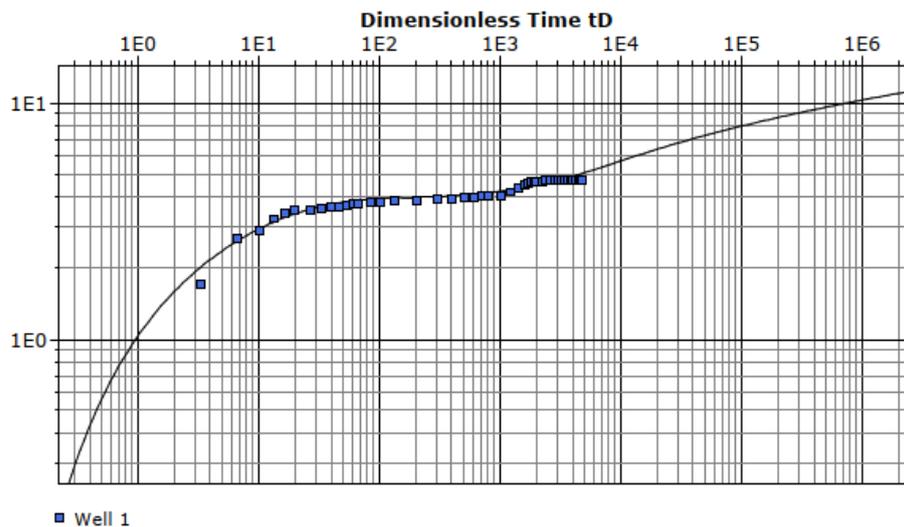


Calculation using Double Porosity

Observation Well	Transmissivity [m²/s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Sigma	Lambda	Radial Distance to PW [m]
Well 1	4.33×10^{-4}	3.19×10^{-6}	5.82×10^{-2}	1.00×10^5	2.29×10^{-2}	0.17

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 05.

Location:	Pumping Test: Pumping Test 1	Pumping Well: Well 1
Test Conducted by:		Test Date: 3/4/2006
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 10/30/2022
Aquifer Thickness: 167.00 m	Discharge Rate: 72 [m³/h]	

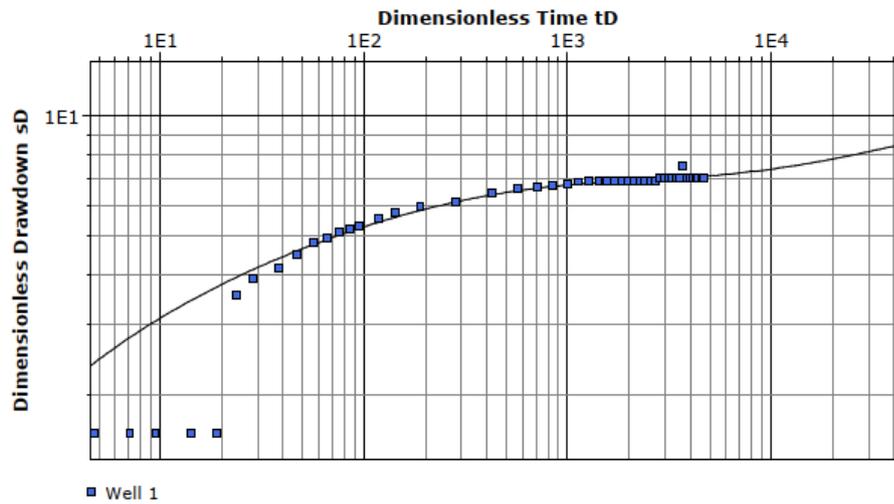


Calculation using Double Porosity

Observation Well	Transmissivity [m²/s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Sigma	Lambda	Radial Distance to PW [m]
Well 1	1.01×10^{-4}	6.03×10^{-7}	6.06×10^{-2}	7.67×10^1	2.55×10^{-2}	0.17

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 06.

Location:	Pumping Test: Pumping Test 1	Pumping Well: Well 1
Test Conducted by:		Test Date: 8/24/2007
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 11/2/2022
Aquifer Thickness: 162.51 m	Discharge: variable, average rate 48.748 [m ³ /h]	

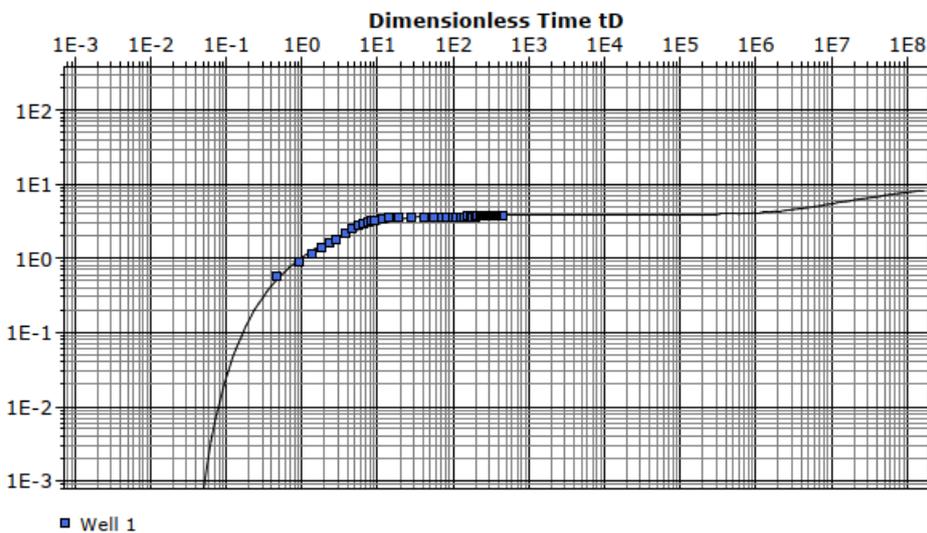


Calculation using Double Porosity

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Sigma	Lambda	Radial Distance to PW [m]
Well 1	7.37×10^{-5}	4.54×10^{-7}	3.17×10^{-2}	1.91×10^1	1.39×10^{-3}	0.17

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 07.

Location:	Pumping Test: Pumping Test 1	Pumping Well: Well 1
Test Conducted by:		Test Date: 10/1/2008
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 11/2/2022
Aquifer Thickness: 225.00 m	Discharge: variable, average rate 14.016 [m ³ /h]	

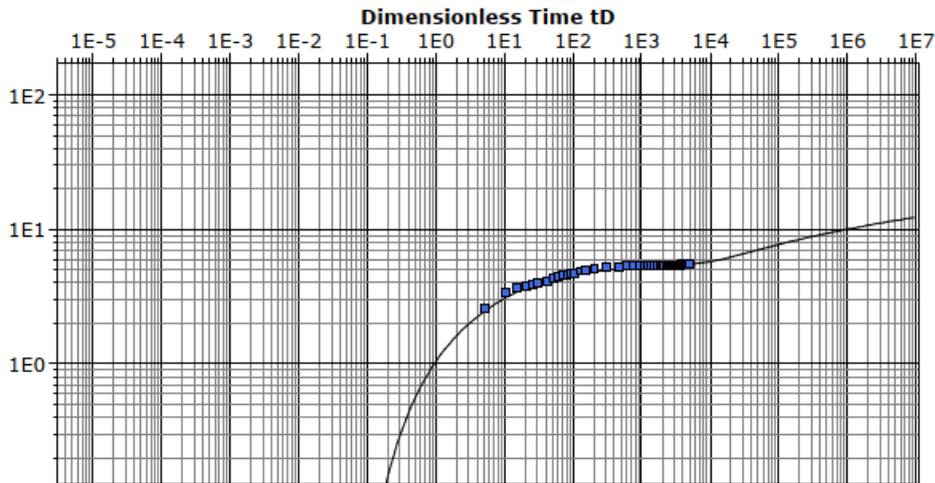


Calculation using Double Porosity

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Sigma	Lambda	Radial Distance to PW [m]
Well 1	1.11×10^{-5}	4.93×10^{-8}	4.83×10^{-2}	1.00×10^5	2.78×10^{-2}	0.17

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 08.

Location:	Pumping Test: ptp 09	Pumping Well: Well 1
Test Conducted by:		Test Date: 10/23/2008
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 11/2/2022
Aquifer Thickness: 122.00 m	Discharge: variable, average rate 151.35 [m ³ /h]	

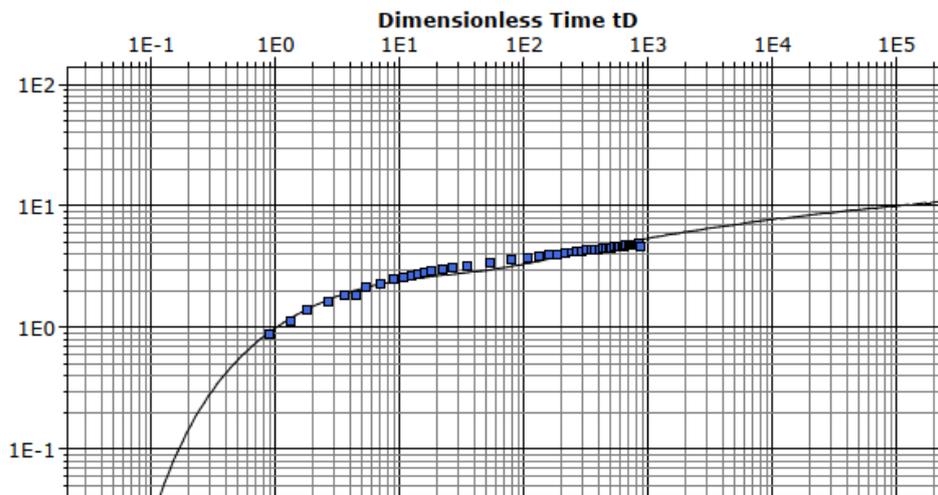


■ Well 1

Calculation using Moench Fracture Flow							
Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Sigma	Gamma	SF	Radial Distance to PW [m]
Well 1	2.48×10^{-4}	2.03×10^{-6}	9.78×10^{-2}	1.00×10^2	1.00×10^{-1}	1.00×10^0	0.17

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 09.

Location:	Pumping Test: ptp 10	Pumping Well: Well 1
Test Conducted by:		Test Date: 11/24/2008
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 11/2/2022
Aquifer Thickness: 104.00 m	Discharge: variable, average rate 36.186 [m ³ /h]	

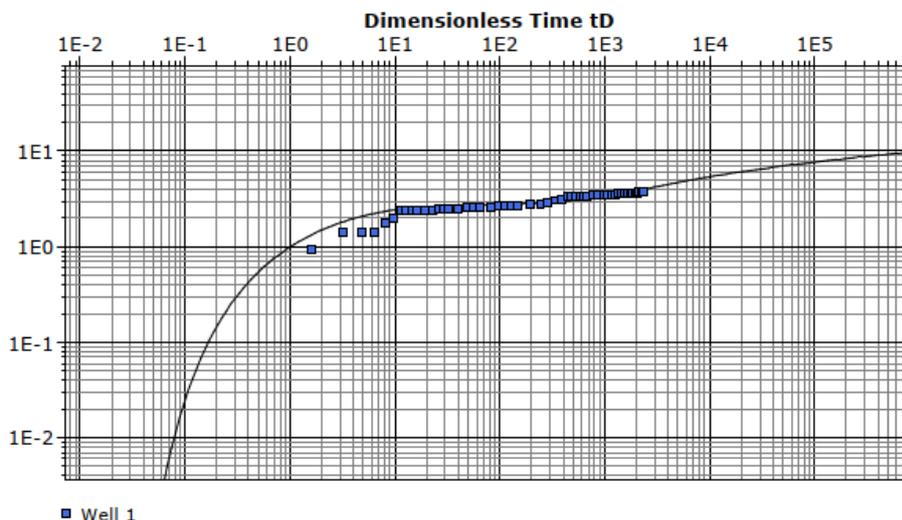


■ Well 1

Calculation using Double Porosity						
Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Sigma	Lambda	Radial Distance to PW [m]
Well 1	4.24×10^{-5}	4.08×10^{-7}	9.66×10^{-2}	9.12×10^0	1.08×10^{-1}	0.17

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 10.

Location:	Pumping Test: ptp 11	Pumping Well: Well 1
Test Conducted by:		Test Date: 1/18/2012
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 11/2/2022
Aquifer Thickness: 135.00 m	Discharge Rate: 132 [m ³ /h]	

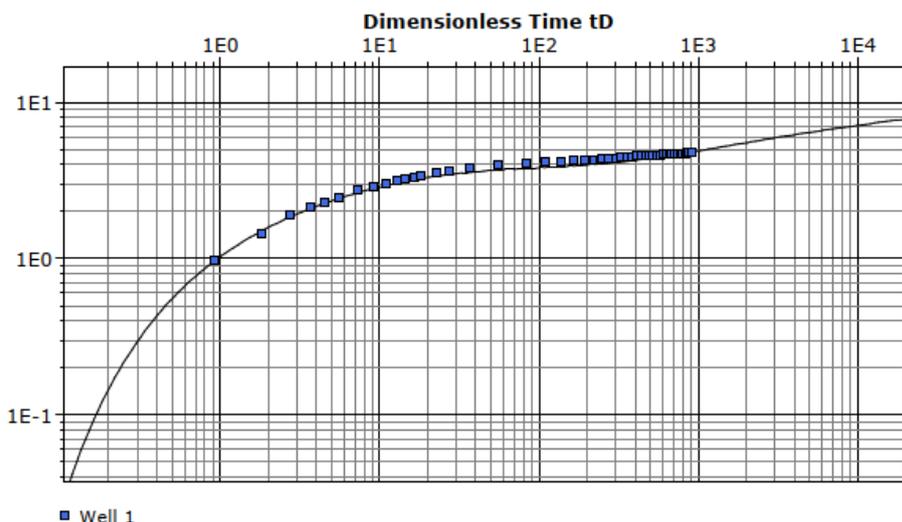


Calculation using Double Porosity

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Sigma	Lambda	Radial Distance to PW [m]
Well 1	2.38×10^{-4}	1.75×10^{-6}	5.45×10^{-1}	1.00×10^2	1.00×10^{-1}	0.13

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 11.

Location:	Pumping Test: Pumping Test 1	Pumping Well: Well 1
Test Conducted by:		Test Date: 7/16/2009
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 11/2/2022
Aquifer Thickness: 42.00 m	Discharge: variable, average rate 9.2928 [m ³ /h]	

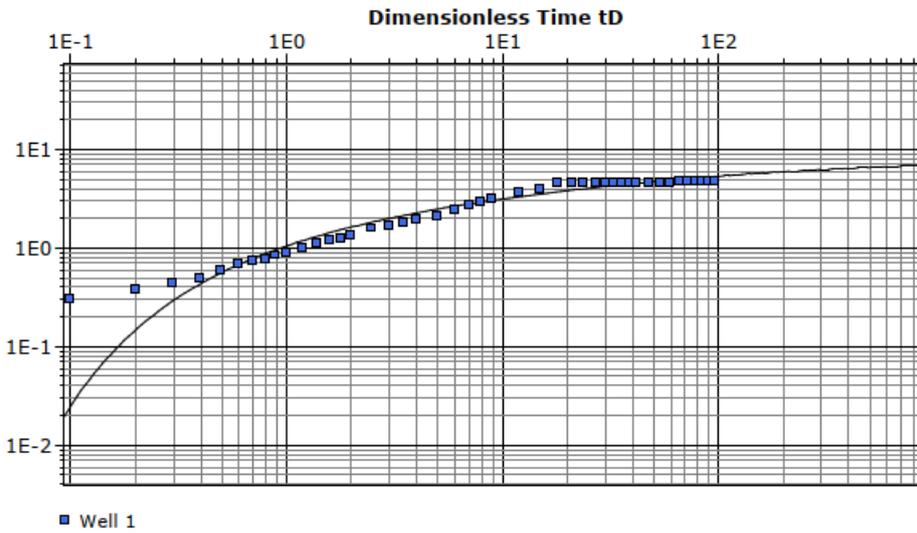


Calculation using Double Porosity

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Sigma	Lambda	Radial Distance to PW [m]
Well 1	3.56×10^{-5}	8.48×10^{-7}	7.90×10^{-2}	1.72×10^1	3.29×10^{-2}	0.17

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 14.

Location:	Pumping Test: ptp 16	Pumping Well: Well 1
Test Conducted by:		Test Date: 11/17/2011
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 11/2/2022
Aquifer Thickness: 106.40 m	Discharge: variable, average rate 3.1606 [m ³ /h]	

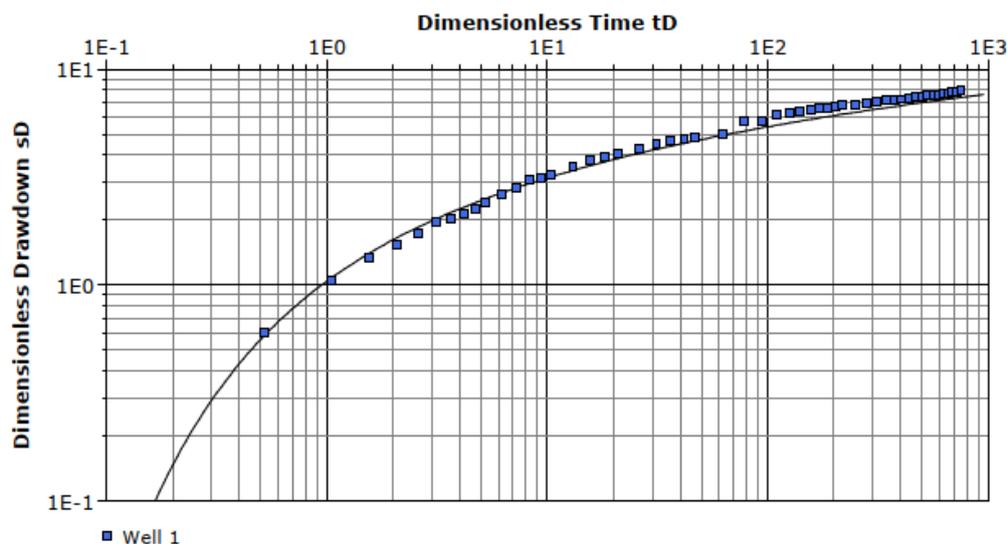


Calculation using Hantush

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Ratio K(v)/K(h)	Hydr. resistance [min]	Leakage factor [m]	Radial Distance to PW [m]
Well 1	2.52×10^{-6}	2.37×10^{-8}	5.18×10^{-2}	1.00×10^{-1}	1.67×10^5	5.02×10^0	0.17

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 16.

Location:	Pumping Test: Pumping Test 1	Pumping Well: Well 1
Test Conducted by:		Test Date: 9/3/2011
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 11/2/2022
Aquifer Thickness: 167.75 m	Discharge: variable, average rate 18.444 [m ³ /h]	

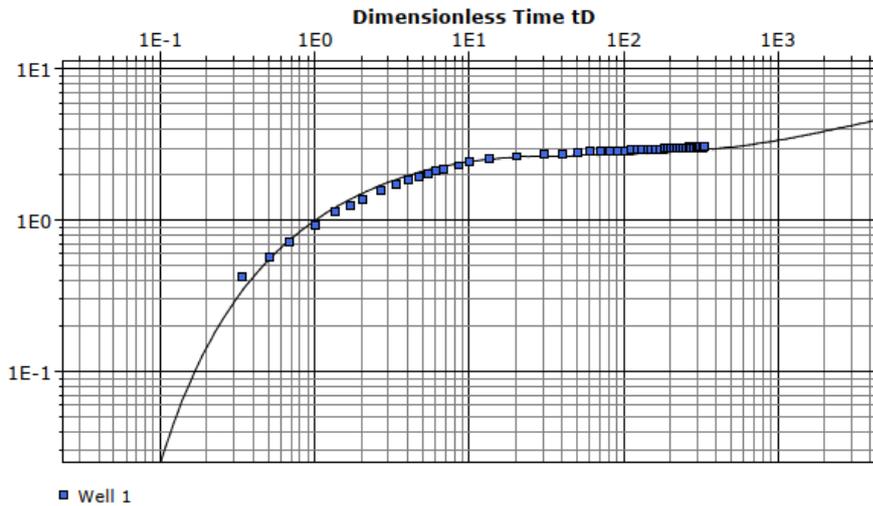


Calculation using Hantush

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Hydr. resistance [min]	Leakage factor [m]	Radial Distance to PW [m]
Well 1	4.56×10^{-5}	2.72×10^{-7}	1.78×10^{-1}	1.67×10^5	2.14×10^1	0.17

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 17.

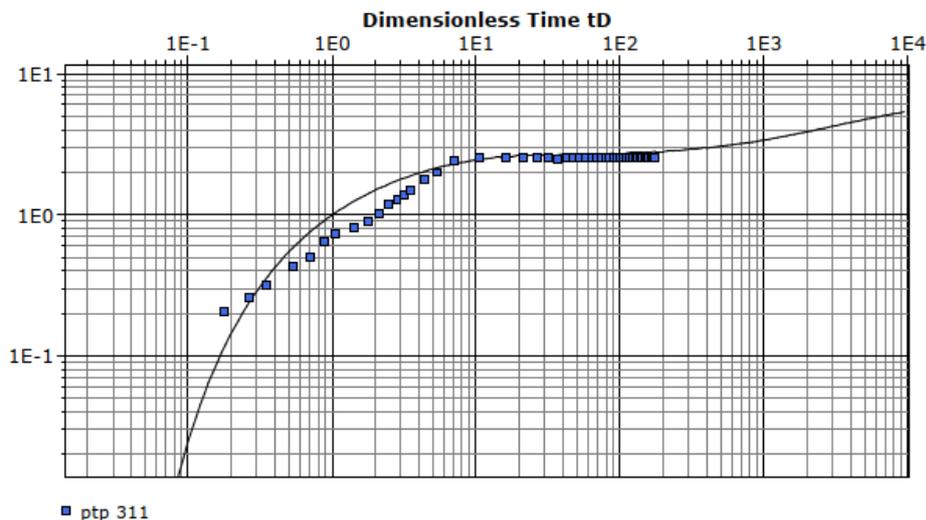
Location:	Pumping Test: ptp 30	Pumping Well: Well 1
Test Conducted by:		Test Date: 6/9/2018
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 11/2/2022
Aquifer Thickness: 103.00 m	Discharge: variable, average rate 22.317 [m ³ /h]	



Calculation using Double Porosity						
Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Sigma	Lambda	Radial Distance to PW [m]
Well 1	1.79×10^{-5}	1.74×10^{-7}	1.07×10^{-1}	1.00×10^2	1.00×10^{-1}	0.17

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 30.

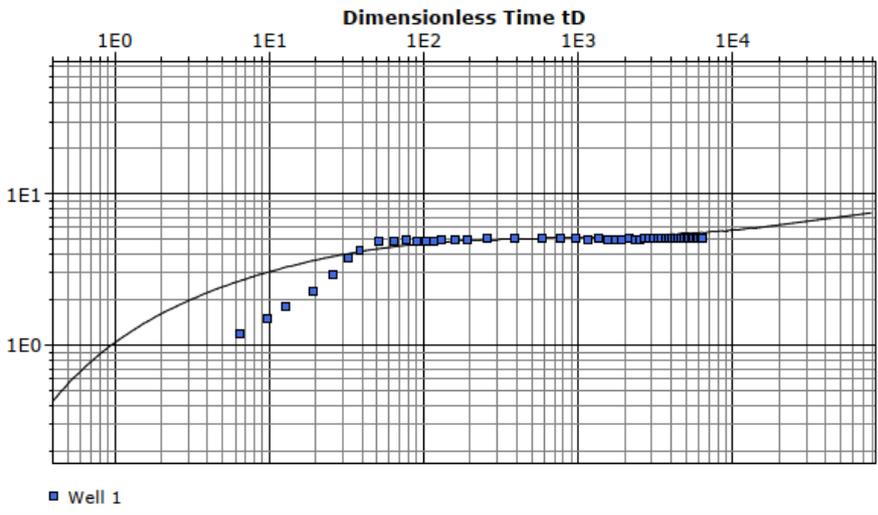
Location:	Pumping Test: ptp 31	Pumping Well: ptp 311
Test Conducted by:		Test Date: 1/29/2018
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 11/2/2022
Aquifer Thickness: 62.70 m	Discharge: variable, average rate 7.799 [m ³ /h]	



Calculation using Double Porosity						
Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Sigma	Lambda	Radial Distance to PW [m]
ptp 311	5.53×10^{-6}	8.82×10^{-8}	6.36×10^{-2}	1.00×10^2	1.00×10^{-1}	0.17

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 31.

Location:	Pumping Test: ptp 35	Pumping Well: Well 1
Test Conducted by:		Test Date: 10/10/2019
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 11/2/2022
Aquifer Thickness: 165.00 m	Discharge: variable, average rate 213.55 [m³/h]	

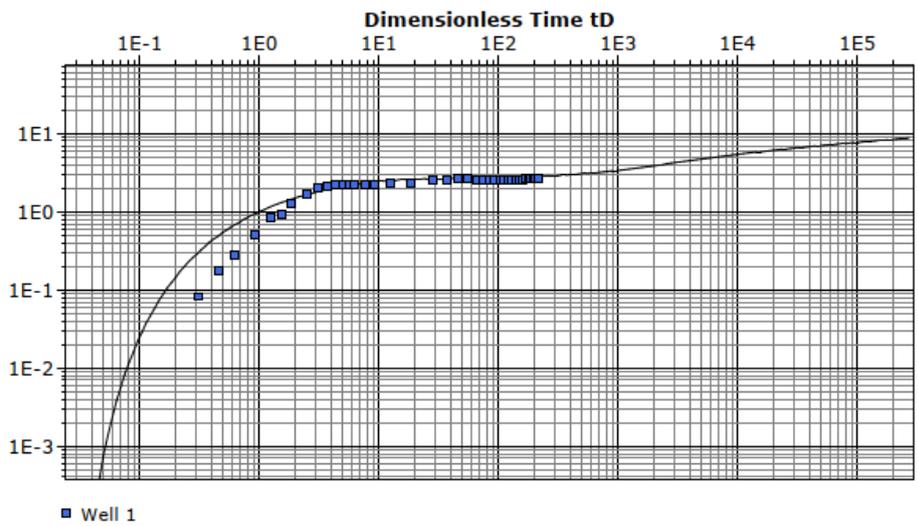


Calculation using Moench Fracture Flow

Observation Well	Transmissivity [m²/s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Sigma	Gamma	SF	Radial Distance to PW [m]
Well 1	1.55×10^{-4}	9.38×10^{-7}	4.89×10^{-2}	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-1}	1.00×10^0	0.17

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 35.

Location:	Pumping Test: ptp 37	Pumping Well: Well 1
Test Conducted by:		Test Date: 8/20/2020
Analysis Performed by:	New analysis 1	Analysis Date: 11/2/2022
Aquifer Thickness: 56.00 m	Discharge: variable, average rate 8.59 [m³/h]	



Calculation using Double Porosity

Observation Well	Transmissivity [m²/s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Storage coefficient	Sigma	Lambda	Radial Distance to PW [m]
Well 1	1.34×10^{-5}	2.40×10^{-7}	8.73×10^{-2}	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-1}	0.17

Curva rebaixamento e parâmetros PTP 37.