

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geologia

Celina Cenni de Castro Magalhães

**MODELO HIDROGEOLÓGICO DE FLUXO DO FLANCO LESTE DO SINCLINAL  
MOEDA (QUADRILÁTERO FERRÍFERO – MG): caracterização, impactos e  
perspectivas futuras para o Aquífero Cauê**

Celina Cenni de Castro Magalhães

**MODELO HIDROGEOLÓGICO DE FLUXO DO FLANCO LESTE DO SINCLINAL  
MOEDA (QUADRILÁTERO FERRÍFERO – MG): caracterização, impactos e  
perspectivas futuras para o Aquífero Cauê**

**Versão final**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula

Coorientadores: Profa. Dra. Marília Carvalho de Melo e Prof. Dr. Nilson Guiguer Junior

Belo Horizonte  
2023

M188m  
2023

Magalhães, Celina Cenni de Castro.

Modelo hidrogeológico de fluxo do flanco leste do Sinclinal Moeda (Quadrilátero Ferrífero – MG) [manuscrito] : caracterização, impactos e perspectivas futuras para o Aquífero Cauê / Celina Cenni de Castro Magalhães. – 2023.

76 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Rodrigo Sérgio de Paula.

Coorientadores: Marília Carvalho de Melo; Nilson Guiguer Junior.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2023.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 68-73.

Inclui apêndices.

1. Hidrogeologia – Teses. 2. Águas subterrâneas – Quadrilátero Ferrífero (MG) – Teses. 3. Aquíferos – Minas Gerais – Teses. I. Paula, Rodrigo Sérgio de. II. Melo, Marília Carvalho de. III. Guiguer Junior, Nilson. IV. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. V. Título.

CDU: 556.3(815.1)



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Modelo Hidrogeológico de Fluxo do Flanco Leste do Sinclinal Moeda (Quadrilátero Ferrífero – MG): Caracterização, Impactos e Perspectivas Futuras para o Aquífero Cauê**

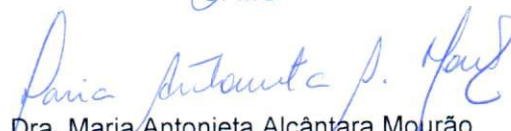
### **CELINA CENNI DE CASTRO MAGALHÃES**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre(a) em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA, pelo Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais.

Aprovada em 26 de janeiro de 2023, pela banca constituída pelos membros:

  
Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula – Orientador  
UFMG

  
Prof. Dr. Paulo Henrique Ferreira Galvão  
UFMG

  
Dra. Maria Antonieta Alcântara Mourão  
CPRM

Belo Horizonte, 26 de janeiro de 2023.

*Aos meus sobrinhos João Pedro, Estêvão,  
Clara, Mariana e Eduardo, que me motivam a  
buscar um futuro melhor todos os dias.*

## AGRADECIMENTOS

*Ao meu orientador, Professor Rodrigo, que desde o início não mediu esforços para garantir que o trabalho fosse concluído com qualidade. Agradeço também aos coorientadores, Marília e Nilson, por todo o apoio.*

*Agradeço à UFMG e Instituto de Geociências por possibilitarem o desenvolvimento do mestrado.*

*A todos os órgãos e empresas que apoiaram esse trabalho: IGAM e Secretaria de Meio Ambiente de Minas Gerais, que forneceram dados; Water Services and Technologies, que cedeu bolsa para curso do software Feflow; à Seequent, por fornecer acesso ao software Leapfrog Geo; e finalmente à DHI, que autorizou e cedeu licença para uso do software Feflow.*

*A todos os alunos da graduação que me auxiliaram no desenvolvimento do trabalho: Fernanda, Pedro, Lucas e tantos alunos de iniciação científica.*

*Ao Breno Pereira e Camila Miranda, pela enorme contribuição ao desenvolvimento do modelo computacional.*

*Aos colegas do IMA-SC, que sempre me encorajaram a seguir em frente, confiaram e torceram por mim.*

*Às profissionais Paola e Laura, que me acompanharam durante essa trajetória com a difícil tarefa de garantir minha saúde mental para chegar ao fim desse processo.*

*Aos meus queridos amigos, que nesse período ouviram meus desabaços e aguardaram ansiosamente o tão esperado "fim do mestrado" para concretizarmos planos. Principalmente àqueles que, mesmo à distância, se fizeram presentes nesse período difícil.*

*Aos meus irmãos, Breno e Pedro, que sempre foram fontes de inspiração na minha vida profissional e pessoal, e por me tornarem a Tia Celina.*

*Finalmente, agradeço aos meus pais, Ana Liddy e Breno, que me impulsionaram para que eu pudesse ir muito mais longe. Por serem exemplos de perseverança e responsabilidade, e fonte de afeto e aconchego.*

## Resumo

O Aquífero Cauê é de grande importância para o abastecimento hídrico da terceira maior aglomeração urbana do Brasil. A Região Metropolitana de Belo Horizonte está localizada em parte no Quadrilátero Ferrífero, que conta com intensa exploração de minério de ferro, atividade que requer uso de água para o beneficiamento do minério e desaguamento das minas. Nesse contexto, esse trabalho visa construir um modelo hidrogeológico de fluxo do flanco leste do Sinclinal Moeda, com o objetivo de avaliar o impacto regional no nível d'água subterrâneo entre os anos de 1999 e 2019. Além disso, pretende-se estimar o rebaixamento previsto nos 20 anos subsequentes, de 2019 a 2039. Para isso foi construído modelo conceitual e computacional da área. O primeiro consistiu na definição de condições de contorno e unidades aquíferas, o cálculo de parâmetros hidrodinâmicos, balanço hídrico, reserva renovável e análise de fluxo. O segundo, desenvolvido no *software* Feflow, foi composto pela montagem do modelo, calibração em regime permanente de fluxo, calibração em regime transiente de fluxo e simulação do rebaixamento do nível d'água. Os aquíferos Cauê, Gandarela e Moeda foram considerados unidades aquíferas, dentre os quais o Aquífero Cauê apresentou a maior condutividade hidráulica ( $9,45 \times 10^{-7}$  m/s em média), assim como a maior taxa de recarga, com 38,7% da pluviometria. O volume médio bombeado foi estimado em 41 milhões de m<sup>3</sup>/ano, equivalente a cerca de 150% da reserva renovável do Aquífero Cauê, calculada em 27 milhões de m<sup>3</sup>/ano. Como resultados da calibração do modelo em regime transiente estima-se que entre 1999 e 2019 houve redução de 13,6% no escoamento de base da área como um todo, além de um rebaixamento médio de 10,4 metros no Aquífero Cauê e 2,2 metros nas demais unidades. O setor mais impactado foi o Central 2, que teve rebaixamento de cerca de 11,6 metros e 21,6% de redução do escoamento de base. Já a simulação do período de 2019 a 2039 resultou no rebaixamento de mais 7,4 metros em média, sendo o setor Central 2 novamente o mais impactado, com 10,8 metros de rebaixamento. Nesse período foi prevista redução de 7,6% do escoamento de base na área como um todo, sendo 14,7% no Córrego Fechos, localizado no Setor Norte. Para integrar todos esses dados e gerar modelos mais robustos no futuro, sugere-se a instalação de uma rede de monitoramento que garanta a distribuição dos instrumentos pela área e a obtenção adequada e constante dos dados, tanto de vazão superficial quanto do nível d'água subterrânea. Isso aprimoraria a gestão adequada dos recursos hídricos, prevenindo a escassez hídrica para a população e o ecossistema.

*Palavras-chave:* Água subterrânea. Hidrogeologia. Modelo hidrogeológico de fluxo. Monitoramento hidrogeológico. Desaguamento de cavas.

## Abstract

The Cauê Aquifer is of great importance for the water supply of the third largest urban agglomeration in Brazil. The Metropolitan Region of Belo Horizonte is located partly in the Iron Quadrangle, where intense exploitation of iron ore occurs, an activity that requires the use of water for mineral processing and mine dewatering. In this context, this work aims to build a hydrogeological flow model of the Moeda Syncline's eastern limb, pursuing the regional impact evaluation on the groundwater level between the years 1999 and 2019. In addition, it is intended to estimate the lowering predicted over the following 20 years, from 2019 to 2039. Therefore a conceptual and a numerical model of the area were built. The first consisted of defining boundary conditions and aquifer units, calculating hydrodynamic parameters, water balance, renewable reserve and flow analysis. The second, developed using the software Feflow, consisted of model assembly, steady-state calibration, transient-state calibration and water level lowering simulation. The Cauê, Gandarela and Moeda aquifers were considered aquifer units, among which the Cauê Aquifer had the highest hydraulic conductivity ( $9,45 \times 10^{-7}$  m/s on average), as well as the highest recharge rate, with 38,7% of rainfall. The average volume pumped was estimated at 41 million m<sup>3</sup>/year, equivalent to about 150% of the renewable reserve of the Cauê Aquifer, calculated at 27 million m<sup>3</sup>/year. As a result of the transient-state calibration, it was estimated that between 1999 and 2019 there was a 13,6% baseflow reduction in the entire area, in addition to an average drawdown of 10,4 meters in the Cauê Aquifer and 2,2 meters in the other units. The most affected sector was Central 2, with a lowering of about 11,6 meters and a 21,6% reduction in baseflow. The simulation for the period from 2019 to 2039 resulted in a lowering of 7,4 meters on average, with the highest impact, once again, in the Central 2 sector, where the lowering was 10,8 meters on average. During this period, it was foreseen a baseflow reduction of 7,6% in the entire area, and of 14,7% in Córrego Fechos, located in the North Sector. In order to integrate all this data and generate more robust models in the future, it is suggested the installation of a monitoring network that guarantees the distribution of instruments throughout the área, and an adequate, constant collection of data, both on surface flow and groundwater level. This would improve the management of water resources, avoiding water scarcity for the population and ecosystems.

*Keywords: Groundwater. Hydrogeology. Hydrogeological flow model. Hydrogeological monitoring. Mine dewatering.*



## SUMÁRIO

<b>CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....</b>	<b>8</b>
<b>Capítulo 1 – Artigo 1.....</b>	<b>10</b>
<b>O Aquífero Cauê no flanco leste do Sinclinal Moeda: caracterização, impactos e fluxo em área a oeste do Quadrilátero Ferrífero – MG, Brasil. 10</b>	
1 INTRODUÇÃO .....	11
2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	12
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	25
5 CONCLUSÕES .....	39
6 AGRADECIMENTOS.....	40
<b>Capítulo 2 – Artigo 2.....</b>	<b>41</b>
<b>Modelagem numérica hidrogeológica no flanco leste do Sinclinal Moeda: Análise da situação atual e perspectivas futuras para o Aquífero Cauê (Quadrilátero Ferrífero – MG, Brasil).....</b>	<b>41</b>
1 INTRODUÇÃO .....	42
2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	47
4 RESULTADOS.....	54
5 DISCUSSÃO .....	62
6 CONCLUSÕES .....	64
7 AGRADECIMENTOS.....	65
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>68</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>74</b>

## CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A Região Metropolitana de Belo Horizonte abriga atualmente cerca de 6 milhões de pessoas, tendo essa população crescido aproximadamente 11% entre 2010 e 2020 (IBGE 2020). Essa região é abastecida principalmente pelas bacias hidrográficas do Rio Das Velhas e Rio Paraopeba, que recebem grande contribuição do Aquífero Cauê. Essa unidade hidrogeológica é constituída por formação ferrífera bandada, cuja porosidade primária e secundária possibilitam o armazenamento de uma reserva explotável de  $4,1 \times 10^9 \text{ m}^3$  (Ramos e Paixão 2003). Além da reserva hídrica significativa, essa formação ferrífera tem grande importância econômica devido às jazidas de metais, formando a principal província mineral do sudeste do Brasil, o Quadrilátero Ferrífero (Azevedo *et al.* 2012).

O Sinclinal Moeda, localizado na porção a oeste do Quadrilátero Ferrífero, conta com mais de 20 empreendimentos de extração de minério de ferro, atividade que requer uso de água para beneficiamento do minério e rebaixamento do nível do aquífero. No início do milênio, os empreendimentos minerários na região não eram tão desenvolvidos, havendo apenas duas outorgas para desaguamento de mina no flanco leste do Sinclinal Moeda, área foco desse trabalho. Segundo a ANM (2020), entre 2000 e 2019, a produção de minério de ferro no estado de Minas Gerais dobrou, proveniente principalmente do Quadrilátero Ferrífero, acarretando maior necessidade de rebaixamento do nível do aquífero. Como consequência, dos 13 empreendimentos localizados na área de estudo, 10 solicitaram outorgas para iniciar ou aumentar o rebaixamento do nível d'água entre 1999 e 2019. Outros tipos de empreendimentos também usam água subterrânea e superficial em menores quantidades.

O bombeamento de água em excesso, concentrado em uma região, pode gerar efeitos ambientais adversos como redução progressiva de vazão e até desaparecimento de nascentes e córregos caso não haja mitigação dos impactos (Amorím *et al.* 1999). Também ocorre o rebaixamento da carga hidráulica na região do bombeamento, devido à formação de cone de depressão, o que pode limitar o acesso de outros usuários à água subterrânea por meio de poços de captação (Kochanek e Tynan 2010).

Diante desse cenário foi detectada a necessidade de avaliar o impacto do rebaixamento e realizar o monitoramento de forma regional, já que atualmente cada empreendimento realiza estudos separadamente. Assim, foi firmada uma parceria entre o Instituto de Geociências da UFMG e o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) para desenvolvimento do projeto intitulado “Proposta de uma rede de monitoramento hidrometeorológico a partir de estruturas existentes na região do Quadrilátero Ferrífero, tendo como área piloto a região do Sinclinal

Moeda, MG”, do qual essa dissertação de mestrado faz parte. Nesse projeto cada megaestrutura do Quadrilátero Ferrífero está sendo estudada separadamente, para que seja avaliado o impacto no Aquífero Cauê de forma regional. Essa dissertação, desenvolvida no âmbito do Programa de Pós Graduação em Geologia da UFMG, tem como objetivo aprofundar os conhecimentos sobre a hidrogeologia do flanco leste do Sinclinal Moeda, analisando os impactos do rebaixamento entre 1999 e 2019 e perspectivas para os 20 anos seguintes.

O projeto conta com apoio do IGAM e Secretaria de Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais, que foi de suma importância para a obtenção de dados para o desenvolvimento do modelo. O IGAM disponibilizou Relatórios Técnicos para obtenção de outorga e Relatórios de Cumprimento de Condicionantes de outorga. A partir da compilação dos dados contidos nesses relatórios foi possível desenvolver o modelo conceitual e computacional da região, resultando em um banco de dados e um modelo de fluxo que serão submetidos ao IGAM para embasar a concessão de novas outorgas.

Para o desenvolvimento do modelo, esse trabalho também contou com o apoio das empresas Water Services and Technologies, que concedeu bolsa para curso do *software* Feflow; DHI, que forneceu licença para o uso do Feflow; e Seequent Ltd., que forneceu licença para uso do *software* Leapfrog Geo e Hydro.

O desenvolvimento do trabalho está organizado nessa dissertação na forma de dois artigos. O primeiro consiste no modelo conceitual, que definiu as condições de contorno, unidades aquíferas, parâmetros hidrodinâmicos, cálculo do balanço hídrico e da reserva renovável e, por fim, apresentou uma análise do fluxo subterrâneo. Esse artigo, intitulado “*The Cauê Aquifer on the eastern limb of the Moeda Syncline: characterization, impacts, and flow in the western Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero), MG, Brazil*”, encontra-se publicado na revista “*Brazilian Journal of Geology*”, DOI 10.1590/2317-4889202220220005.

O segundo artigo, intitulado “Modelagem numérica hidrogeológica no flanco leste do Sinclinal Moeda: Análise da situação atual e perspectivas futuras para o Aquífero Cauê (Quadrilátero Ferrífero - MG, Brasil)”, consiste no modelo numérico. Nesse modelo, desenvolvido no *software* Feflow, são utilizadas as informações geradas no primeiro artigo para quantificar os impactos ocorridos entre 1999 e 2019 e realizar simulação para estimar os impactos no período de 2019 a 2039. Esse artigo será submetido após a contribuição da banca de avaliação dessa dissertação para revista científica de relevância na área de geociências.

## Capítulo 1 – Artigo 1

### **O Aquífero Cauê no flanco leste do Sinclinal Moeda: caracterização, impactos e fluxo em área a oeste do Quadrilátero Ferrífero – MG, Brasil**

Celina Cenni de Castro Magalhães <sup>1</sup>, Marília Carvalho de Melo <sup>2,3</sup>, Nilson Guiguer <sup>4</sup>, Rodrigo Sergio de Paula<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte (MG), Brasil.

<sup>2</sup>Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - Belo Horizonte (MG), Brasil.

<sup>3</sup>Departamento de Recursos Hídricos, Universidade Vale do Rio Verde - Três Corações (MG), Brasil.

<sup>4</sup>Water Services and Technologies – Florianópolis (SC), Brasil.

Link para acesso ao artigo publicado: <https://doi.org/10.1590/2317-4889202220220005>

#### **RESUMO**

O Aquífero Cauê é de grande importância para o abastecimento hídrico da terceira maior aglomeração urbana do Brasil. A Região Metropolitana de Belo Horizonte está localizada no Quadrilátero Ferrífero, que conta com intensa exploração de minério de ferro, atividade que requer uso de grande volume de água e desaguamento das minas. Nesse contexto, este artigo objetiva avaliar o impacto regional no nível d'água subterrâneo entre os anos de 2000 e 2019 a partir de modelo conceitual hidrogeológico de fluxo do flanco leste do Sinclinal Moeda. O presente trabalho inclui a definição de condições de contorno e unidades aquíferas, cálculo de parâmetros hidrodinâmicos, balanço hídrico, reserva renovável e análise de fluxo. Os aquíferos Cauê, Gandarela e Moeda foram considerados unidades aquíferas, dentre os quais o Aquífero Cauê apresentou a maior condutividade hidráulica ( $9,45 \times 10^{-7}$  m/s em média), assim como a maior taxa de recarga, com 38,67% da pluviometria. O volume médio bombeado foi estimado em 41 milhões de m<sup>3</sup>/ano, equivalente a cerca de 150% da reserva renovável do Aquífero Cauê, calculada em 27 milhões de m<sup>3</sup>/ano. O fluxo subterrâneo na área tende para sul, e o Aquífero Cauê atua como divisor de águas, o que é menos evidente no centro da área, onde ocorre o maior impacto no rebaixamento do nível d'água.

*Palavras-chave: água subterrânea, hidrogeologia, modelo conceitual, impacto hidrogeológico, reserva renovável*

## 1 INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero é uma das principais províncias minerais do Brasil, ocupando aproximadamente 7.000 km<sup>2</sup> na porção central do estado de Minas Gerais. Seu nome tem origem nas serras, sustentadas por formações ferríferas, dispostas em formato de quadrilátero. Essa província faz com que Minas Gerais seja o estado brasileiro com maior produção de ferro e ouro do país (aproximadamente 311 e 55 milhões de toneladas, respectivamente, em 2019) (ANM 2020). Além disso, ocorrem nessa região jazidas de manganês, bauxita e pedras preciosas, como topázio e esmeralda (Roeser & Roeser 2010).

O Sinclinal Moeda, localizado na porção a oeste do Quadrilátero Ferrífero, conta com 23 empreendimentos de extração de minério de ferro, atividade que requer uso de grandes quantidades de água e rebaixamento do nível do aquífero. Segundo a ANM (2020), entre 2000 e 2019, a produção de minério de ferro no estado de Minas Gerais dobrou, proveniente principalmente do Quadrilátero Ferrífero, acarretando maior necessidade de rebaixamento. Além disso, está presente nesta área parte do Aquífero Cauê, que, por fornecer água para as principais drenagens da área, é de grande importância para o abastecimento hídrico da terceira maior aglomeração urbana do Brasil, a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH).

O aumento da população na área, os desastres ambientais e os eventos de seca recentes têm ameaçado esse abastecimento, elevando a pressão sobre reservas hídricas subterrâneas. A população da RMBH aumentou em 593 mil pessoas (11%) entre 2010 e 2020 (IBGE, 2020), enquanto no ano hidrológico de 2014-2015 a região sudeste do Brasil teve a seca mais intensa dos últimos 60 anos, gerando alto impacto no suprimento de água e geração hidroelétrica (Cunha *et al.* 2019). Ainda, o rompimento da barragem de rejeito de mineração em Brumadinho, em 2019, causou a suspensão da captação no Rio Paraopeba por mais de um ano, sobrecarregando o Rio das Velhas. Neste cenário, estudos hidrogeológicos são necessários para prevenir crises de abastecimento, orientando o manejo e uso dos recursos hídricos.

Diante deste contexto, este trabalho tem como foco principal a geração do modelo conceitual hidrogeológico de fluxo do flanco leste do Sinclinal Moeda, em escala regional, contemplando dados de monitoramento entre 2000 e 2019. Mais especificamente, objetiva-se delimitar unidades hidrogeológicas e suas condições de fluxo, bem como seus parâmetros hidrodinâmicos, volumes de recarga e descarga e, utilizando esses dados, analisar o impacto regional no nível d'água subterrânea nesse período de 20 anos.

Uma vez desenvolvido, o modelo conceitual de fluxo da região poderá contribuir para um melhor entendimento da dinâmica do aquífero, disponibilidade hídrica e, conseqüentemente, uso sustentável deste.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 Localização

A área de estudo encontra-se na porção central do estado de Minas Gerais, no flanco leste do chamado Sinclinal Moeda. Ela se estende entre os municípios de Belo Horizonte, a norte, e Ouro Preto, a sul, incluindo também parte dos municípios de Itabirito, Rio Acima e Nova Lima, conforme apresentado na Figura 1.

A área estudada engloba aproximadamente 305 km<sup>2</sup> e é delimitada a oeste e a sul pelos eixos dos sinclinais Moeda e Dom Bosco, respectivamente, e a leste por uma faixa de 1 km além da ocorrência de rochas do Supergupo Minas.

Dentro dessa área ocorrem ao menos 13 minerações, distribuídas do norte até sua porção central. Não se trata de área densamente urbanizada, com exceção de alguns condomínios residenciais localizados no norte da área.

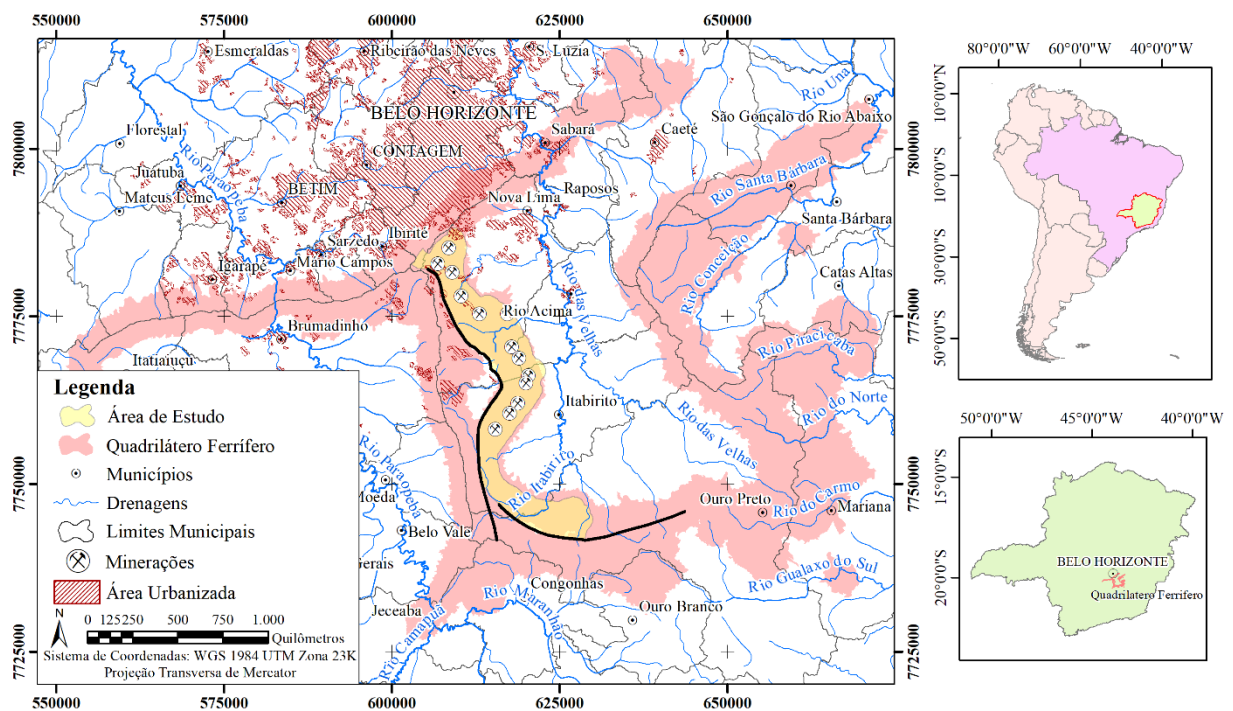


Figura 1. Localização da área de estudo com destaque para o Quadrilátero Ferrífero

## 2.2 Clima

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (1928) atualizada por Álvares (2014), o clima da área de estudo é considerado subtropical úmido com inverno seco e verão temperado (tipo Cwb). Duas estações podem ser bem definidas nesse tipo de clima: a primeira, de outubro a março, é úmida e quente; a segunda, de abril a setembro, é fria e seca. De acordo com dados da estação meteorológica Belo Horizonte (83587), a mais próxima da área cujos dados de temperatura estão disponíveis, a temperatura média mensal varia entre 18,8 e 23,5°C em julho e fevereiro, respectivamente. Já a média anual de precipitação acumulada é de 1552 mm (INMET 2020), sendo que cerca de 88% do volume precipitado ocorre no período chuvoso.

## 2.3 Hidrografia

A área de estudo está situada na Bacia Hidrográfica estadual do Rio das Velhas, maior afluente da Bacia Hidrográfica federal do Rio São Francisco. Mais especificamente, a área engloba afluentes da margem esquerda do chamado Alto Rio das Velhas (Figura 2), o qual concentra 70,9% da população estimada da bacia (CBH Rio das Velhas 2015). Os principais afluentes presentes são o Rio Itabirito, Rio do Peixe, Ribeirão dos Macacos, Ribeirão Água Suja e Ribeirão Arrudas.

O Rio das Velhas é de suma importância para o abastecimento da RMBH. Sozinho, ele é responsável pelo abastecimento de mais de 60% da população de Belo Horizonte e 40% dos 6 milhões de habitantes da RMBH (CBH Rio das Velhas 2019). Devido à alta demanda, no final de 2018, foi feita uma solicitação de declaração de áreas de conflito pelo uso de recursos hídricos na região do Alto Rio das Velhas. A situação recentemente foi agravada pelo rompimento da barragem Córrego do Feijão, ocorrido em Brumadinho em 2019, que comprometeu parte do abastecimento proveniente da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba. Essa bacia é responsável por aproximadamente 60% do abastecimento da RMBH (ANA 2016), portanto o ocorrido sobrecarregou ainda mais o sistema de abastecimento Rio das Velhas.

## 2.4 Geologia

O Quadrilátero Ferrífero está situado na porção sudeste do Cráton do São Francisco, que constitui uma unidade tectônica formada por litologias Arqueanas e Paleoproterozoicas. Esta área é estruturada na forma de domos e quilhas, típica de terrenos do tipo *Greenstone Belts*. Os domos são representados pelas rochas dos complexos metamórficos, enquanto as quilhas são

formadas pelo Supergrupo Rio das Velhas e Supergrupo Minas, estruturados na forma de dobras (Alkmim & Marshak 1998).

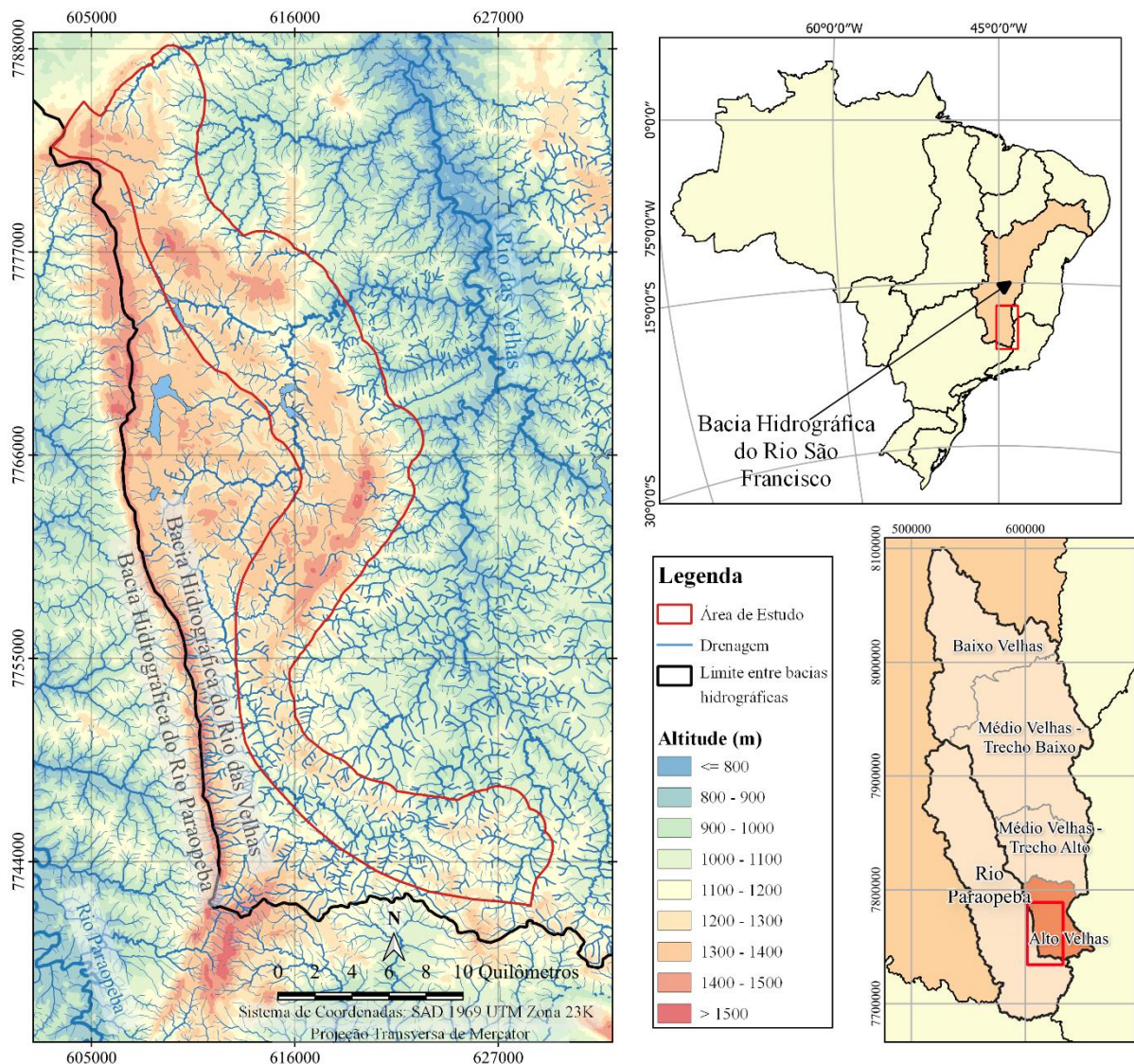


Figura 2. Hidrografia e hipsometria da área de estudo

O Sinclinal Moeda forma uma quilha entre os domos de Bonfim, a oeste, e Bação, a leste. A dobra tem estrutura assimétrica, sendo o flanco oeste invertido e o flanco leste aproximadamente verticalizado. Ambos os flancos são cortados por falhas e fraturas de direção Leste-Oeste, sendo uma delas a Falha das Codornas (Figura 3). Essa estrutura, definida por Braga (2006), separa os compartimentos estruturais norte e sul no Sinclinal Moeda. O compartimento sul apresenta-se mais deformado, com maior encurtamento, resultando em menor espessura aparente das camadas da base do Supergrupo Minas.

A junção do Sinclinal Moeda com o homoclinal da Serra do Curral mostra padrão de interferência e uma série de falhas de cisalhamento com vergência para oeste (Alkmim &



Marshak 1998). Um exemplo é a Falha da Mutuca (Figura 3), de direção Norte-Sul, que delimita a chamada Faixa Tamanduá-Mutuca.

O flanco leste do Sinclinal apresenta maior intensidade deformacional do que o flanco oeste (Silva e Gomes 2001). Nessa região ocorrem falhas transcorrentes, como a Falha do Bonga e Falha da Cata Branca (Figura 3) e diques básicos na mesma direção.

Quanto às unidades estratigráficas, no Sinclinal Moeda ocorrem rochas dos Complexos Metamórficos Arqueanos, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas, Grupo Itacolomi, coberturas lateríticas (canga) e coberturas aluviais e colúviais recentes (Silva *et al.* 2005). As unidades mais relevantes encontram-se descritas na Tabela 1 e apresentadas em mapa na Figura 3.

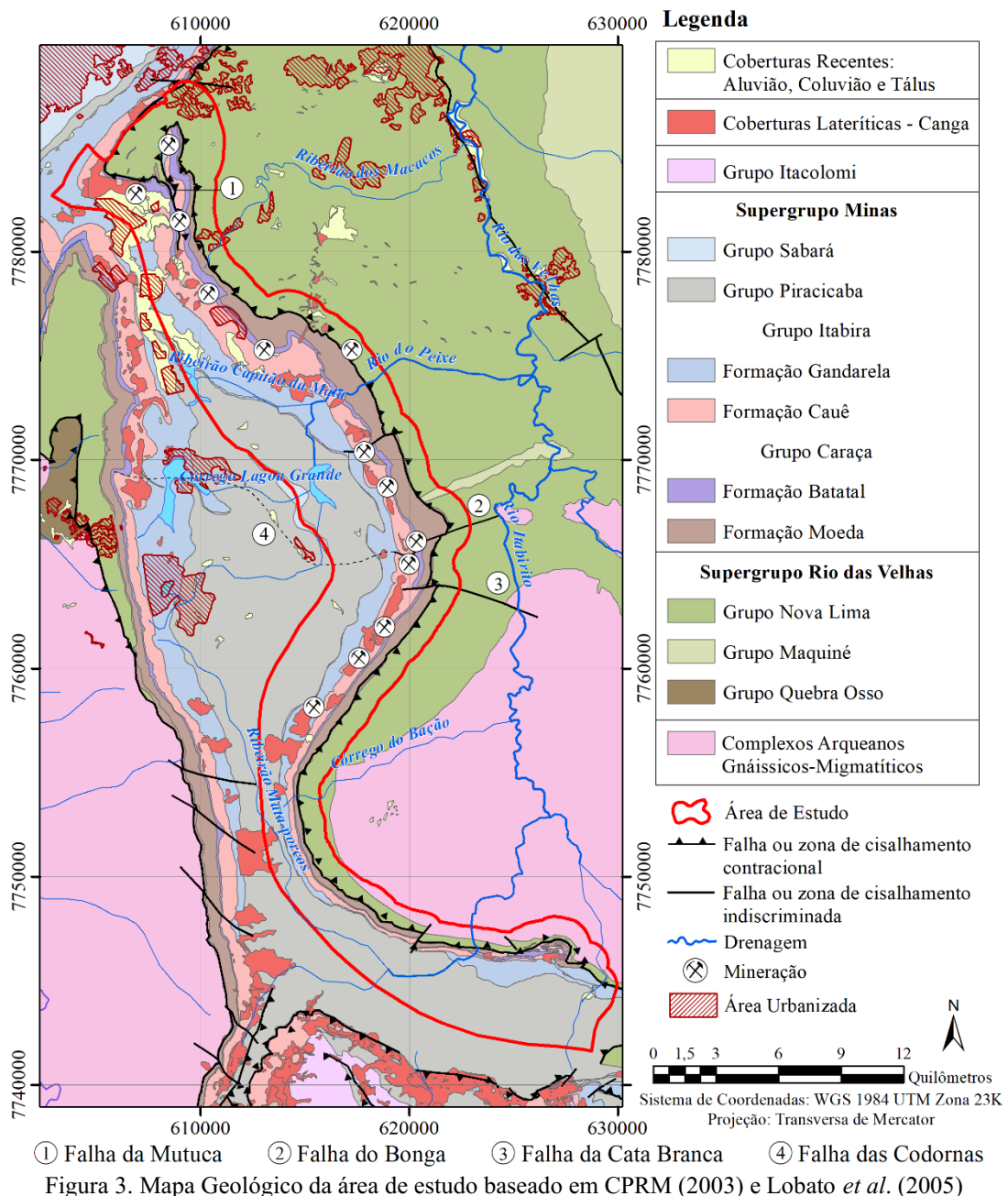


Tabela 1. Descrição das unidades estratigráficas que ocorrem na área de estudo

<b>UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS</b>		<b>DESCRIÇÃO</b>	
<b>Coberturas Recentes</b>		Depósitos aluviais e coluviais superficiais	
<b>Coberturas Lateríticas</b>		Produto de alteração do Itabirito que ocorre principalmente sobre rochas da Formação Cauê, cobrindo topos de serras e encostas, podendo se estender também sobre formações não ferruginosas	
<b>Supergupo Minas</b>	<b>Grupo Sabará</b>	Aflora em área restrita no centro do Sinclinal Moeda e contém filito, xisto metavulcânico, metagrauvaca e quartzito (Silva <i>et al.</i> 2005)	
	<b>Grupo Piracicaba</b>	Quartzito, filito e lentes de dolomito subordinadas (Silva <i>et al.</i> 2005)	
	<b>Grupo Itabira</b>	<b>Formação Gandarela</b>	Dolomito, mármore, filito e itabirito dolomítico (Silva <i>et al.</i> 2005), sendo sua espessura média da ordem de 200 metros (Pimenta <i>et al.</i> 2009).
		<b>Formação Cauê</b>	Itabirito com lentes de dolomito, hematita compacta e friável, filito e mármore. Tem espessura média entre 200 e 300 m (Rosière e Chemale Jr 2013), podendo chegar a até 1500 m em algumas porções onde ocorreram dobramentos sucessivos (Rossi 2014)
	<b>Grupo Caraça</b>	<b>Formação Batatal</b>	Filitos sericíticos, carbonosos e ferruginosos. Apresenta no máximo 250 metros de espessura, porém normalmente não atinge 30 metros (Beato <i>et al.</i> 2006; Maxwell 1972)
		<b>Formação Moeda</b>	Quartzito, filito e conglomerado. Possui espessura média de 200 metros, podendo atingir localmente até 1.200 metros (Beato <i>et al.</i> 2006)
<b>Supergupo Rio das Velhas</b>	<b>Grupo Nova Lima</b>	Xisto metassedimentar, xisto metavulcânico e filito (Beato <i>et al.</i> 2006)	
<b>Complexos Arqueanos Gnáissicos-migmatíticos (Complexo Bação)</b>		Terreno granito-gnáissico intrudido por corpos granitóides, rochas básicas e metabásicas (Alkmim & Marshak 1998)	

Entre as unidades apresentadas destaca-se o Supergupo Minas, que ocupa a maior parte da área de estudo e pode atingir até 6000 m de espessura (Roeser e Roeser 2010). Trata-se de uma sequência metassedimentar paleoproterozoica que sobrepõe o Supergupo Rio das Velhas de forma discordante (Silva *et al.* 2005). Nessa unidade se encontram as rochas mais resistentes que sustentam as serras, gerando a forma de quadrilátero. Uma delas é a Formação Cauê, foco desse estudo, que se destaca devido aos seus depósitos de ferro e ouro, sendo a unidade estratigráfica mais importante do Quadrilátero Ferrífero do ponto de vista econômico.

## 2.5 Hidrogeologia

Diversas classificações das unidades aquíferas no Sinclinal Moeda já foram feitas. Entre elas, destacam-se as de Beato *et al.* (2005) e Mourão (2007). Beato *et al.* (2005) consideram a existência, na região de estudo, dos sistemas aquíferos Granular, Quartzítico, Quartzito Cercadinho, Itabirítico, Carbonático, Xistoso, Formação Ferrífera e Granito-Gnáissico. Por outro lado, os argilitos, filitos, xisto grafitoso, gabro e diabásio são considerados aquíferos. Mourão (2007), de forma semelhante, separa as unidades em aquífero inconsolidado, quartzítico, carbonático, aquíferos em formações ferríferas, em xistos, em rochas granito-gnaissicas e unidades confinantes.

Dentre as unidades aquíferas citadas destaca-se o aquífero em formações ferríferas, unidade mais produtiva da área, chamado de Aquífero Cauê. Este apresenta porosidade fissural e granular, com predominância de uma ou outra localmente. A variedade litológica, complexidade estrutural e intemperismo de intensidades diversas no aquífero contribuem para a variação do armazenamento e condutividade hidráulica, sendo mais produtivos os corpos de minério friável. A Formação Batatal, de baixa permeabilidade, limita a base das unidades sobrepostas no Sinclinal Moeda, favorecendo o acúmulo da água subterrânea nas litologias internas do Sinclinal, principalmente nas unidades Cauê e Gandarela (Mourão 2007).

Cabe ressaltar que apesar de apresentar, no geral, alta produtividade, o Aquífero Cauê mostra diferenças significativas quanto à sua composição, estruturação e dinâmica de fluxo, o que resulta em características hidráulicas variáveis. Assim, Mourão (2007) propõe a subdivisão desta unidade em hematitas semifriáveis, compactas laminadas e compactas maciças, itabiritos frescos, laterizados e friáveis. As hematitas semifriáveis e as hematitas compactas laminadas apresentam os maiores valores de porosidade total. Além disso, observa-se acentuada diferença de permeabilidade nas direções paralelas e perpendiculares à laminação, sendo aquela ao longo do acamamento aproximadamente três (3) vezes superior à direção ortogonal.

Já Dantas *et al.* (2017) subdivide o Aquífero Cauê em hematita, itabirito, itabirito argiloso e itabirito carbonático, sendo cada uma das litologias separadas em branda e compacta. Nesse estudo, as hematitas brandas apresentaram-se mais favoráveis para a presença de água, seguidas pelos itabiritos brandos. As litologias compactas são menos propícias à presença de água devido à resistência à erosão e fraturamento, e litotipos argilosos apresentaram vazões específicas mais baixas, enquanto itabiritos carbonáticos não se mostraram favoráveis à presença de água.

Por fim, Paula *et al.* (2018) subdivide o Aquífero Cauê na região sudoeste do Sinclinal Moeda em estratos com águas de diferentes idades, evidenciando a velocidade de renovação das águas em diferentes profundidades. Foram consideradas águas jovens aquelas acima da cota de 1000 m; águas intermediárias entre 850 e 1000 m e águas antigas abaixo de 850 m.

Para caracterizar as unidades aquíferas são comparados os parâmetros hidrodinâmicos como a condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) e armazenamento (S). Entre os parâmetros calculados para o Aquífero Cauê em trabalhos anteriores (Tabela 2) destacam-se os trabalhos de Mourão (2007), realizado na porção centro-norte do Sinclinal Moeda, Mesquita *et al.* (2017), que apresentou parâmetros referentes à região sudoeste dessa estrutura, Guerra (2010), que realizou testes no município de Nova Lima, no Homoclinal Serra do Curral, e Bertachini (2020) e Schlumberger (2017) na borda oeste do Sinclinal.

Tabela 2. Parâmetros hidrodinâmicos do Aquífero Cauê provenientes de outras bibliografias

Trabalho	K (m/s)		T (m <sup>2</sup> /s)		S	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
<b>Mourão (2007)</b>	1,0×10 <sup>-9</sup>	1,0×10 <sup>-6</sup>	5,86×10 <sup>-4</sup>	1,74×10 <sup>-2</sup>	1,0×10 <sup>-1</sup>	1,6×10 <sup>-1</sup>
<b>Guerra (2010)</b>	10 <sup>-6</sup>		-		-	
<b>Mesquita <i>et al.</i> (2017)</b>	5,2×10 <sup>-10</sup>	2,5×10 <sup>-8</sup>	5,79×10 <sup>-6</sup>	1,85×10 <sup>-3</sup>	8,6×10 <sup>-10</sup>	5,0×10 <sup>-1</sup>
<b>Schlumberger (2017)</b>	1,5×10 <sup>-4</sup>	8,8×10 <sup>-4</sup>	1,90×10 <sup>-2</sup>	3,70×10 <sup>-2</sup>	1,6×10 <sup>-2</sup>	5,3×10 <sup>-1</sup>
<b>Bertachini (2020)</b>	4,6×10 <sup>-7</sup>	1,2×10 <sup>-5</sup>	8,8×10 <sup>-4</sup>	9,29×10 <sup>-3</sup>	1,8×10 <sup>-4</sup>	5,0×10 <sup>-1</sup>

Conforme Mourão (2007) e Mesquita *et al.* (2017), a condutividade hidráulica no itabirito brando apresenta continuidade em todo o Sinclinal Moeda, o que é corroborado por Guerra (2010) e Bertachini (2020). A variação dos valores de transmissividade apresentados indica a variação de espessura da Formação Cauê, além da presença de regiões de confinamento e de controle estrutural associado a permeabilidade secundária. Já a grande variação dos valores de armazenamento (S<sub>y</sub>) para o Aquífero Cauê reforça a heterogeneidade dessa unidade no Sinclinal Moeda, refletindo sua complexidade estrutural e confinamentos localizados.

Quanto às demais unidades estudadas, poucos parâmetros hidrodinâmicos foram definidos na literatura. Ferreira e Bacellar (2010) apontaram valores de transmissividade entre 9,0×10<sup>-6</sup> e 1,4×10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s para o Complexo Bação, e entre 1,1×10<sup>-6</sup> e 5,8 m<sup>2</sup>/s para o Grupo Piracicaba, ambos no município de Ouro Preto. Já Mourão (2007), a partir de ensaios laboratoriais para determinar a condutividade hidráulica, chegou ao resultado de 3,5×10<sup>-9</sup> m/s para o quartzito da Formação Moeda e 9,2×10<sup>-8</sup> m/s para o filito semidecomposto da Formação Batatal.

A recarga também é um importante parâmetro para analisar a dinâmica hidrogeológica da área. De acordo com Mourão (2007), os valores de recarga na região são relacionados

principalmente aos tipos de solos e à geologia, sendo as taxas mais elevadas em domínios da Formação Cauê (acima de 38%). Ainda segundo a autora, as coberturas recentes, rochas do Complexo Bação e da Formação Moeda apresentam recarga abaixo de 28% da precipitação anual. Rochas do Supergrupo Rio das Velhas, Formação Batatal e parte do Grupo Piracicaba apresentam recarga entre 28 e 38%. Bertachini *et al.* (2012) apontam que a taxa de recarga no Aquífero Cauê situa-se em torno de 35 e 40% do total da precipitação, enquanto regiões com formação de cava de mineração podem chegar a recargas de até 84%.

Freitas e Bacellar (2013) apresentaram os diferentes comportamentos quanto à recarga entre o Complexo Metamórfico Bação, composto por gnaisses, e o Grupo Nova Lima, representado por xistos. Enquanto as rochas do Grupo Nova Lima possibilitam maiores valores de recarga anual (cerca de 28%), as do Complexo Bação apresentam recarga de aproximadamente 18% e conservam por mais tempo a água subterrânea no sistema.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Os métodos deste trabalho incluem as etapas de coleta de dados, definição das condições de contorno, definição das unidades aquíferas, definição de parâmetros hidrodinâmicos, balanço hídrico e cálculo da reserva renovável e análise de fluxo.

#### **3.1 Coleta de Dados**

A etapa de coleta de dados consistiu em extraí-los dos bancos de dados do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), portal Hidroweb ([snirh.gov.br/hidroweb](http://snirh.gov.br/hidroweb)), da Agência Nacional das Águas (ANA), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) ([bdmep.inmet.gov.br](http://bdmep.inmet.gov.br)) e Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG). No banco de dados do IGAM foram analisados relatórios públicos de cumprimento de condicionantes e de solicitação de outorga dos grandes empreendimentos da área, além das concessões de outorga de poços isolados.

Ao final da coleta de dados foram identificadas 13 minerações total ou parcialmente inseridas na área de estudo. Dentre essas, 10 tiveram outorga para exploração de água subterrânea em algum período nos últimos 20 anos. Além disso, foram localizadas dentro da área de estudo 34 concessões de outorga para poços tubulares para consumo humano e industrial, as quais não apresentam relatórios periódicos, e por isso fornecem menos informações.

Ao todo foram levantados dados de 73 nascentes, 189 instrumentos de medição de nível d'água (piezômetros e INAs), 26 estações pluviométricas dentro da área e 7 estações pluviométricas na região. As séries históricas levantadas compreenderam pelo menos parte do período de interesse, entre 2000 e 2019.

### 3.2 Condições de contorno

Em modelagem hidrogeológica condições de contorno são utilizadas para definir, com base no sistema hidrogeológico real, as fronteiras hidráulicas ou físicas que delimitam o domínio do modelo, além de suas entradas e saídas (Iritani 1999). A seguir, serão descritas as condições que podem ocorrer nas fronteiras dos modelos.

As barreiras físicas podem ser exemplificadas como corpos superficiais de água que funcionam como nível de base para o aquífero, ou pela presença de rocha impermeável. Já as barreiras hidráulicas controlam o fluxo de água subterrânea, como os divisores de água ou as linhas de fluxo (Anderson *et al.* 2015).

As condições de contorno para um sistema hidrogeológico são classificadas da seguinte forma, de acordo com Anderson & Wossener (1992):

Tipo 1: carga hidráulica especificada (condição de Dirichlet): é definida a carga hidráulica ao longo dessa condição de contorno;

Tipo 2: fluxo especificado (condição de Neumann): o fluxo ao longo dessa condição de contorno é definido. Inclui a condição de fluxo nulo, a qual é definida pela especificação do fluxo como zero;

Tipo 3: fluxo dependente da carga hidráulica (condições mistas de Robin ou Cauchy): nesse tipo de condição de contorno o fluxo é calculado a partir de uma dada carga hidráulica.

Neste trabalho serão detalhadas apenas condições de fluxo nulo, visando definir os limites físicos do modelo. Foram classificadas como fluxo nulo as estruturas geológicas ou hidráulicas que dificultam a passagem do fluxo, por apresentarem permeabilidade mais baixa que as demais.

### 3.3 Definição das unidades aquíferas

Unidades aquíferas são unidades litoestratigráficas ou partes delas que apresentam características aproximadamente uniformes. As características consideradas para a definição de unidades aquíferas são principalmente a litologia, estruturas presentes nas rochas, parâmetros hidrodinâmicos e produtividade. Uma boa definição dessas unidades é de suma importância

para a construção de um modelo mais condizente com a realidade e com a escala de análise definida.

Para este trabalho foi utilizada a base geológica modificada do Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero, escala 1:50.000 (Lobato *et al.* 2005), de forma a contemplar as unidades geológicas de interesse. Foram também buscados na bibliografia os parâmetros hidrodinâmicos, descrições de cada litologia e localização de outorgas de captação de água subterrânea.

Para a distinção entre Unidades Aquíferas e Unidades Não Aquíferas foi adotado o modelo do Atlas de Águas Subterrâneas dos Estados Unidos (Miller 1999), no qual foram consideradas como aquíferos as unidades geológicas que produzem quantidades significativas de água por meio de poços ou nascentes. Dessa forma, foram consultadas na bibliografia as classificações anteriores das unidades e seus respectivos parâmetros. Foram agrupadas em unidades indivisas aquelas menos produtivas, de menor interesse.

Por fim, a disposição espacial das camadas foi obtida utilizando a base geológica citada e informações de trabalhos anteriores que abordam geologia estrutural do Quadrilátero Ferrífero (Chemale Jr. *et al.* 1994; Alkmim & Marshak 1998; Mourão 2007). Para representar a estruturação litológica da área foram confeccionados, a partir da base geológica, perfis paralelos às direções de mergulho das camadas objetivando a obtenção de suas espessuras médias, máximas e mínimas em verdadeira grandeza.

Por fim, uma estimativa da profundidade do nível d'água foi realizada a partir da análise da diferença entre as superfícies topográfica e potenciométrica, obtida por ferramentas de geoprocessamento.

### **3.4 Parâmetros Hidrodinâmicos**

Para a obtenção da condutividade hidráulica (K), armazenamento (S) e transmissividade (T) foram utilizados 15 testes de bombeamento realizados em diferentes unidades da área de estudo, obtidos do banco de dados do IGAM. Devido à baixa disponibilidade de testes e consequente baixa representatividade das unidades, os dados obtidos dessa forma foram usados apenas para comparação com os resultados de outros autores.

Para a análise dos dados obtidos, as características de cada poço, bem como a série de dados de nível d'água na curva de recuperação do teste, foram inseridas no *software* AquiferTest 2016.1 (Waterloo Hydrogeologic, 2016). Devido à heterogeneidade do sistema analisado, indisponibilidade dos perfis litológicos dos poços, e poucas informações sobre a unidade ensaiada, optou-se por interpretar as informações pelos métodos de Bouwer-Rice

(1976), no qual o poço pode ser total ou parcialmente penetrante, e Cooper-Bredehoeft-Papadoulos (1967), que permite obter tanto valores de transmissividade (T) quanto de armazenamento (S).

O método de Bouwer-Rice (1976) consiste no cálculo da condutividade hidráulica a partir de características construtivas do poço, raio efetivo do teste, rebaixamento no tempo zero e o tempo que leva para o nível d'água retornar ao inicial. Esse método assume a existência de aquífero com extensões laterais infinitas, homogêneo e de espessura uniforme, com superfície potenciométrica inicialmente horizontal e volume injetado ou retirado instantaneamente do poço. No geral, pode-se dizer que essas premissas são razoáveis, já que o raio de influência dos testes é insignificante se comparado à extensão dos aquíferos.

Por fim, o método de Cooper-Bredehoeft-Papadoulos (1967) fornece a transmissividade (T) e o coeficiente de armazenamento (S) a partir de curvas tipo. Além das premissas citadas anteriormente, esse teste também assume que o aquífero é confinado, sem drenança e isotrópico, com fluxo apenas horizontal, e o poço de bombeamento é considerado totalmente penetrante.

### **3.5 Balanço hídrico e cálculo da reserva renovável**

Em modelos hidrogeológicos regionais o balanço hídrico é de suma importância para estimar o volume de água que infiltra para o aquífero. A partir desse dado é possível mensurar impacto causado pelo bombeamento de água subterrânea.

Para o cálculo do balanço hídrico, inicialmente, foi realizada a análise pluviométrica a partir de séries de dados acessadas pelo portal Hidroweb. Foram selecionadas as oito estações distribuídas pela área de estudo e que tinham séries de dados completas entre 2000 e 2019. Posteriormente, foram selecionadas as três estações mais representativas com base na média pluviométrica da área. Assim, foi possível usar a localização das estações para separar a área em polígonos segundo o Método de Thiessen (1911), apropriado para o número de estações disponíveis e sua distribuição pela área.

Posteriormente, foram calculados o excedente hídrico, déficit hídrico, evapotranspiração real e evapotranspiração potencial pelo método do balanço hídrico climatológico de Thornthwite & Mather (1955), para a área de estudo como um todo, utilizando as planilhas de cálculo desenvolvidas por Rolim *et al.* (1998). O cálculo foi realizado para a estação mais representativa da área de acordo com a análise de Thiessen, a partir das médias mensais de precipitação dos anos de 2000 a 2019.



Para calcular o balanço hídrico climatológico é necessário estipular o valor de capacidade de água disponível no solo (CAD ou capacidade de campo), que se trata do teor de umidade que permanece em um solo após um longo período de drenagem gravitacional sem suprimento de água na superfície do terreno (Feitosa *et al.* 2008). Pereira *et al.* (2002) afirmam que para determinação do balanço hídrico climatológico apenas para caracterização da disponibilidade hídrica regional, é muito comum a adoção de valores de CAD entre 75 e 125 mm. Desta forma, foi estipulado o valor de 100 mm.

Na sequência foi calculada a taxa de recarga em cada unidade hidrogeológica pelo método da separação de hidrogramas de Barnes (1939), que consiste em separar graficamente o fluxo de base do escoamento superficial. Para esse cálculo foi avaliado o ano mais representativo do período estudado, ou seja, aquele cuja pluviometria foi mais próxima da média pluviométrica anual entre 2000 e 2019.

Para estimar a taxa de recarga, inicialmente, foram selecionadas as estações fluviométricas presentes na área e suas proximidades cujas bacias englobam majoritariamente uma das unidades hidrogeológicas de interesse. O total pluviométrico de cada mês do ano de referência foi multiplicado pela área de cada bacia para se obter o volume total precipitado mensalmente.

Em seguida, as séries de vazões médias mensais do ano definido foram plotadas para a separação de hidrogramas. Relacionando o fluxo de base com o volume precipitado foi obtida a taxa de recarga em cada uma das bacias, e conseqüentemente em cada unidade hidrogeológica.

Com a separação do fluxo de base foi possível também obter o Índice de Fluxo de Base (IFB) para os cursos hídricos de cada unidade hidrogeológica. Esse índice, segundo Gustard *et al.* (1992), consiste na proporção do fluxo de água subterrânea na vazão total de um rio, e é usado para identificar o efeito da geologia em sua vazão.

Posteriormente, utilizando os valores definidos para a taxa de recarga, estimou-se a reserva renovável do Aquífero Cauê e da área de estudo como um todo. A reserva renovável consiste no volume hídrico acumulado no meio aquífero em função da porosidade eficaz, e variável anualmente em decorrência dos aportes sazonais de água superficial, do escoamento subterrâneo e dos exultórios (Costa 1998). Para estimar esse volume utilizou-se a metodologia proposta por Costa (1998) quando se conhece a taxa de infiltração, que consiste em multiplicar a área de ocorrência do aquífero pela precipitação pluviométrica média anual na área e pela taxa de infiltração. Nesse trabalho utilizou-se a área de afloramento de cada unidade aquífera, a precipitação média anual calculada para a área de cada polígono de Thiessen e a taxa de recarga calculada anteriormente.

Inicialmente, foi calculada a reserva renovável apenas do Aquífero Cauê para cada ano hidrológico na área de domínio de cada estação pluviométrica. Somando-se os valores obtidos para os domínios de cada estação, foi obtida a reserva renovável do Aquífero Cauê na área de estudo para cada ano hidrológico de interesse, entre 2000 e 2019. Posteriormente, foi realizado o mesmo procedimento com as demais unidades, o que permitiu obter a reserva renovável de toda a área para cada ano do período analisado.

Para realizar uma comparação das reservas renováveis calculadas com o bombeamento total da área em cada ano, buscou-se no banco de dados do IGAM as vazões de bombeamento outorgadas para cada empreendimento localizado na área. Esses dados foram compilados e somados anualmente.

### **3.6 Análise de fluxo**

Para a análise de fluxo da área estudada foi confeccionado um mapa potenciométrico da região com dados de nível d'água do ano de 2019 e foi analisado por meio de gráficos o rebaixamento do nível d'água ao longo do período abordado. Tais dados foram obtidos de relatórios de empresas mineradoras, disponíveis no banco de dados do IGAM, e por esse motivo encontram-se concentrados próximos às cavas de mineração.

Para a seleção dos instrumentos de monitoramento utilizados para a construção do mapa potenciométrico foram utilizados os critérios de localização e dados disponíveis para cada instrumento, de forma que toda a área ficasse representada quanto ao nível d'água subterrâneo. As regiões com deficiência de dados foram preenchidas por pontos de controle, definidos como pontos em drenagens perenes, conectadas ao aquífero. A partir das curvas foi gerada também uma superfície potenciométrica, utilizando o *software* Leapfrog Geo, para melhor visualização dos cones de rebaixamento. Com base nas curvas construídas manualmente e na superfície gerada foram interpretadas as principais direções de fluxo existentes.

Já a análise de rebaixamento foi realizada por meio de gráficos, separados por setores, contendo a variação do nível d'água no tempo nos pontos monitorados que continham um período significativo de dados.

De posse dessas análises foi possível identificar os cones de rebaixamento mais pronunciados, a variação da carga hidráulica ao longo do tempo analisado, o nível de base da região, e comparar a velocidade de fluxo entre as unidades.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Condições de Contorno

Conforme descrito nos métodos, as condições de contorno de fluxo nulo foram definidas de acordo com o conhecimento regional da área de estudo, a partir das litologias consideradas pouco permeáveis em relação às demais.

Sendo assim, por ser uma rocha pouco porosa e de baixa conexão entre os poros, pode-se dizer que o xisto do Grupo Nova Lima, que aflora na borda leste da área, no geral é considerado impermeável. Por esse motivo, o contato entre a Formação Moeda e o Grupo Nova Lima, indicado com o número 3 na Figura 4, é considerado como condição de Neumann, de fluxo nulo. O mesmo ocorre com o Grupo Piracicaba, constituído de filito e quartzito, que aflora no centro do sinclinal, cujo contato com a Formação Gandarela encontra-se indicado na Figura 4 pelo número 4.

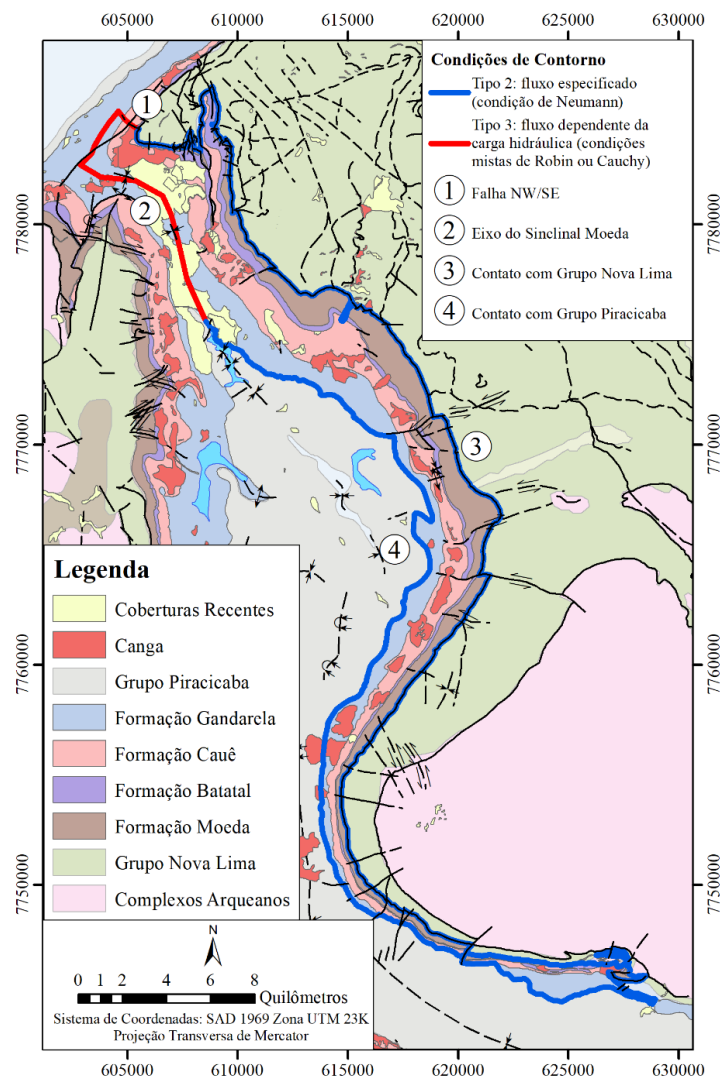


Figura 4. Condições de contorno definidas para a área de estudo

A norte da área, os grupos Itabira e Caraça apresentam continuidade para o Homoclinal da Serra do Curral. Sendo assim, foram usados como condições de contorno de Cauchy (fluxo dependente da carga) o eixo do Sinclinal Moeda, que divide a Formação Gandarela, e a Falha NW/SE que segmenta as quatro formações na interseção entre o Sinclinal Moeda e o Homoclinal Serra do Curral, ambos representados na Figura 4.

## 4.2 Definição das Unidades Aquíferas

As unidades hidrogeológicas identificadas são condizentes com as unidades geológicas. A partir de suas características litológicas e bibliografias anteriores essas unidades foram separadas em aquíferas e não-aquíferas, como mostra a Tabela 3.

As litologias aquíferas possuem alta permeabilidade e são consideradas potenciais aquíferos por Bertachini (1994) e Beato *et al.* (2006). As demais litologias apresentam menor capacidade de armazenamento e/ou permeabilidade, razão pela qual serão consideradas unidades não produtivas. São constituídas predominantemente por litologias que em geral apresentam baixa produtividade e menor potencial hidrogeológico que as demais.

Tabela 3. Descrição e geometria das unidades hidrogeológicas identificadas no flanco leste do Sinclinal Moeda

Unidade Hidrogeológica:	Litologia Predominante	Área de Afloramento (km <sup>2</sup> )	Espessura (m)	Profundidade do Nível da Água (m)
<b>Aquífero Aluvionar:</b> Aquífero poroso com alta capacidade de armazenamento; livre, descontínuo e heterogêneo.	Depósitos aluviais e lateríticos	13,29	-	-
<b>Aquitardo Piracicaba:</b> Unidade não aquífera.	Quartzito e filito	126,83	-	Média: 43 Máx.: 235
<b>Aquífero Gandarela:</b> Localmente carstificado e fissural; predominantemente livre, confinado localmente por depósitos argilosos; heterogêneo e anisotrópico.	Dolomito	38,26	Média: 630 Máx.: 1650 Mín: 20	Média: 64 Máx.: 235
<b>Aquífero Cauê:</b> Aquífero poroso em superfície e fraturado em profundidade. Alta condutividade hidráulica no geral. Predominantemente livre, heterogêneo e anisotrópico.	Itabirito	48,16	Média: 650 Máx.: 1400 Mín: 200	Média: 108 Máx.: 276
<b>Aquitardo Batatal:</b> Unidade não aquífera. Devido à sua baixa espessura, transmite mais água do que os outros aquitardos.	Filito	11,14	Média: 110 Máx.: 300 Mín: <20	Média: 86 Máx.: 245
<b>Aquífero Moeda:</b> Predominantemente fissural; principalmente livre, heterogêneo e anisotrópico.	Quartzito	32,17	Média: 400 Máx.: 1300 Mín.: 40	Média: 76 Máx.: 224
<b>Aquitardo Nova Lima:</b> Unidade não aquífera.	Xisto e filito	63,9	-	Média: 56 Máx.: 251
<b>Aquitardo Complexo Bação:</b> Unidade não aquífera.	Gnaisse	11,9	-	Média: 49 Máx.: 184

Vale ressaltar que as litologias não aquíferas podem se comportar localmente como aquíferos, dependendo principalmente do seu nível de fraturamento. Por esse motivo há conexão entre o Aquitardo Batatal e o Aquífero Cauê, conforme observado por Ventura e Bacellar (2011). Assim, as unidades consideradas como condições de contorno foram chamadas de aquitardos, conforme listado na Tabela 3, e os aquíferos Gandarela, Cauê, Moeda e o Aquitardo Batatal foram considerados um sistema aquífero, com trocas de água entre as quatro unidades.

Apesar de as coberturas aluvionares serem consideradas aquíferos, sua baixa espessura em comparação com as demais unidades as torna irrelevantes nesse estudo regional, sendo considerado apenas como unidade de armazenamento e facilitadora de recarga para as unidades sotopostas.

Ainda que não seja a única unidade aquífera, vale destacar a importância do Aquífero Cauê como o mais produtivo da região, a qual pôde ser averiguada pelo número de poços de bombeamento alocados nessa unidade. Ao todo, foram identificados 185 poços outorgados na área de estudo entre poços de abastecimento e de rebaixamento de nível. Dentre esses, 136 estão localizados na Formação Cauê, e os demais encontram-se divididos entre as unidades Nova Lima (10), Moeda (8), Batatal (17) e Gandarela (14). Além disso, dentre as unidades consideradas aquíferas, o Aquífero Cauê é o que tem a maior área aflorante na região estudada, conforme elencado na Tabela 3.

Em relação à profundidade do nível d'água observado na Tabela 3, nota-se um padrão bem definido: a maior profundidade em relação à superfície é registrada no Aquífero Cauê, com a redução progressiva nas unidades adjacentes, sendo o nível mais raso no Aquitardo Piracicaba. Isso ocorre como resultado não só das maiores cotas de afloramento da Formação Cauê, mas também devido ao bombeamento, que ocorre majoritariamente nessa unidade aquífera.

A partir dos perfis, confeccionados manualmente com base no mapa geológico de Lobato *et al.* 2005, foi possível obter as espessuras de cada unidade hidrogeológica. Como observado no mapa geológico e no trabalho de Braga (2006) as unidades Gandarela, Cauê, Batatal e Moeda apresentam maior espessura na porção norte da área, com adelgaçamento na porção sul. A mesma característica foi observada em perfil, como pode ser notado na Figura 5.

A espessura da Formação Cauê varia entre 200 m, a sul, a 1400 m na porção norte do Sinclinal Moeda. Já a Formação Gandarela apresenta maior variação, sendo sua maior espessura de aproximadamente 1650 m e a menor de 20 m. O mesmo padrão é observado na Formação Moeda, que chega à espessura de 1300 metros no norte do sinclinal e aproximadamente 40

metros em sua porção sul, corroborando para a hipótese de Braga (2006). As espessuras encontradas estão de acordo com Maxwell (1972), Beato *et al.* (2006), Rosière & Chemale Jr (2013) e Rossi (2014).

Como mostra a Figura 5, no Sinclinal Moeda as unidades aquíferas atingem profundidades de mais de 1500 metros, e na região estudada o nível d'água mais profundo registrado pelos instrumentos levantados está na cota de 870 metros. Devido à grande espessura dos pacotes e o conhecimento que a porosidade diminui com a profundidade, foi adotada a divisão de cada aquífero na metade de sua profundidade, sendo o pacote superior o de maior porosidade.

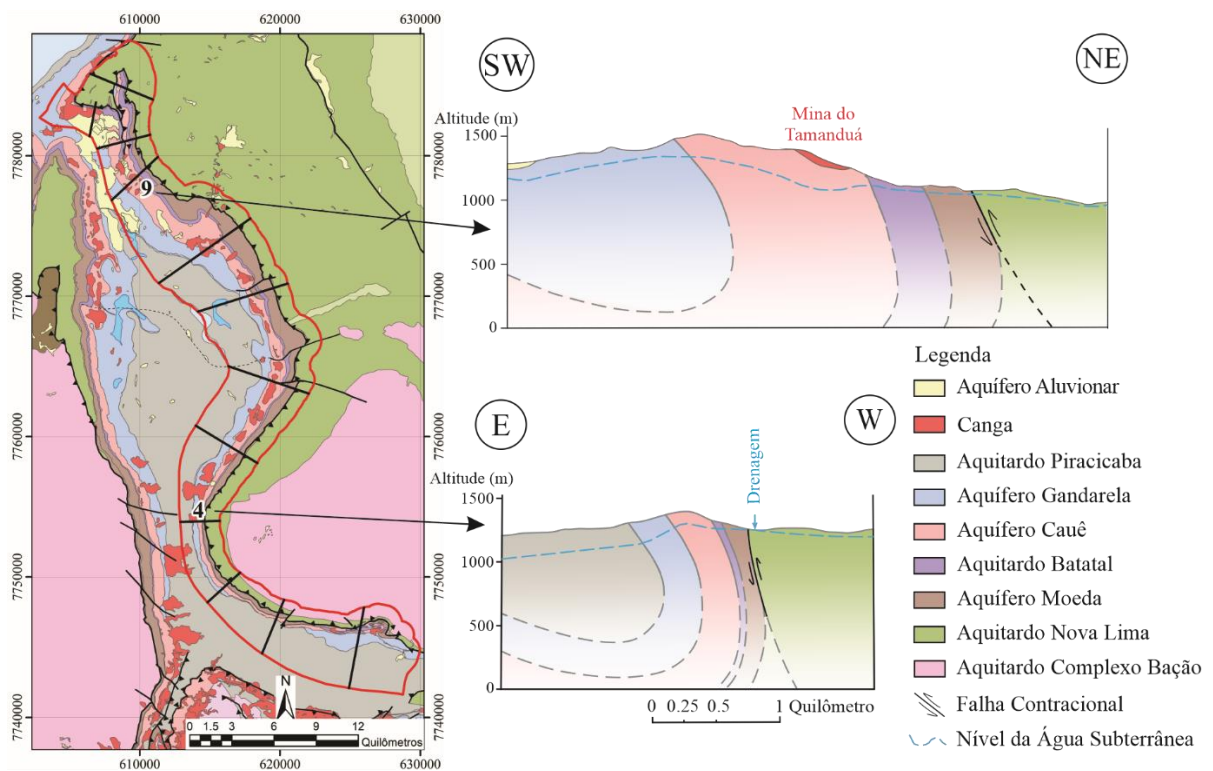


Figura 5. Perfis litológicos a norte e a sul da área de estudo (sem exagero vertical)

### 4.3 Parâmetros Hidrodinâmicos

Para a obtenção dos parâmetros foram analisadas apenas as unidades aquíferas devido à baixa disponibilidade de dados. Essa etapa resultou nos valores apresentados na Tabela 4, sendo os dados de condutividade hidráulica obtidos pelo método de Bower e Rice (1976) e os valores de transmissividade e armazenamento obtidos pelo método de Cooper *et al.* (1967). Ao todo foram analisados 15 testes de bombeamento de poços localizados nas três unidades aquíferas identificadas, a maioria localizada no Setor Norte da área, com exceção de três poços, um em cada um dos demais setores. Portanto, os valores obtidos são mais representativos da região norte. A localização dos poços utilizados encontra-se no Apêndice A.

No geral, pode-se observar que os valores de condutividade hidráulica obtidos foram similares para as três unidades, da ordem de  $10^{-7}$  a  $10^{-8}$  m/s. Para o Aquífero Cauê, o valor está muito abaixo dos apresentados por Mourão (2007) e Schlumberger (2017), porém, é condizente com os obtidos por Mesquita (2017) e Betachini (2020). A condutividade hidráulica do Aquífero Moeda é similar à apresentada por Mourão (2007), e o Aquífero Gandarela, além de estar abaixo do valor mínimo obtido por Mourão (2007), também se encontra abaixo dos valores de Schlumberger (2017). A variação da condutividade hidráulica do Aquífero Cauê pode estar ligada à heterogeneidade e anisotropia do sistema. Esses valores tendem a diminuir em profundidade devido à diminuição dos espaços vazios e/ou fechamento das fraturas.

Tabela 4. Parâmetros hidrodinâmicos obtidos a partir de testes de bombeamento

<i>Parâmetro</i>		<i>Aquífero Cauê</i>	<i>Aquífero Moeda</i>	<i>Aquífero Gandarela</i>
<i>Nº de testes</i>		7	4	4
<i>K (m/s)</i>	Máximo	$5,62 \times 10^{-6}$	$5,35 \times 10^{-7}$	$1,69 \times 10^{-7}$
	Média	$9,45 \times 10^{-7}$	$2,59 \times 10^{-7}$	$7,38 \times 10^{-8}$
	Mínimo	$2,40 \times 10^{-8}$	$2,15 \times 10^{-8}$	$3,35 \times 10^{-8}$
<i>T (m<sup>2</sup>/s)</i>	Máximo	$2,53 \times 10^{-4}$	$1,62 \times 10^{-4}$	$1,51 \times 10^{-5}$
	Média	$9,75 \times 10^{-5}$	$4,60 \times 10^{-5}$	$5,71 \times 10^{-6}$
	Mínimo	$5,63 \times 10^{-6}$	$8,34 \times 10^{-7}$	$1,16 \times 10^{-6}$
<i>S</i>	Máximo	$5,00 \times 10^{-1}$	$5,00 \times 10^{-1}$	$1,78 \times 10^{-1}$
	Média	$2,86 \times 10^{-1}$	$1,40 \times 10^{-1}$	$5,60 \times 10^{-2}$
	Mínimo	$3,09 \times 10^{-9}$	$9,34 \times 10^{-4}$	$3,87 \times 10^{-8}$

Quanto aos valores de transmissividade, devido à ampla variação da espessura dos aquíferos não seria adequado comparar os valores obtidos com aqueles apresentados na bibliografia.

O armazenamento mais alto foi verificado no Aquífero Cauê, que se trata de aquífero livre assim como o Aquífero Moeda e o Aquífero Gandarela. Resultados similares foram obtidos por Schlumberger (2017) e Mesquita (2017) tanto para o Aquífero Cauê como para o Aquífero Gandarela. Observando os valores mínimos obtidos pode-se dizer que os aquíferos Cauê e Gandarela apresentam porções confinadas, característica que pode não ter sido detectada no Aquífero Moeda devido ao baixo número de testes analisados.

#### 4.4 Balanço hídrico e reserva renovável

O mapa dos domínios das estações pluviométricas, de acordo com o método de Thiessen (1911), mostra as três (3) estações utilizadas para a análise pluviométrica (Figura 6). Observa-

se que a pluviometria no período chuvoso é maior nas estações mais a norte, ultrapassando 400 mm no mês de dezembro na estação Caixa de Areia, como mostra o gráfico dessa estação.

A tabela apresentada na Figura 6 mostra a área representada por cada estação pluviométrica, as respectivas pluviometrias anuais médias e os resultados obtidos pelo método de Thiessen. A pluviometria média anual para a área de estudo como um todo foi de aproximadamente 1490 mm considerando o período entre 1999 e 2019. Esse valor tem grande influência da maior representatividade das estações Rio do Peixe e Itabirito, que contribuem com aproximadamente 90% do volume precipitado na área.

Já para a realização do balanço hídrico climatológico de Thornthwaite-Mather (1955) foi considerado o total pluviométrico de 1576 mm na estação Rio do Peixe, a de maior representatividade areal e de valor mais próximo do obtido pelo método de Thiessen. Considerou-se a capacidade de campo como 100 mm. Como média do período estudado, obtiveram-se para toda a área: ETR de 888 mm (56%), ETP de 1059 mm, EXC de 701 mm (44%), DEF de 171 mm. Ocorre déficit hídrico entre os meses de abril e outubro e excedente hídrico entre novembro e março. Tais valores são condizentes com o clima subtropical úmido já que a precipitação é maior do que a evapotranspiração.

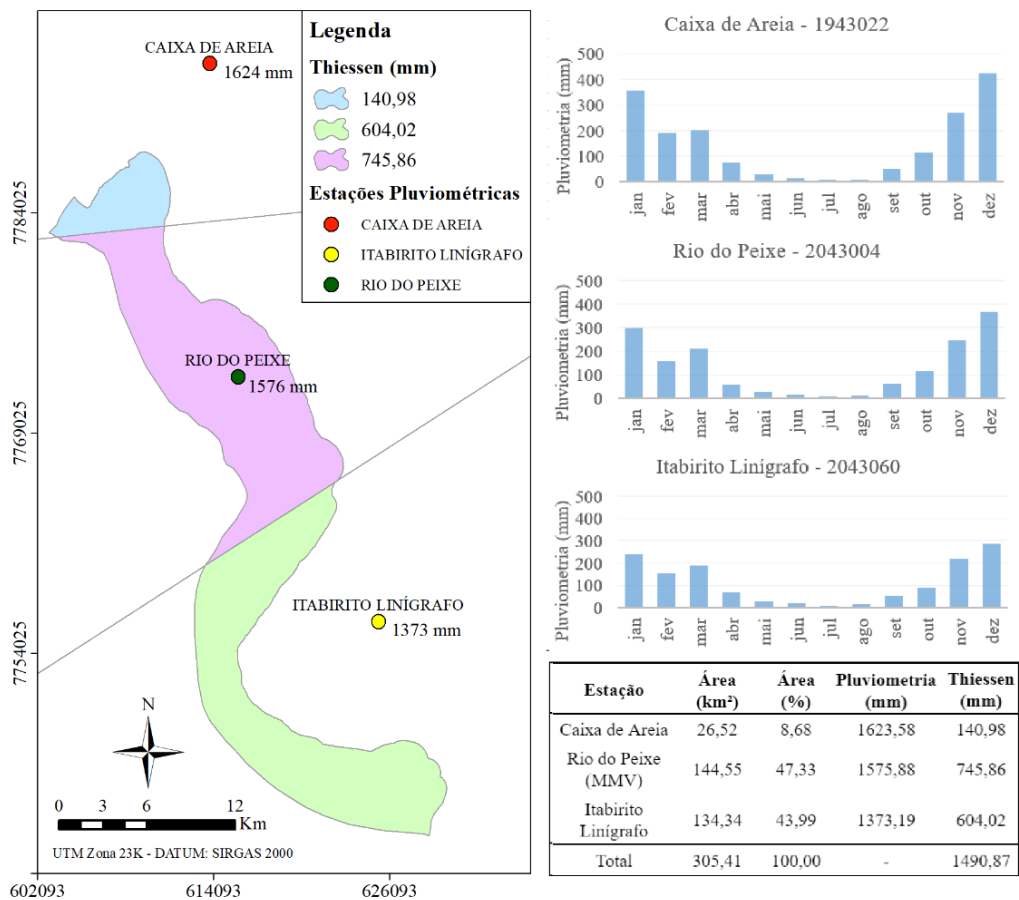


Figura 6. Localização das estações pluviométricas selecionadas e separação dos Polígonos de Thiessen. Os dados pluviométricos são referentes a médias mensais e anuais entre 1999 e 2019.



Para a estimativa de recarga, conforme o método descrito, foram selecionadas 17 bacias adequadas, em litologias diversas, como exemplificado na Figura 7 e demonstrado na Tabela 5, e foram calculadas as suas áreas. Observa-se que as bacias selecionadas se encontram em apenas uma litologia. A delimitação de todas as bacias utilizadas para o cálculo encontra-se no Apêndice A.

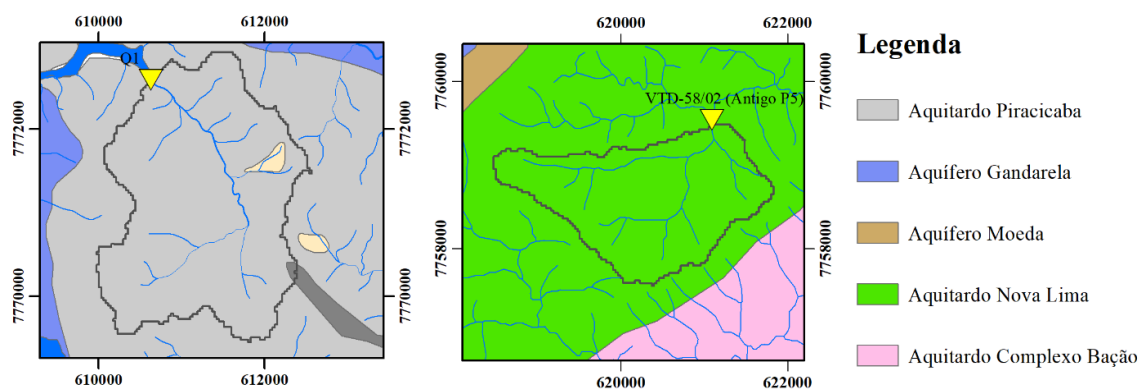


Figura 7. Exemplos de bacias utilizadas para o cálculo da recarga

A partir da consolidação das informações obtidas a partir dos polígonos de Thiessen e da separação de hidrogramas, foi possível obter os valores de recarga e índices de fluxo de base (IFB) apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Comparação entre as taxas de recarga obtidas a partir da bibliografia e da separação de hidrogramas, e índice de fluxo de base calculado

Unidade Hidrogeológica	Número de bacias selecionadas	Recarga calculada (%)	Recarga (%) Mourão (2007)	Recarga (%) Freitas e Bacellar (2013)	IFB (%)
Aquífero Cauê	5	38,67	39,52	-	69
Aquífero Gandarela	1	16,52	21,90	-	41
Aquífero Moeda	-	-	-	-	-
Aquitardo Nova Lima	2	20,03	37,02	28	84
Aquitardo Piracicaba	8	12,42	-	-	45
Aquitardo Batatal	1	5,85	-	-	49
Aquitardo Complexo Bação	-	-	-	18	-

Observa-se que a taxa de recarga calculada para o Aquífero Cauê foi bem próxima daquela obtida por Mourão (2007). Já a baixa recarga do Aquífero Gandarela se deve provavelmente a sua baixa porosidade primária, que segundo Mourão (2007) encontra-se entre 1,5 e 2,5%, e escassez de fraturas na bacia monitorada. Para o Aquífero Moeda não foram localizadas bacias adequadas para o cálculo da recarga e a taxa também não foi encontrada em outras bibliografias.

Quanto ao índice de fluxo de base (IFB), as taxas mais altas obtidas foram as do Aquífero Cauê e do Aquitardo Nova Lima. No Aquífero Cauê isso se justifica por sua alta permeabilidade e condutividade hidráulica (Tabela 4), que facilitam a infiltração em detrimento do escoamento superficial. Já no Aquitardo Nova Lima o alto índice de fluxo de base se deve à

sua heterogeneidade. Em certos locais essa unidade pode se comportar como um aquífero fissural produtivo, podendo ser caracterizado como barreira semipermeável. O Aquífero Gandarela, por sua vez, apresentou baixo IFB devido à sua anisotropia. Já o índice baixo do Aquitardo Batatal evidencia sua baixa produtividade, assim como ocorre com o Aquitardo Piracicaba.

Os valores de taxa de recarga calculados nesse trabalho foram usados como base para estimar a reserva renovável, cujos resultados encontram-se na Figura 8. Não foi possível calcular a recarga no Aquífero Moeda e no Aquífero Complexo Bação devido à ausência de estações fluviométricas cujas bacias estão localizadas majoritariamente nessas unidades. Dessa forma, para o cálculo da reserva renovável foram usados, para o Aquífero Moeda, a média entre a taxa de recarga das demais unidades aquíferas (Cauê e Gandarela), e para o Aquitardo Complexo Bação, a recarga obtida por Freitas e Bacellar (2013). As taxas de recarga de cada unidade (Tabela 5) foram multiplicadas por sua área de afloramento (Tabela 3) e pela precipitação média anual em cada polígono de Thiessen (Figura 6), resultando na reserva renovável estimada. Os resultados encontram-se no Apêndice B.

A Figura 8 apresenta a reserva renovável calculada para o Aquífero Cauê e para a área de estudo como um todo. Foram somados os volumes de bombeamento outorgados anualmente em toda a área, sendo o resultado representado no gráfico pela linha vermelha. O volume captado foi considerado igual ao volume concedido pelo IGAM, uma vez que não há dados confiáveis disponíveis sobre a taxa de bombeamento exata de cada mina.

A partir do gráfico observa-se que nos anos de maior estiagem, como 2013/2014, o volume captado aproxima-se da reserva renovável total da área. Isso sugere que há um impacto regional considerável decorrente da exploração, mesmo com a contribuição de todo o sistema aquífero avaliado para o volume explorado, o que pode impactar a disponibilidade hídrica da região. O balanço hídrico descrito a seguir ilustra melhor essa situação.

O volume médio da reserva renovável no Aquífero Cauê é da ordem de 27 milhões de  $m^3$ /ano, enquanto na área como um todo a reserva renovável é de aproximadamente 93 milhões de  $m^3$ /ano. Assim, apesar de representar apenas 15% da área de estudo, o Aquífero Cauê contribui com cerca de 30% da recarga na região.

Para realizar o balanço hídrico da área como um todo, considerou-se que o excedente hídrico total consiste na soma da reserva renovável, escoamento superficial, escoamento subsuperficial e volume retirado do sistema (captações superficiais e subterrâneas). Considerando o excedente hídrico anual de 701 mm, obtido pelo método de Thornthwaite-Mather (1955), na área de 305  $km^2$ , foi calculado um volume de excedente hídrico de 214

milhões de metros cúbicos por ano. A reserva renovável foi anteriormente estimada em 93 milhões de  $m^3$ /ano e o volume médio bombeado no período analisado foi de 41 milhões de  $m^3$ /ano. Assim, desconsiderando as captações superficiais que podem ocorrer, pode-se dizer que o volume de escoamento superficial e subsuperficial totalizam aproximadamente 80 milhões de  $m^3$ /ano, ou seja, 37% do excedente hídrico.

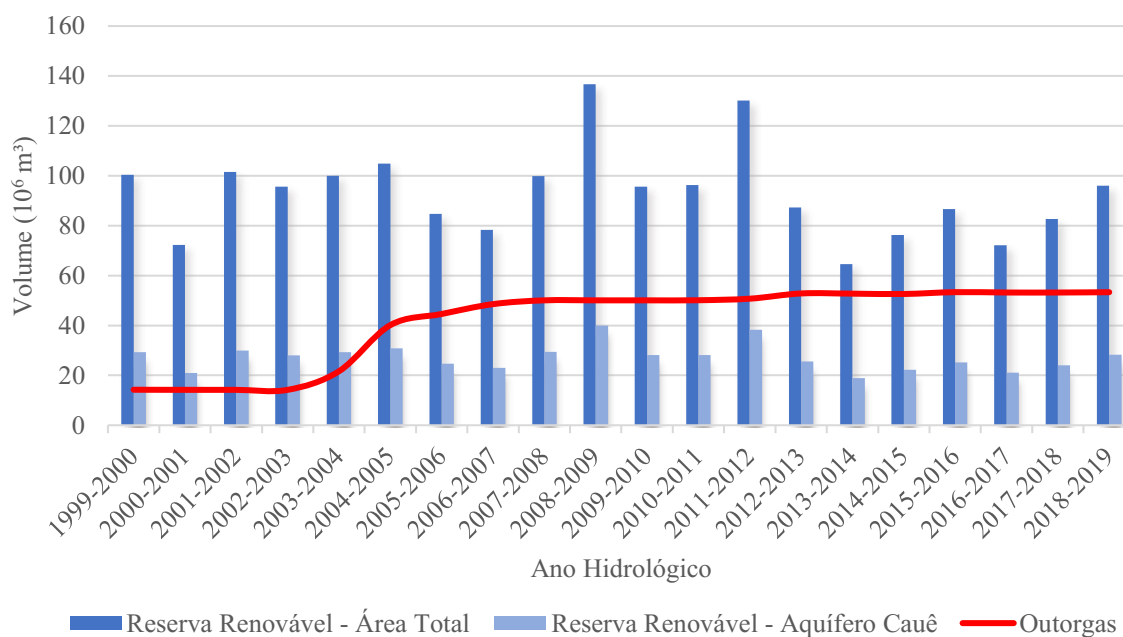


Figura 8. Resultados obtidos para os cálculos da reserva renovável comparados às vazões outorgadas

A partir desses dados, pode-se estimar o Índice de Fluxo de Base médio da área, somando a reserva renovável e as captações subterrâneas, e dividindo esse valor pelo excedente hídrico total. Esse cálculo mostra um IFB médio de 63%. Já o IFB médio da área dado pelo método da separação de hidrogramas resulta em 58%, o que é bastante próximo e revela significativa contribuição do fluxo subterrâneo na vazão dos rios.

Usando a mesma lógica especificamente para o Aquífero Cauê, com o mesmo excedente hídrico de 701 mm e área de 48 km<sup>2</sup> onde aflora essa unidade, o volume do excedente hídrico estimado é de 33,6 milhões de metros cúbicos por ano. Subtraindo desse valor a reserva renovável média de 27 milhões de  $m^3$ /ano, o escoamento superficial resultante, somado às captações superficiais e escoamento subsuperficial, é de aproximadamente 6,6 milhões de metros cúbicos, ou seja, 20% do excedente hídrico. Essa proporção indica que a taxa de escoamento superficial no Aquífero Cauê é muito menor do que nas demais unidades, o que é corroborado pelo alto índice de fluxo de base dessa unidade (69%). Esses valores, entretanto, foram baseados no método de Thornthwaite-Mather (1955), que desconsidera as captações.

Levando em conta o bombeamento, 73% dos poços levantados encontram-se no Aquífero Cauê. Como essa unidade tem maior condutividade hidráulica e armazenamento que as demais, espera-se que contribua com vazão ainda mais significativa. O volume bombeado na área anualmente foi estimado em 41 milhões de metros cúbicos em média, considerando as taxas de bombeamento outorgadas, que consiste em cerca de uma vez e meia a reserva renovável do Aquífero Cauê. Isso significa que enquanto o aquífero é recarregado com uma vazão média de 3082 m<sup>3</sup>/h, bombeia-se cerca de 4680 m<sup>3</sup>/h. Nota-se pelo gráfico que desde o ano de 2004 o volume outorgado é maior do que a reserva renovável dessa unidade aquífera.

As principais incertezas dessas estimativas são os volumes de bombeamento e a taxa de recarga. A quantidade de água concedida é o bombeamento mínimo que ocorre na região, pois não há como contabilizar poços não registrados. Assim, o impacto gerado é provavelmente maior do que o apresentado. Além disso, a taxa de recarga pode variar localmente devido à cobertura do solo, uso da terra e variações da litologia, mas é mais provável que seja reduzida na realidade, pois esses são obstáculos à recarga do aquífero. Outra incerteza é que nenhum dado do banco de dados do IGAM foi verificado em campo, podendo haver outras captações e contribuições para o escoamento superficial, assim como imprecisões no banco de dados em geral.

No entanto, considerando os valores estimados, o volume bombeado ultrapassa a reserva renovável em 14 milhões de metros cúbicos. Esse volume pode ser proveniente de três fontes:

- 1) Da reserva permanente: É esperado que o bombeamento afete a reserva permanente, já que para o rebaixamento do nível d'água em minerações é necessário explorar parte desse volume. Ocorre, entretanto, que esse bombeamento não está retornando para o sistema natural;
- 2) Do escoamento superficial: Ao interferir no nível da reserva permanente do aquífero, a influência da água subterrânea na drenagem superficial diminui, tendendo a reduzir sua vazão;
- 3) Das demais unidades: A superexploração do Aquífero Cauê, o mais permeável da região, pode gerar reversão de fluxo nos setores de maior bombeamento, ou seja, a água pode passar a fluir das unidades menos permeáveis em direção às mais permeáveis onde isso não ocorria anteriormente. Esse aspecto será mais bem descrito no tópico seguinte.

#### 4.5 Análise de fluxo do sistema aquífero

Para analisar se há reversão de fluxo ou outras anomalias, a partir da compilação de séries de monitoramento de nível d'água das quatro unidades hidrogeológicas foram gerados os mapas e os gráficos apresentados nas Figuras 9, 10 e 11. Para a análise de fluxo a área foi subdividida em quatro setores identificados como Norte, Central 1, Central 2 e Sul, de acordo com estruturas geológicas e o comportamento do fluxo subterrâneo. Nota-se também que os setores separam áreas com diferentes direções principais das camadas litológicas em relação ao norte.

No setor sul não foram identificados no banco de dados do IGAM empreendimentos que realizam exploração de água subterrânea, portanto nessa região as curvas equipotenciais foram geradas a partir de pontos de controle (rede de drenagem e topografia), e podem não ser representativas da potenciométrica local real. Por esse motivo, o mapa e os gráficos apresentam apenas instrumentos localizados nos setores norte e centrais.

A partir do mapa de superfície potenciométrica gerado para o sistema aquífero (Figuras 9 e 10), observa-se que os níveis d'água mais baixos estão localizados no setor sul e ao longo da borda leste da área estudada, enquanto as porções com os níveis de água mais altos estão aproximadamente alinhadas em uma faixa que corta os setores centrais e norte. Essa faixa acompanha a área mapeada do Aquífero Cauê, o que indica uma maior influência desta unidade sobre o nível d'água nos setores norte e centrais, onde essa unidade apresenta maior espessura. Além disso, esse padrão sugere que a principal direção de fluxo subterrâneo é para sul, em direção ao Rio Itabirito, nível de base local, com gradiente hidráulico de 8,75 m/km, e para leste, em direção ao Rio das Velhas, nível de base regional, com gradiente hidráulico médio de 80 m/km.

É importante destacar que o mapa representa o fluxo regional, não local, principalmente no setor sul. Considerando que os instrumentos do setor Central 2 apresentam um nível médio de cerca de 1300 m e que a elevação do Rio Itabirito é de cerca de 1000 m no extremo sul, pode-se notar que o fluxo tem direção predominantemente para sul. Isso é corroborado pela superfície potenciométrica apresentada na Figura 10(d), que mostra a redução do nível em direção ao sul.

No setor Central 2, também é notável a função do Aquífero Cauê como divisor de águas, mas com um gradiente hidráulico maior para leste do que para oeste. Neste setor existe um cone de depressão alongado na direção aproximada norte-sul, com escoamento de norte para sul e de sul para norte, gerando convergência para o centro da cava existente. Ao norte do Setor Central

2 o cone de depressão torna-se mais pronunciado, apresentando contribuições dos Aquíferos Gandarela e Moeda para o Aquífero Cauê.

Neste setor é significativo o rebaixamento do nível d'água medido pelos instrumentos ao longo do período estudado, conforme mostra o gráfico (Figura 11). Entre 2000 e 2019, pode-se notar que um desses instrumentos apresentou um rebaixamento de cerca de 80 metros.

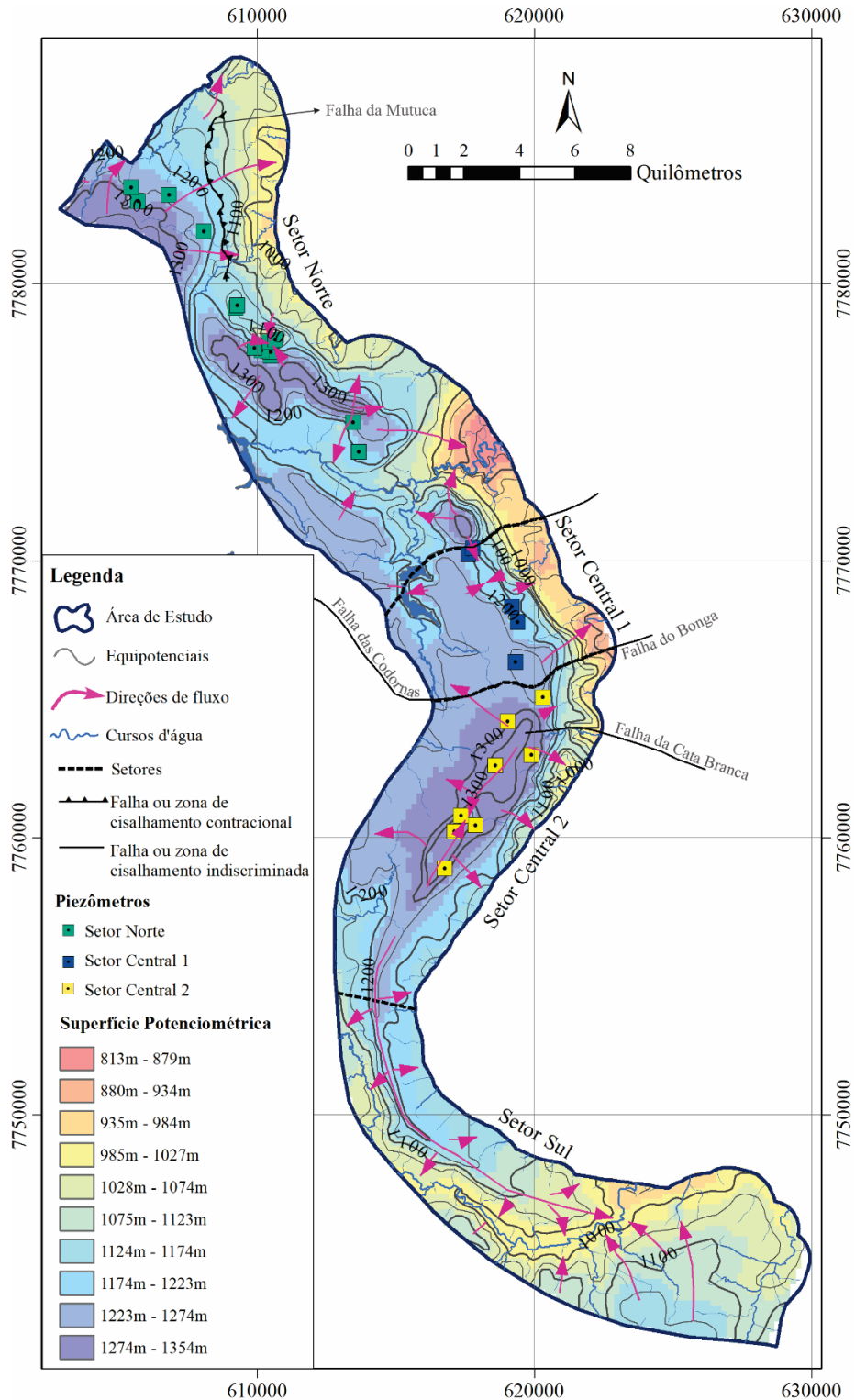
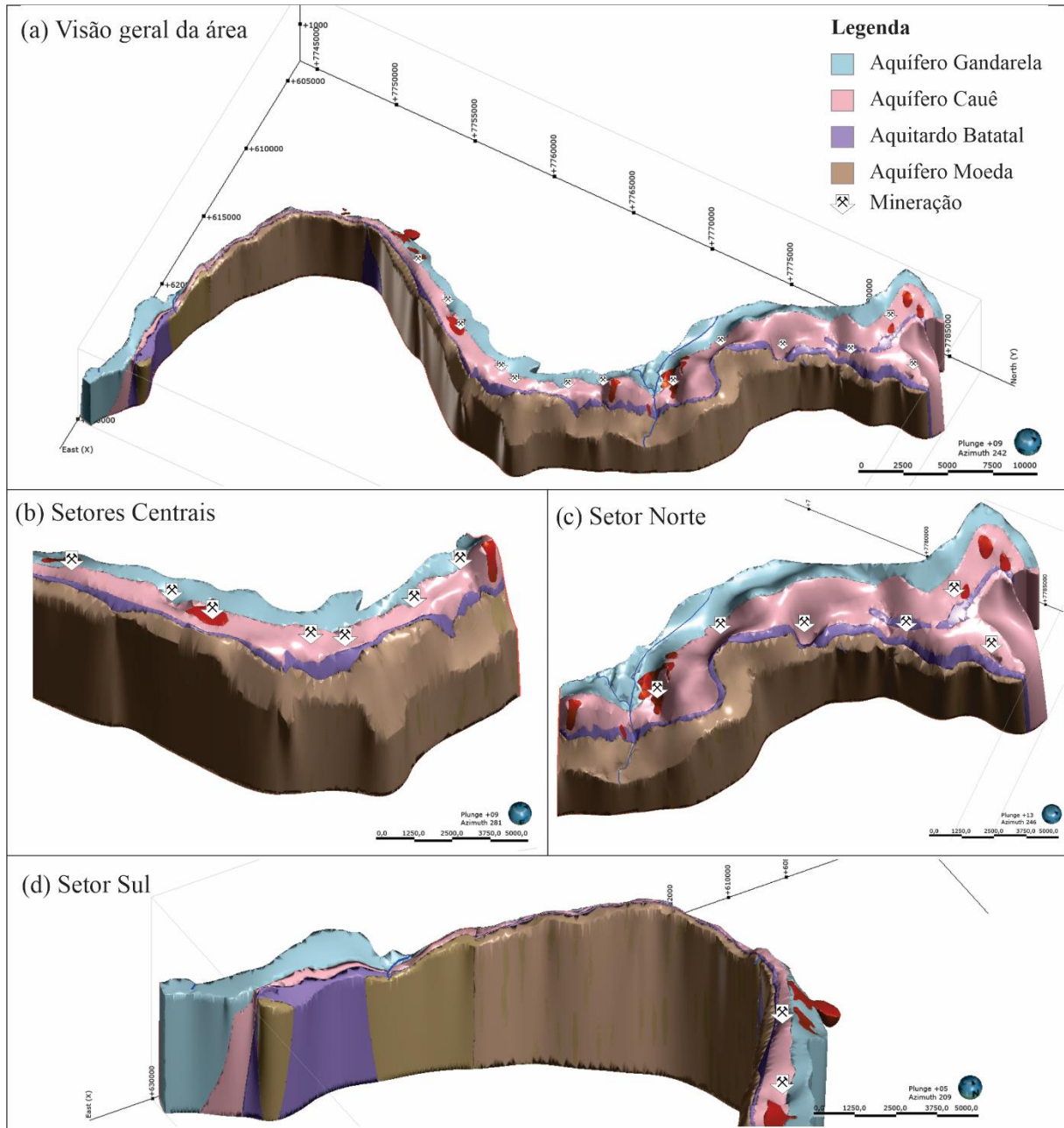


Figura 9. Mapa potenciométrico do flanco leste do Sinclinal Moeda referente ao ano de 2019



Fonte: gerado usando Leapfrog Geo, um software da Bentley. (Bentley Systems, 2021) Copyright © Bentley Systems, Incorporated

Figura 10. Vista tridimensional superfície potenciométrica nas principais unidades da área estudada. As setas indicam a localização das mineradoras. Exagero vertical: 10×.

No setor Central 1 a presença do divisor de águas não é tão pronunciada. Nesta região nota-se um agressivo cone de depressão, com reversão do fluxo tanto na direção E-W quanto na direção N-S. Observa-se, ao contrário do esperado, que o fluxo é de norte a sul, e ao norte está o Rio Do Peixe, importante nível de base local. O fluxo convergente também é observado em direção à faixa central do setor, apesar do intenso gradiente hidráulico regional a leste, sendo a faixa central a de maior condutividade hidráulica (Aquífero Cauê). Também é notável o rebaixamento desses instrumentos na Figura 11.

Por fim, no setor Norte observa-se novamente a atuação do Aquífero Cauê como divisor de águas. É notável a contribuição do fluxo subterrâneo na direção da calha do Rio das Velhas, sendo o gradiente hidráulico muito mais intenso para leste. Isso ocorre pois o Aquitardo Piracicaba é mais impermeável do que os Aquitardos Batatal e Nova Lima, o que acarreta menor impacto no centro do Sinclinal Moeda. No centro do Setor Norte observa-se também cone de rebaixamento com reversão de fluxo, sendo que o nível d'água nessa região atinge cotas abaixo de 1000m. Nesse Setor, no geral, o fluxo converge para o Rio do Peixe, que drena para o Rio das Velhas.

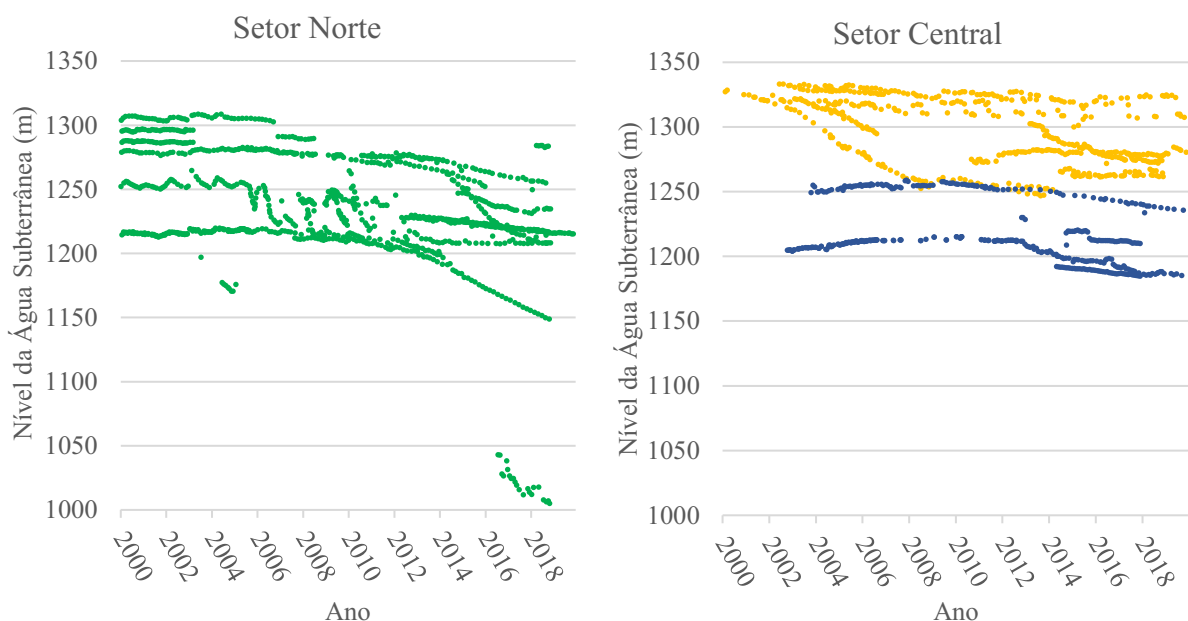


Figura 11. Gráficos de rebaixamento do nível d'água entre 2000 e 2019. Os instrumentos em amarelo representam o setor Central 2 e os instrumentos em azul representam o setor Central 1

De forma geral pode-se dizer, então, que o fluxo regional da área tende para sul, e é mais pronunciado para o sentido do Rio das Velhas do que para o centro do Sinclinal. Também se observa na área como um todo que o Aquífero Cauê atua como divisor de águas, o que é menos evidente no Setor Central 1, onde ocorre o maior impacto. No Aquífero Cauê também se encontram os níveis mais profundos da superfície potenciométrica em relação à topografia, o que pode ser visto na Figura 10 e na Tabela 3.

Em relação às séries históricas apresentadas, destaca-se que foram representados nos gráficos apenas os instrumentos localizados no Aquífero Cauê, e que os instrumentos levantados se encontram concentrados dentro e ao redor de cavas de mineração. De maneira geral os piezômetros rebaixaram em média 37 metros em 20 anos, sendo os setores Norte e Central 2 os que sofreram maior impacto, com cerca de 40 metros de rebaixamento em média, e o Setor Central 1 o de menor rebaixamento, de cerca de 23 metros.



Diante dessa análise é importante ressaltar que, embora a grande maioria dos poços da região estejam perfurados no Aquífero Cauê, o volume bombeado também é proveniente das unidades adjacentes como o Aquífero Gandarela, em menor proporção do Aquitardo Batatal e do Aquífero Moeda.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho gerou informações que compõem o modelo conceitual hidrogeológico de fluxo do flanco leste do Sinclinal Moeda, o qual inclui o Aquífero Cauê, Aquífero Gandarela e o Aquífero Moeda.

A importância das águas subterrâneas na manutenção das vazões de drenagem pode ser demonstrada pelo Índice de Fluxo de Base calculado de 63%. Essa significativa contribuição do fluxo de base para a drenagem superficial é de extrema importância para o abastecimento da RMBH ao longo do ano.

Quanto à exploração que vem ocorrendo no aquífero, esta ultrapassa 50% da reserva renovável do Aquífero Cauê e se aproxima da reserva renovável da área. Isso significa que a exploração afeta também a reserva permanente, o escoamento superficial e as unidades adjacentes ao Aquífero Cauê. Considerando as incertezas apresentadas, o impacto gerado é provavelmente maior do que o estimado.

Nos setores Norte e Centrais foram identificados cones de rebaixamento relacionados às minerações levantadas. O maior impacto foi verificado nos setores Norte e Central 2, com rebaixamento médio de 40 metros. O Setor Central 1, apesar de ter sofrido menor rebaixamento, mostra indícios de impacto significativo e reversão de fluxo. Apesar da falta de dados no Setor Sul, pode-se dizer que este setor sofreu menor impacto, uma vez que ali não se localizam grandes empreendimentos ou concessões.

Apesar da ausência de uma rede regional de monitoramento hidrológico, pode-se concluir que o Aquífero Cauê apresenta diferentes níveis de impacto em cada um dos setores identificados. Em geral, parece haver um desequilíbrio entre a exploração e a recarga, o que pode impactar o escoamento superficial.

Como as águas superficiais não são o foco deste trabalho, outro estudo deve ser realizado sobre as águas superficiais e subterrâneas, quantificando o impacto regional na Bacia Hidrográfica do Alto Rio das Velhas. Além disso, destacamos a necessidade de uma rede de monitoramento quantitativa na região, para gerar modelos mais robustos no futuro e aprimorar a gestão hídrica no Sinclinal Moeda.

## **6 AGRADECIMENTOS**

À UFMG e Instituto de Geociências por proporcionar o desenvolvimento do trabalho; ao IGAM e Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável pela parceria e fornecimento do banco de dados.

## Capítulo 2 – Artigo 2

### **Modelagem numérica hidrogeológica no flanco leste do Sinclinal Moeda: Análise da situação atual e perspectivas futuras para o Aquífero Cauê (Quadrilátero Ferrífero – MG, Brasil)**

Celina Cenni de Castro Magalhães<sup>1</sup>, Rodrigo Sergio De Paula<sup>1</sup>, Marília Carvalho de Melo<sup>2,3</sup>, Nilson Guiguer<sup>4</sup>, Breno Alexandre Pereira<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte (MG), Brasil.

<sup>2</sup>Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – Belo Horizonte (MG), Brasil.

<sup>3</sup>Departamento de Recursos Hídricos, Universidade Vale do Rio Verde – Três Corações (MG), Brasil.

<sup>4</sup>Water Services and Technologies – Florianópolis (SC), Brasil.

<sup>5</sup>IGEO Hidrogeologia Ltda – Belo Horizonte (MG) Brasil.

#### **RESUMO**

O Sinclinal Moeda, localizado na porção central de Minas Gerais, contém parte do Aquífero Cauê, unidade hidrogeológica de suma importância para o abastecimento hídrico da Região Metropolitana de Belo Horizonte. O desaguamento das minas de ferro da região, necessário para a continuidade da operação de 11 minas de ferro no flanco leste do sinclinal, demandou em 2019 o bombeamento de cerca de 52 milhões de m<sup>3</sup>/ano de água subterrânea. Esse trabalho visa a quantificação da evolução da carga hidráulica e do fluxo de base das drenagens do flanco leste, no período entre 1999 e 2019, e a previsão do rebaixamento nos 20 anos subsequentes. Isso foi atingido por meio de modelagem hidrogeológica de fluxo utilizando o software Feflow, cujas etapas consistiram na montagem, calibração em regime permanente de fluxo, em regime transiente e simulação de rebaixamento do nível d'água. A montagem gerou modelo com divisão em 4 unidades hidrogeológicas (Aquífero Gandarela, Aquífero Cauê, Aquífero Batatal e Aquífero Moeda), 4 setores, e separado verticalmente em porção superior e inferior. A calibração em regime permanente resultou em 7,75% de RMSN. Após a calibração em regime transiente constatou-se redução de 13,6% no escoamento de base da área como um todo entre 1999 e 2019, além de um rebaixamento médio de 10,4 metros no Aquífero Cauê e 2,2 metros nas demais unidades, sendo 5,9 metros em média. A região mais afetada foi o centro-sul da área de estudo, que teve rebaixamento de cerca de 11,6 metros e 21,6% de redução do fluxo de base. Já a simulação do período de 2019 a 2039 resultou no rebaixamento de mais 7,4 metros em média, sendo a região centro-sul novamente a mais rebaixada, com 10,8 metros. Nesse período foi prevista redução de 7,6% do escoamento de base na área estudada, sendo 14,7% no Córrego Fechos, localizado na porção norte. O modelo gerado mostrou-se adequado para representar as condições hidrogeológicas regionais, podendo ser utilizado para definir as áreas mais afetadas e possibilitando melhor gestão das vazões de bombeamento outorgadas.

*Palavras-chave: água subterrânea, hidrogeologia, modelo hidrogeológico de fluxo, impacto hidrogeológico, Feflow*

## 1 INTRODUÇÃO

A modelagem hidrogeológica numérica é uma ferramenta que vem sendo utilizada mundialmente para auxiliar na caracterização e previsões do comportamento das águas subterrâneas. Essa técnica vem se desenvolvendo desde 1966, sendo aplicada para sistemas aquíferos de larga escala a partir de 1978 (Sun e Johnson 1994), nos EUA. Ao longo do tempo, com o aumento da velocidade de processamento computacional e a disponibilidade de sistemas de informação geográfica (SIGs), a modelagem numérica foi ganhando espaço na solução de problemas relacionados a sistemas aquíferos regionais (Zhou e Li 2011).

Desde então a modelagem hidrogeológica numérica vem sendo aplicada em todo o mundo para a solução de inúmeros problemas, dentre os quais encontram-se impactos hidrogeológicos regionais do bombeamento e o desaguamento de cavas de mineração (Engelen e Kloosterman (1996), Hou e Zhang (2008), Zhou e Li (2011), Surinaidu *et al.* (2014), Szczepiński (2019), Rupp *et al.* (2021), Mohan *et al.* (2022)). Assim, é notável que a modelagem hidrogeológica de fluxo se trata de uma metodologia consagrada na área, sendo que os estudos realizados em outras regiões auxiliam na aplicação de metodologias, interpretações e comparações de resultados, permitindo a construção de novos modelos mais complexos.

Um dos softwares mais utilizados para essa finalidade é o Feflow, o qual permite aplicar o método de elementos finitos para construir modelos que auxiliam na solução de problemas relacionados à água subterrânea, que podem envolver fluxo, transporte de massa e de calor. Esse método permite maior discretização de falhas e formas irregulares, anisotropia e heterogeneidades internas do que outras soluções, sendo um dos softwares mais utilizados no mundo para a modelagem de águas subterrâneas (Arenas *et al.* (2020), Ashraf e Ahmad (2008), Gonçalves *et al.* 2020 e Hoan *et al.* (2022)). No Brasil, recentemente foi desenvolvido modelo numérico de fluxo, utilizando elementos finitos, de todo o Sistema Aquífero Guarani (SAG) (Gonçalves *et al.* 2020).

Diante das características apresentadas, considera-se pertinente a utilização da modelagem hidrogeológica de fluxo para a solução de problemas relacionados ao aquífero na região do Quadrilátero Ferrífero (QF). Essa região se trata de uma província mineral localizada na porção central do estado de Minas Gerais, reconhecida internacionalmente não só pela mineração, mas também pelos seus valores ecológicos, arqueológicos, históricos e culturais. Na região encontram-se mais de 30 Unidades de Conservação municipais, estaduais e federais, entre as quais se destacam o Parque Nacional da Serra do Gandarela, Parque Estadual da Serra do Rola-Moça e Área de Proteção Ambiental Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte

(APA SUL RMBH), além de dois locais considerados Patrimônios Culturais da Humanidade pela UNESCO (UNESCO 2021).

A importância do QF também se dá pela presença do Aquífero Cauê, unidade hidrogeológica predominantemente livre, poroso em superfície e fraturado em profundidade. Na porção oeste do Quadrilátero está localizado o Sinclinal Moeda, estrutura que favorece o armazenamento de água no Aquífero Cauê por suas características estruturais, mantendo a vazão dos afluentes da margem esquerda do Rio das Velhas. Esse manancial, por sua vez, é responsável pelo abastecimento de mais de 60% da população de Belo Horizonte e 40% dos 6 milhões de habitantes da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) (CBH Rio das Velhas 2019).

Diversos fatores vêm ameaçando o Aquífero Cauê: chuvas irregulares, bombeamento para rebaixamento do nível nas minerações e a presença de barragens de rejeitos que podem causar acidentes. Somente no flanco leste do Sinclinal Moeda existem ao menos 13 empreendimentos de extração de minério de ferro que bombeiam, juntos, cerca de 52 milhões de metros cúbicos de água por ano (Magalhães *et al.* 2022). Além disso, no ano hidrológico de 2014-2015 a região sudeste do Brasil teve a seca mais intensa dos últimos 60 anos, gerando alto impacto no suprimento de água e geração hidroelétrica (Cunha *et al.* 2019). Ao mesmo tempo, de acordo com o IBGE (2020) a população da RMBH aumentou em 593 mil pessoas (11%) entre 2010 e 2020, aumentando a demanda de água para abastecimento.

Assim, para caracterizar os impactos do bombeamento, foram desenvolvidos trabalhos visando a modelagem do desaguamento dessas minas de ferro de forma local, por exemplo Rubio *et al.* (2009), na mina Capão Xavier, e Chiste-Costa (2017), na mina Alegria. Entretanto, não são conhecidos trabalhos no QF que avaliem o impacto do bombeamento de forma regional.

Diante desse cenário é evidente a necessidade de haver um controle integrado das outorgas concedidas pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) para evitar o desabastecimento da população no futuro. Esse trabalho, portanto, objetiva caracterizar o impacto regional do bombeamento da água subterrânea a partir do desenvolvimento de um modelo computacional hidrogeológico de fluxo em escala regional. Mais especificamente, pretende-se compreender a evolução do rebaixamento nos últimos 20 anos e apresentar um prognóstico do cenário futuro, identificando as áreas mais impactadas e mais vulneráveis. Assim haverá mais subsídio para garantir a segurança hídrica da população que depende da disponibilidade hídrica da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na região central do estado de Minas Gerais e abrange aproximadamente 130 km<sup>2</sup>, fazendo parte dos municípios de Belo Horizonte, Nova Lima, Itabirito, Rio Acima e Ouro Preto (Figura 1).

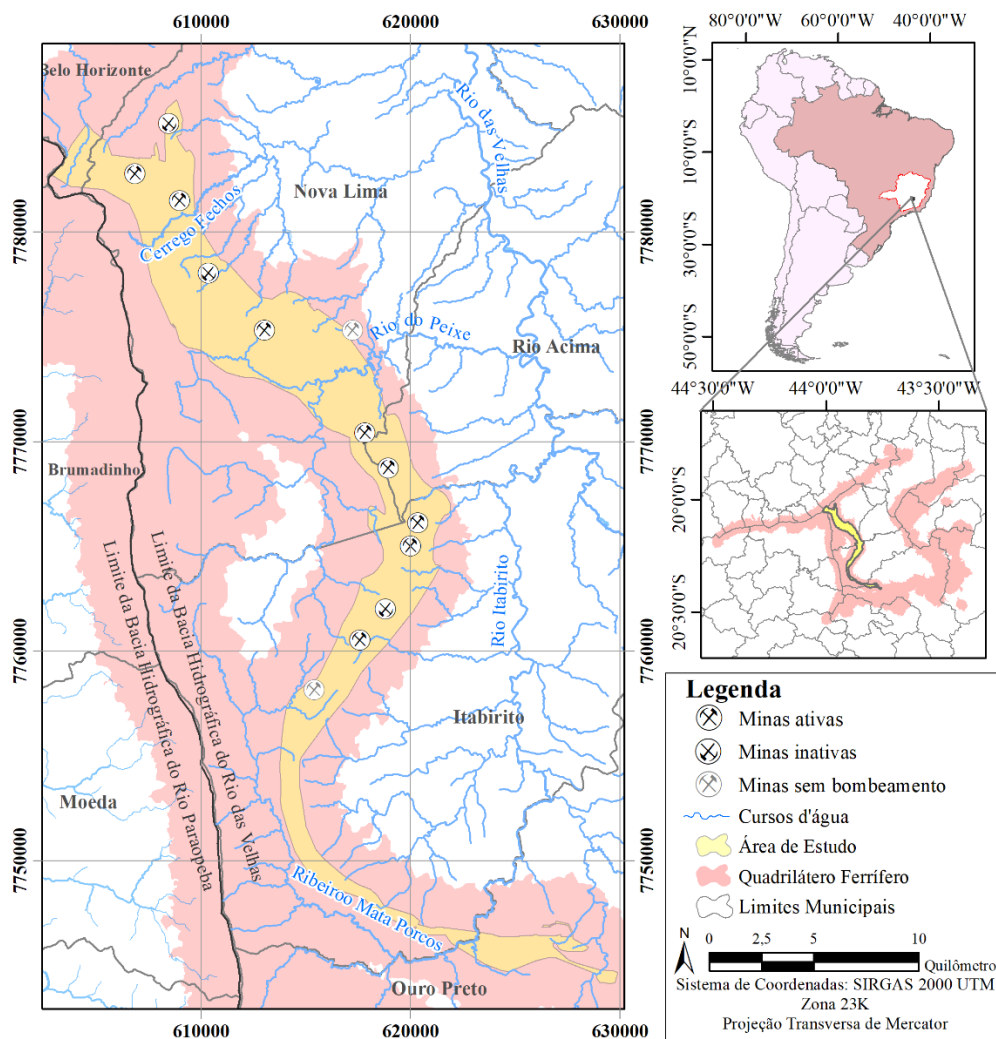


Figura 1. Localização da área de estudo

O flanco leste do Sinclinal Moeda faz parte da Bacia Hidrográfica Estadual do Rio das Velhas, maior afluente da Bacia Hidrográfica Federal do Rio São Francisco. A área em questão situa-se na região do Alto Rio das Velhas, que tem como principais cursos hídricos o Rio Itabirito, Rio do Peixe, Ribeirão dos Macacos, Ribeirão Água Suja e Ribeirão Arrudas, sendo os dois últimos fora da área de estudo. Apesar de ser uma área de baixa densidade populacional, o Sinclinal Moeda faz parte da região metropolitana de Belo Horizonte e contribui para a manutenção da vazão do Rio das Velhas.

Flutuações das vazões fluviais ocorrem sazonalmente, já que o clima da região é caracterizado pela presença de uma estação fria e seca, de abril a setembro, e uma estação

quente e úmida, de outubro a março, quando ocorre cerca de 88% do volume anual precipitado. Estas duas estações bem definidas indicam que o clima da região é subtropical úmido do tipo Cwb, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (1928) atualizada por Álvares *et al.* (2014). De acordo com o INMET (2020) na estação Rio do Peixe (2043004) a precipitação média anual acumulada no flanco leste do Sinclinal Moeda é de 1576 mm/ano.

Geologicamente a área em questão está inserida no Quadrilátero Ferrífero, uma zona caracterizada como Greenstone Belt, contendo domos, representados pelos complexos metamórficos, e quilhas, essencialmente constituídas pelo Supergrupo Rio das Velhas e Supergrupo Minas, que formam dobras (Alkmim & Marshak 1998). Uma dessas quilhas é o Sinclinal Moeda (Figura 2), uma dobra inversa com vergência para oeste em que o flanco leste se mostra sub verticalizado e invertido. Ambos os flancos são cortados por falhas e fraturas de direção Leste-Oeste, sendo uma delas a Falha das Codornas, a qual separa os compartimentos estruturais norte e sul no Sinclinal Moeda (Braga 2006). O compartimento sul encontra-se mais deformado, resultando em menor espessura aparente das camadas da base do Supergrupo Minas.

O Sinclinal Moeda tem como embasamento as rochas granito-gnáissicas do Complexo Metamórfico, sobrepostas estratigraficamente pelo Supergrupo Rio das Velhas e Supergrupo Minas. As unidades de interesse desse trabalho encontram-se no Supergrupo Minas, mais especificamente nos grupos Itabira (formações Cauê e Gandarela) e Caraça (formações Moeda e Batatal), já que as demais unidades consistem em granitos, xistos, filitos e quartzitos impuros que foram consideradas unidades não aquíferas por Magalhães *et al.* (2022).

Na base do Supergrupo Minas está a Formação Moeda, composta por quartzito, filito e conglomerado (Beato *et al.* 2006). Sobreposta, encontra-se a Formação Batatal, que apresenta filito sericítico, carbonoso e ferruginoso (Beato *et al.* 2006; Maxwell 1972). A Formação Cauê abrange itabirito com lentes dolomíticas, hematita compacta e friável, filito e mármore (Rosière e Chemale Jr 2013). Por fim, a Formação Gandarela é composta de dolomito, mármore, filito e itabirito dolomítico (Silva *et al.* 2005). Sobrepostas a essas litologias encontram-se coberturas lateríticas (canga) e outras coberturas recentes (aluvião, coluvião e tálus).

Essas unidades geológicas são condizentes com as unidades hidrogeológicas da região, conforme definido por Mourão (2007) e Magalhães *et al.* (2022). Trata-se do Aquífero Moeda, Aquífero Batatal, Aquífero Cauê e Aquífero Gandarela.

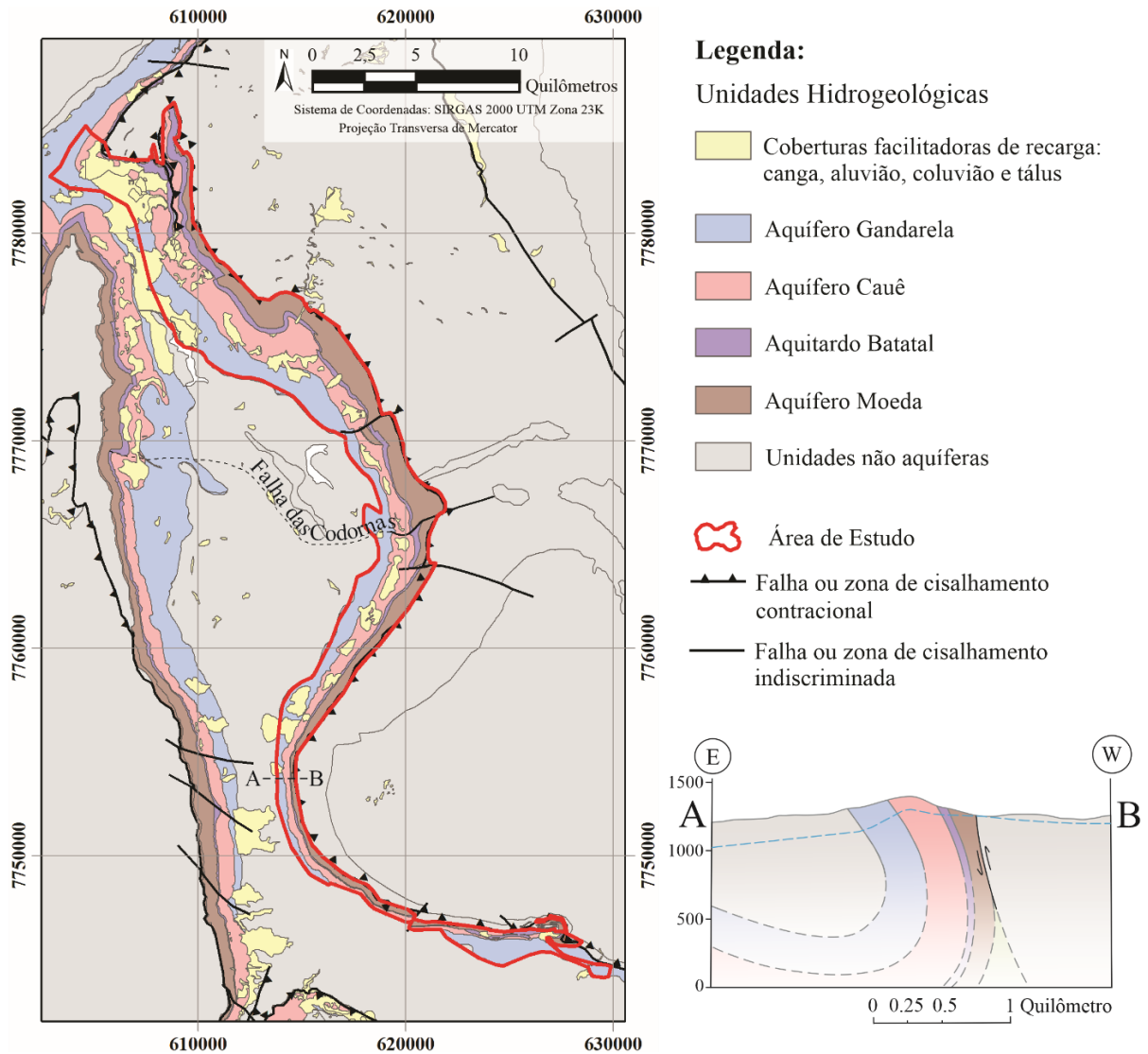


Figura 2. Mapa e perfil das unidades hidrogeológicas da área de estudo. Modificado de Magalhães *et al.* (2022)

Dentre essas unidades destaca-se o Aquífero Cauê, em formação ferrífera, unidade mais produtiva da área. Este apresenta porosidade fissural e granular, com predominância de uma ou outra localmente. A variedade litológica, complexidade estrutural e intemperismo de intensidades diversas no aquífero contribuem para a variação do armazenamento e condutividade hidráulica, sendo mais produtivos os corpos de minério friável. O Aquitardo Batatal, de baixa permeabilidade, limita a base das unidades sobrepostas no Sinclinal Moeda, favorecendo o acúmulo da água subterrânea nas litologias internas do Sinclinal, principalmente nos aquíferos Cauê e Gandarela (Mourão 2007). Apesar de sua baixa permeabilidade, a espessura reduzida e fraturamento localizado do Aquitardo Batatal o tornam uma unidade hidrogeológica relevante nesse estudo, permitindo a conexão entre o Aquífero Cauê e o Aquífero Moeda.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Modelo Hidrogeológico

##### 3.1.1 Base de Dados

Na etapa inicial foi preparado um banco de dados, a partir de relatórios públicos disponibilizados pelo IGAM, contendo a localização dos pontos de monitoramento e séries de dados de vazão fluvial, vazão de bombeamento outorgada e carga hidráulica, no período entre outubro de 1999 e setembro de 2019. Esses dados foram utilizados nas etapas de calibração.

Para a representação da topografia, tomou-se como base os dados do modelo digital de elevação SRTM com 30 metros de resolução espacial, por serem os mais recentes disponíveis (2015). Já a base geológica utilizada para a elaboração do modelo foi o mapa em escala 1:50.000 de Lobato *et al.* (2005).

A série de dados de pluviometria utilizada foi proveniente do portal Hidroweb, da estação Rio do Peixe (2043004), que segundo Magalhães *et al.* (2022) é a mais representativa da área de estudo. A taxa de recarga e parâmetros hidrodinâmicos utilizados como referência foram obtidos de Magalhães *et al.* (2022) os quais são coerentes com os valores encontrados por Mourão (2007), Mesquita *et al.* (2017) e Bertachini (2020).

##### 3.1.2 Modelo Hidrogeológico Conceitual

A Figura 3 representa o modelo conceitual da área de estudo, que abrange uma área de 130 km<sup>2</sup>. As unidades hidrogeológicas consideradas foram aquelas definidas por Magalhães *et al.* (2022): Aquífero Cauê, Aquífero Gandarela, Aquífero Moeda e Aquitardo Batatal, descritas na Figura 3 b.

Assim, para montagem do modelo hidrogeológico contendo essas unidades, inicialmente, foi construído o modelo geológico da área de estudo no *software* Leapfrog Geo, versão 5.1. A partir do mapa geológico em escala 1:50.000 de Lobato *et al.* (2005) e de bibliografias anteriores (Chemale *et al.* 1994; Alkmim e Marshak 1998) foram geradas seções geológicas, que orientaram a construção do modelo.

Para definir os limites do modelo em questão, foi necessário estabelecer condições de contorno (Figura 3 a). Em modelagem hidrogeológica, condições de contorno são utilizadas para definir, com base no sistema hidrogeológico real, as fronteiras hidráulicas ou físicas que delimitam o domínio do modelo, além de suas entradas e saídas. De acordo com Anderson &

Wossener (1992) essas condições são classificadas em Tipo 1 (carga hidráulica especificada ou condição de Dirichlet), Tipo 2 (fluxo especificado ou condição de Neumann) e Tipo 3 (fluxo dependente da carga hidráulica ou condições mistas de Robin ou Cauchy).

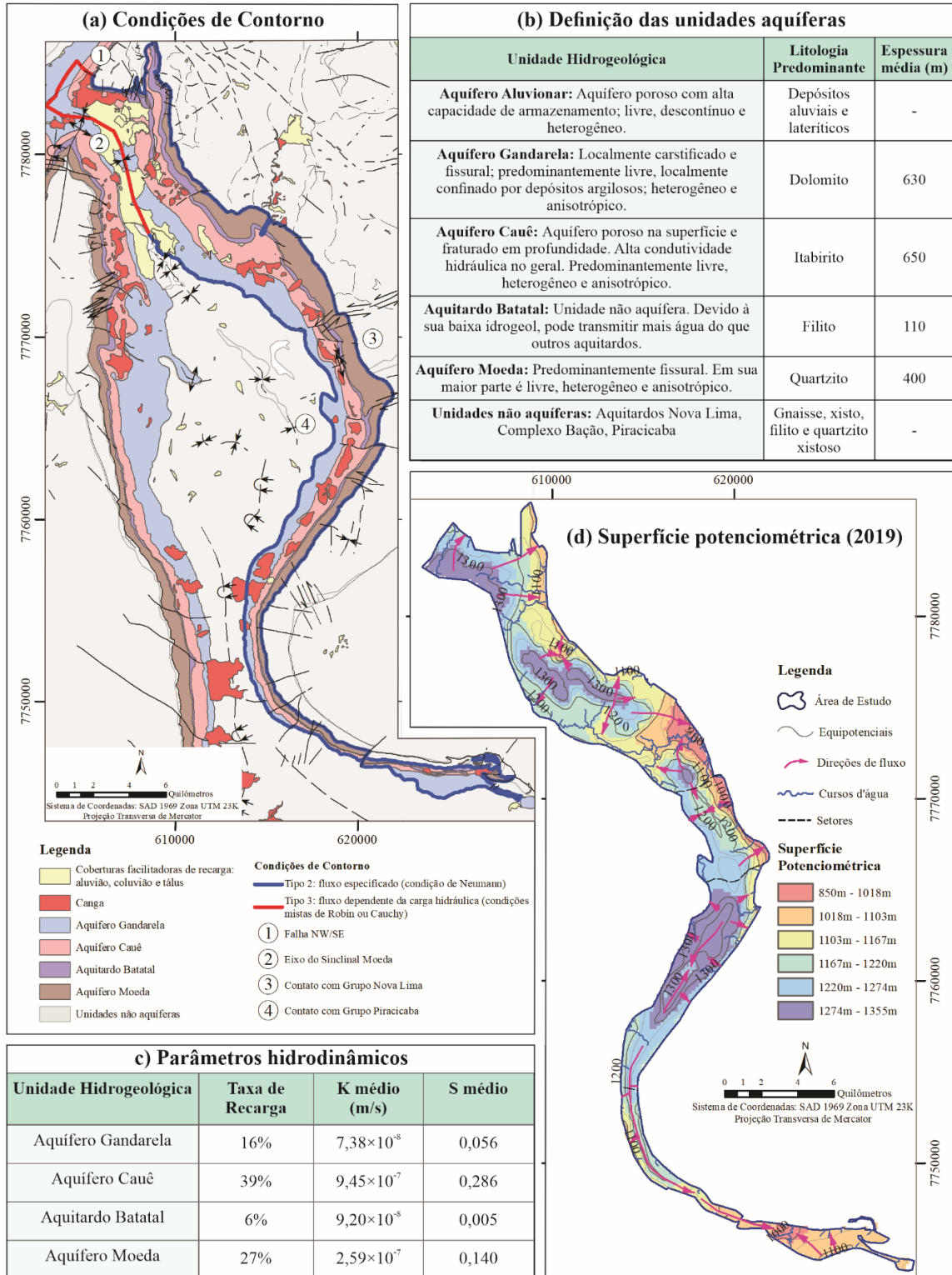


Figura 3. Resumo do modelo conceitual baseado em Magalhães et al. 2022  
 Por serem consideradas unidades não aquíferas por Magalhães *et al.* (2022), o Grupo Piracicaba, Grupo Nova Lima e Complexo Bação constituem Condições de Contorno do Tipo

2 (fluxo especificado), sendo o fluxo igual a zero. Ainda, na porção nordeste da área de estudo, ocorre continuidade do Aquífero Gandarela no eixo do Sinclinal Moeda e na interseção entre o sinclinal e o Homoclinal Serra do Curral. Assim, essas interfaces podem ser consideradas condições de contorno do tipo 3 (fluxo dependente da carga hidráulica). Os cursos hídricos, por serem abastecidos em parte pelo aquífero, consistem em condições de contorno do Tipo 1. Outras entradas e saídas consistem na recarga do aquífero e nos poços de bombeamento.

Considerou-se que a taxa de recarga varia de acordo com a unidade hidrogeológica, já que cada uma apresenta características específicas que facilitam ou dificultam a infiltração. Além disso, pode-se considerar a canga, coberturas superficiais e áreas de cavas como facilitadores da recarga.

Quanto às captações subterrâneas, é importante ressaltar a dificuldade de estimar a vazão exata bombeada ao longo do tempo na área de estudo. Poucos relatórios apresentam esses dados de forma clara e não há monitoramento da vazão de poços fora de mineradoras. Sendo assim, a estimativa mais aproximada disponível é a soma das vazões outorgadas na região, realizada por Magalhães *et al.* (2022). Esses cálculos, feitos a partir de dados do IGAM, apontam para o valor médio de 41 milhões de m<sup>3</sup>/ano no período entre 1999 e 2019, sendo aproximadamente 14 milhões de m<sup>3</sup>/ano em 1999 e 52 milhões de m<sup>3</sup>/ano em 2019.

Ainda, destaca-se que das 13 minas localizadas na área de estudo, apresentadas na Figura 1, três encontram-se paralisadas no ano de 2019, entretanto continuam o bombeamento para manutenção da carga hidráulica já que podem voltar a operar futuramente. Duas dessas minas não possuem outorga para bombeamento de água subterrânea, portanto não realizam rebaixamento.

Quanto às propriedades hidrodinâmicas, Magalhães *et al.* (2022) define condutividades hidráulicas e armazenamento de referência para cada uma das unidades hidrogeológicas do flanco leste do Sinclinal Moeda (Figura 3 c). Entretanto, as propriedades de cada uma dessas unidades podem variar tanto verticalmente, sendo a porosidade mais baixa em profundidade, quanto horizontalmente, de acordo com variações faciológicas, estruturais e intempéricas. Assim, considera-se a divisão em quatro setores definidos por Magalhães *et al.* (2022): Norte, Central 1, Central 2 e Sul, além da separação vertical, em porção superior e inferior, na metade da profundidade do modelo (Figura 5).

Quanto às direções de fluxo na área, de acordo com Magalhães *et al.* (2022), o gradiente hidráulico indica que o fluxo predominante na área estudada é de norte a sul. Na direção leste-oeste, entretanto, o Aquífero Cauê atua como divisor de águas. Assim, o fluxo da faixa central da área é direcionado em parte para leste, em direção ao Aquífero Moeda, e em parte para oeste,

em direção ao Aquífero Gandarela. O mapa potenciométrico do ano de 2019 encontra-se na Figura 3 d.

### 3.1.3 Modelo Numérico

Para a definição do arcabouço do modelo numérico, optou-se por utilizar malha triangular estruturada em camadas. Para isso, o grid bidimensional foi gerado no *software* Feflow, versão 7.5. Foi realizado refinamento na área das cavas, nas proximidades dos cursos d'água e das falhas. Parte da malha gerada encontra-se ilustrada na Figura 4.

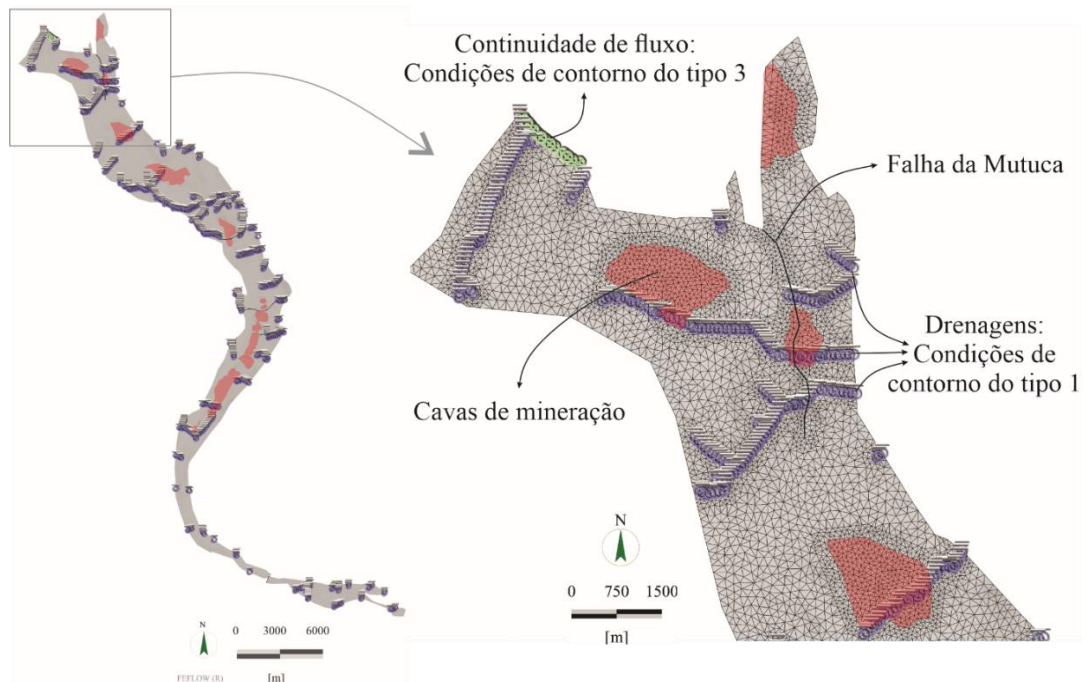


Figura 4. Detalhe da porção norte da malha bidimensional com indicação das feições de refinamento e condições de contorno aplicadas. Fonte: Feflow®

Para a geração do arcabouço tridimensional, a malha bidimensional foi importada para o *software* Leapfrog, utilizando o módulo Hydro. A base do modelo foi definida na cota de 700 metros, considerando aproximadamente 200 metros abaixo do nível do instrumento de monitoramento da água subterrânea mais profundo (905 m). Para a camada superficial do modelo (*slice 1*) foi atribuída a topografia. No eixo Z o modelo foi subdividido em 20 camadas (*layers*), sendo as mais superficiais mais finas (máximo de 20 metros), com aumento progressivo da espessura com a profundidade, sendo a mais profunda com no máximo 120 metros. Após várias tentativas de gerar um arcabouço com número de nós adequado para o processamento, a malha final consistiu em 17.270 nós em cada camada, totalizando 362.670 nós.

Para a atribuição das unidades hidrogeológicas aos elementos do modelo, ainda no software Leapfrog, foram aplicadas as condutividades hidráulicas obtidas por Magalhães *et al.* (2022) a cada uma das unidades, com base no modelo geológico construído. A malha foi exportada novamente para o *software* Feflow, onde foi feita a separação dos elementos entre os setores definidos no modelo conceitual, e entre as porções superior e inferior, na metade da profundidade do modelo (Figura 5).

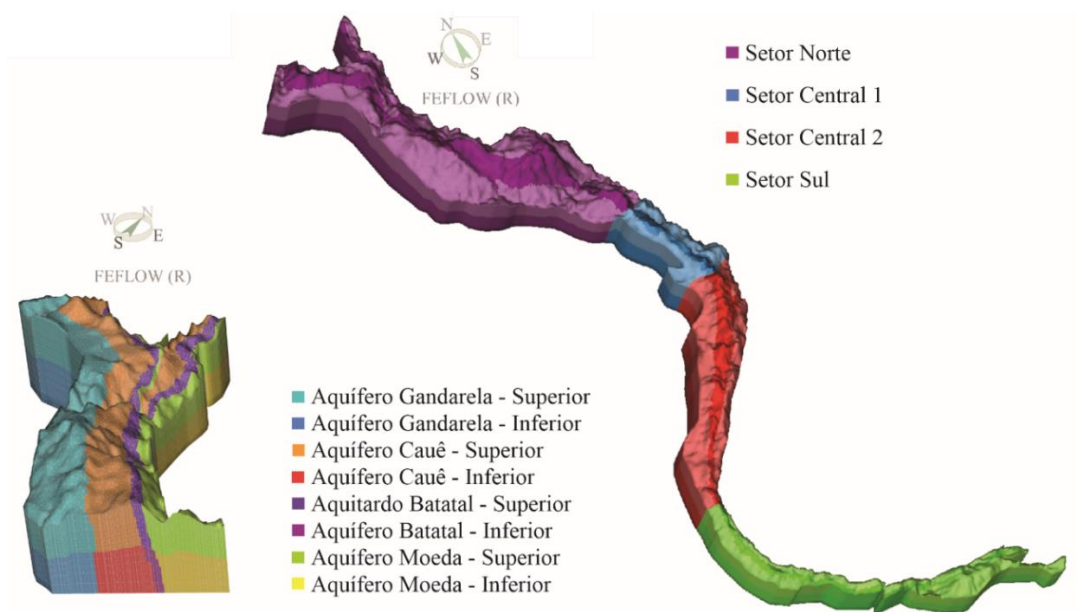


Figura 5. Separação das litologias em superior e inferior, à esquerda, e setorização, à direita. A posição do norte foi rotacionada para melhor visualização. Exagero vertical: 5×. Fonte: Feflow®

Para representar as 5 falhas apresentadas na Figura 2 dentro da área de estudo foram aplicadas condutividades hidráulicas diferenciadas nos elementos correspondentes, possibilitando que elas atuassem como facilitadoras do fluxo (condutividade hidráulica maior que o meio) ou barreiras hidráulicas (condutividade hidráulica menor que o meio), de acordo com o tipo da estrutura. No caso em questão, por serem estruturas compressivas e transpressivas, priorizou-se a aplicação de condutividades mais baixas que o meio.

No modelo permanente as recargas foram aplicadas conforme a pluviometria do ano hidrológico de 1999-2000, considerando a taxa de recarga de cada litologia, enquanto no modelo transiente a taxa foi aplicada à série de dados pluviométricos de 1999 a 2019. A canga, coberturas superficiais e áreas de cavas foram considerados como zonas diferenciadas de recarga na primeira camada do modelo.

Inicialmente, as condições de contorno inseridas foram os cursos hídricos, como condições do Tipo 1 na primeira camada e restrição máxima de fluxo igual a zero, e a continuidade no norte da área, aplicada em todas as camadas como condição do Tipo 3. Nessa interface foi definida a carga hidráulica de 1250 m, a qual corresponde a uma média do nível

d'água dos dois piezômetros mais próximos. Posteriormente, foram realizados ajustes para calibração, inserindo novas condições do Tipo 3 em locais onde poderia haver continuidade de fluxo. Nos demais limites da área não foram inseridas condições de contorno, sendo considerado o fluxo igual a zero. Os poços de bombeamento foram aplicados apenas na etapa de calibração do modelo em regime transiente.

Ao todo foram alocados 133 pontos de observação no modelo. Devido à ausência de medições de vazão para as nascentes inventariadas e ausência de conexão dessas nascentes com a rede de drenagem nas bases cartográficas utilizadas, optou-se por defini-las como pontos de observação para calibração apenas em regime permanente. Assim, 53 pontos foram alocados na primeira camada, representando as nascentes inventariadas. Os outros 80 pontos representaram os instrumentos existentes (piezômetros e indicadores de nível d'água), cujas séries de dados de monitoramento constam nos relatórios de cada empreendimento fornecidos pelo IGAM. Como não consta na base de dados a profundidade dos instrumentos, eles foram alocados inicialmente a 200 m abaixo da superfície.

A distribuição desses pontos de observação pela área é bastante heterogênea. 78% dos pontos de observação encontram-se no setor norte, 5% no setor Central 1, 17% no setor Central 2 e nenhum ponto de observação no Setor Sul. Isso ocorre pois não há nenhum empreendimento mineral no sul da área, o que resulta na ausência de pontos de monitoramento. Assim, para realizar uma calibração razoável desse setor, foram alocados 21 pontos de controle, que representam piezômetros virtuais com cargas hidráulicas estimadas, aplicados na primeira camada, distribuídos entre as 4 litologias.

## **3.2 Calibração**

### **3.2.1 Calibração em Regime Permanente**

A partir da análise das vazões de bombeamento outorgadas pelo IGAM na região foi observado que no início dos anos 2000 essa vazão era pouco expressiva quando comparada à atual. Assim, para a construção e calibração do modelo em regime permanente foram consideradas as condições do dia 01 de outubro de 1999, início do período chuvoso, sem poços de bombeamento.

Para a etapa de calibração foi feito o procedimento de retroanálise manual, conforme sugerido por Anderson *et al.* (2015). Esse método consistiu em modificar os parâmetros Condutividade Hidráulica, em três direções ( $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$ ), e a recarga, tendo como base os

parâmetros descritos anteriormente na caracterização da área de estudo. Alterando esses parâmetros buscou-se comparar a carga hidráulica calculada pelo modelo aos valores observados, até se obter o menor erro médio quadrático normalizado possível (NRMS ou SRMS), conforme as orientações para modelagem hidrogeológica de Middlemis *et al.* (2000). Posteriormente, foram calculados o coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE) e coeficiente de determinação ( $R^2$  ou CD) para verificar a qualidade do ajuste dos dados. Também foram comparados os dados calculados e observados de vazão fluviométrica para se obter melhor ajuste.

### 3.2.2 Calibração em Regime Transiente

O período de calibração do modelo em regime transiente foi de 1º de outubro de 1999 a 30 de setembro de 2019, totalizando 20 anos.

Foram levadas em conta as vazões de bombeamento outorgadas para cada empreendimento minerário, obtidas a partir da base de dados do IGAM. Outros empreendimentos dispersos pela área também usam água subterrânea em menores quantidades, porém foram desconsiderados por representarem menos de 3% da vazão bombeada. Como essa base de dados consiste em relatórios fornecidos pelos empreendedores, muitas vezes estes não contemplam a localização exata e profundidade do filtro de cada poço, tampouco o número de poços em operação. Assim, inicialmente, considerou-se a vazão máxima de cada poço como 100 m<sup>3</sup>/h e distribuiu-se os poços uniformemente pela área de cada mina de forma a totalizar a vazão outorgada. Posteriormente, foram realizados ajustes na localização e profundidade dos poços dentro de uma mesma mina, de modo a calibrar o rebaixamento dos pontos de observação sem alterar a vazão outorgada de cada região.

Para a calibração em regime transiente, inicialmente também foi utilizado o método de retroanálise manual. Foram alterados os parâmetros Coeficiente de Armazenamento ( $S_s$ ) e Produção Específica ( $S_y$ ), comparando as vazões e cargas hidráulicas calculadas com os dados observados. Posteriormente, para melhor ajuste, foi utilizada a ferramenta PEST (Parameter Estimation Software Tool), integrada ao modelo via interface gráfica do FEFLOW, a qual realiza a calibração automática, utilizando a retroanálise para melhor estimar cada parâmetro dentro de intervalos estipulados.

Após a calibração seguiu-se para a análise do rebaixamento e da redução no escoamento de base no período de 1999 a 2019. O rebaixamento médio das cargas hidráulicas em cada setor foi calculado de duas formas: na primeira foram considerados apenas os pontos de observação,

que foram utilizados para a calibração; para a segunda análise foram exportadas do *software* Feflow as superfícies de pressão zero, que representam o topo da zona saturada, no tempo inicial e final do período considerado, as quais foram tratadas no *software* ArcGIS, versão 10.8. Nas duas situações foi subtraída a carga hidráulica final da inicial para obter o rebaixamento em cada ponto, e posteriormente, foi feita a média do rebaixamento em cada setor. Ressalta-se que o cálculo utilizando as superfícies de pressão zero tende a reduzir o viés em relação aos pontos de observação, já que esses pontos estão concentrados nas áreas das cavas.

Já a análise do escoamento de base no período de 1999 a 2019 foi feita calculando a porcentagem de redução nos 20 anos do modelo transiente separadamente em cada um dos setores, na área como um todo e nas bacias com monitoramento fluviométrico para comparação.

### **3.3 Simulação**

A simulação do cenário futuro foi realizada no período de outubro de 2019 a setembro de 2039. Esse período foi determinado considerando o horizonte de planejamento do Plano Estadual de Saneamento Básico de Minas Gerais, que é de 20 anos (Minas Gerais 2020).

Devido à ausência de previsões disponíveis de aumento ou redução do bombeamento nos próximos anos, foi estabelecido o cenário de manutenção das taxas de bombeamento do último dia do modelo transiente, que é de aproximadamente 52 milhões de m<sup>3</sup>/ano. A pluviometria considerada nesse período para aplicação das taxas de recarga foi a média dos 20 anos anteriores na estação Rio do Peixe (1576 mm/ano). Os demais parâmetros foram mantidos.

Após a simulação, da mesma forma como foi feito no modelo transiente, foi possível comparar a potenciométrica no início e no final do período, assim como as vazões superficiais.

Por fim, foi possível analisar as trocas de água entre as unidades aquíferas por meio da ferramenta “*Subdomain Boundary Rate Budget*”, do Feflow. Isso foi feito para o início e fim do período da calibração em regime transiente, e para o fim da simulação, sendo possível obter a variação das trocas ao longo do tempo e detectar possíveis reversões de fluxo ocorridas ou previstas.

## **4 RESULTADOS**

### **4.1 Calibração em Regime Permanente**

A calibração em regime permanente resultou em um modelo com 7,75% de erro médio normalizado (NRMS) considerando os pontos de observação da carga hidráulica. O gráfico de



dispersão do erro encontra-se na Figura 6. O cálculo do coeficiente NSE resultou no valor de 0,93, e o  $R^2$  obtido foi 0,89, o que indica boa aderência do modelo aos dados reais. Além disso, o balanço de massa resultante da calibração apresentou discrepância de 0,07%, indicando desempenho numérico adequado.

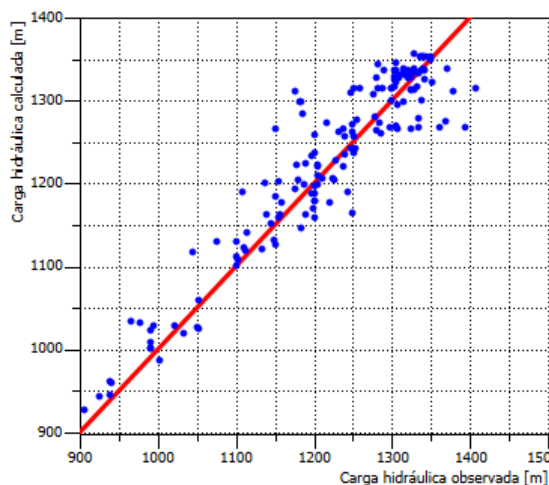


Figura 6. Dispersão dos erros dos pontos de observação. Fonte: Feflow ®

A Tabela 1 mostra as recargas obtidas, as quais, no geral, foram coerentes com dados encontrados na bibliografia regional do QF.

Tabela 1. Taxas de recarga obtidas na calibração. Os valores entre parêntesis consistem na taxa de recarga dos setores indicados, que diferem da taxa do restante da área, sem parêntesis.

Unidade hidrogeológica:	Taxa de recarga (calibração)	Taxa de recarga (bibliografia)
<b>Coberturas facilitadoras de recarga: canga, coluvião e aluvião</b>	30%	>30% *1
<b>Aquífero Gandarela</b>	18% (Norte: 20%; Central 2: 16%)	16% *2
<b>Aquífero Cauê</b>	30% (Central 2: 28%)	39% *1 e 2
<b>Aquitardo Batatal</b>	4%	6% *2
<b>Aquífero Moeda</b>	20%	<28% *1
<b>Cavas</b>	60% (Central 2 – 50%)	>40% e <84% *3

\*1 Mourão 2007; \*2 Magalhães *et al.* 2022 \*3 Bertachini *et al.* 2012

A condutividade hidráulica (Tabela 2 e Figura 7) também foi considerada coerente com valores obtidos nos trabalhos anteriores, sendo a condutividade do Aquífero Cauê a maior delas e a do Aquitardo Batatal a menor. A porção inferior do modelo foi considerada mais impermeável que a superior, o que é coerente já que em profundidade, devido à maior pressão litostática, a porosidade e abertura das fraturas tende a diminuir. As falhas, por serem estruturas compressivas e transpressivas, foram consideradas zonas de baixa condutividade, com uma média de  $1,5 \times 10^{-7}$  m/s. É importante ressaltar que essas estruturas não delimitam compartimentos, já que a condutividade aplicada não é baixa o suficiente para impedir o fluxo, apenas reduzir a velocidade.

Tabela 2. Condutividade hidráulica e armazenamento médios, obtidos por calibração do modelo

	Condutividade Hidráulica (K)					Armazenamento	
	Norte	Central 1	Central 2	Sul	Bibliografia	S <sub>s</sub> (m <sup>-1</sup> )	S <sub>y</sub>
<i>Aquífero Gandarela</i>	$6,38 \times 10^{-07}$	$1,05 \times 10^{-06}$	$4,63 \times 10^{-06}$	$1,08 \times 10^{-06}$	$7,38 \times 10^{-08}$ *	$7,93 \times 10^{-4}$	$1,42 \times 10^{-1}$
<i>Aquífero Cauê</i>	$2,13 \times 10^{-06}$	$4,52 \times 10^{-06}$	$9,00 \times 10^{-06}$	$4,43 \times 10^{-06}$	$9,45 \times 10^{-07}$ *	$1,67 \times 10^{-3}$	$2,35 \times 10^{-1}$
<i>Aquífero Batatal</i>	$4,18 \times 10^{-08}$	$2,98 \times 10^{-08}$	$3,07 \times 10^{-08}$	$2,90 \times 10^{-08}$	$9,2 \times 10^{-08}$ **	$3,73 \times 10^{-5}$	$2,71 \times 10^{-4}$
<i>Aquífero Moeda</i>	$1,08 \times 10^{-06}$	$1,12 \times 10^{-06}$	$2,67 \times 10^{-06}$	$1,08 \times 10^{-06}$	$2,59 \times 10^{-07}$ *	$1,41 \times 10^{-3}$	$1,58 \times 10^{-1}$

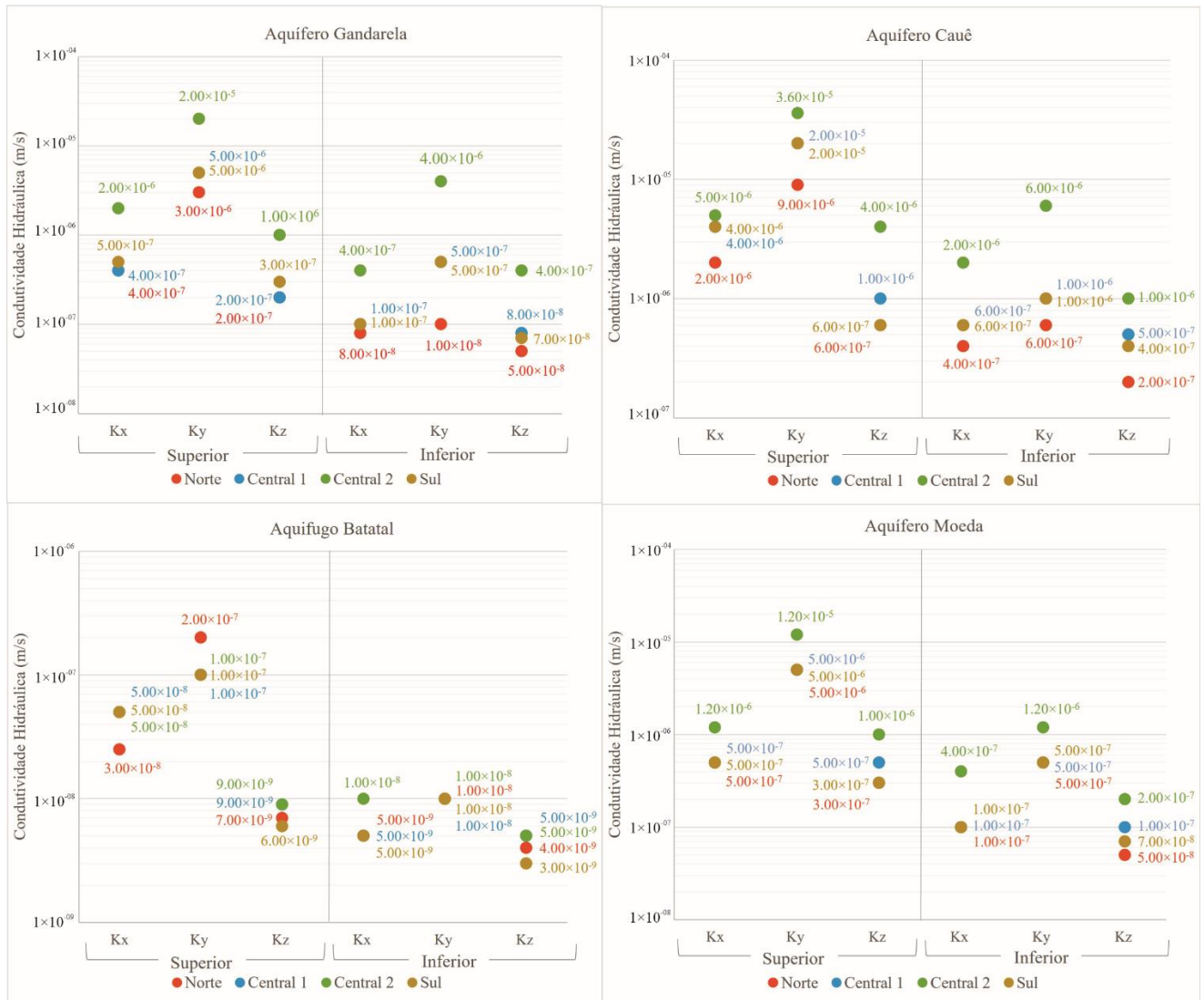
\*Magalhães *et al.* (2022) \*\*Mourão (2007)

Figura 7. Resultados das condutividades hidráulicas do Aquífero Cauê obtidas na calibração do modelo em permanente

A Tabela 2 aponta que, no geral, o setor Central 2 foi o de condutividade hidráulica mais alta para todas as unidades. Já na Figura 7 é notável que condutividade na direção Norte-Sul ( $K_y$ ) apresentou maior valor em todas as unidades, e o  $K_z$  obteve a menor condutividade, indicando anisotropia na área de forma que  $K_y > K_x > K_z$ . Esse resultado é condizente com a estruturação da região, já que as camadas geológicas são predominantemente subverticais e orientadas na direção Norte-Sul.

No setor norte o fluxo principal foi para o Córrego Fechos e Rio do Peixe, cuja localização pode ser vista na Figura 1. O setor Central 1 apresentou fluxo predominante para norte, em direção ao Rio do Peixe, enquanto os setores Central 2 e Sul apresentaram fluxo para sul, em direção ao Rio Itabirito.

Ao longo da calibração foi necessário inserir novas condições de contorno do tipo 3, representadas na Figura 8. No setor Norte, onde há continuidade do Aquífero Gandarela no eixo do Sinclinal (Figura 2), esse ajuste foi necessário para possibilitar a entrada de água e assim aumentar a vazão do fluxo de base das drenagens e as cargas hidráulicas localmente. Além disso, no setor Central 2 foi necessário inserir essa condição em parte do limite leste da área para permitir a saída de água e assim reduzir o nível, o que indica a possibilidade de haver saídas de água no contato entre as formações Moeda e Nova Lima. A condição inicialmente inserida no extremo norte da área funcionou como uma saída de água, indicando que nessa interface o Sinclinal Moeda fornece água para o Homoclinal Serra do Curral.

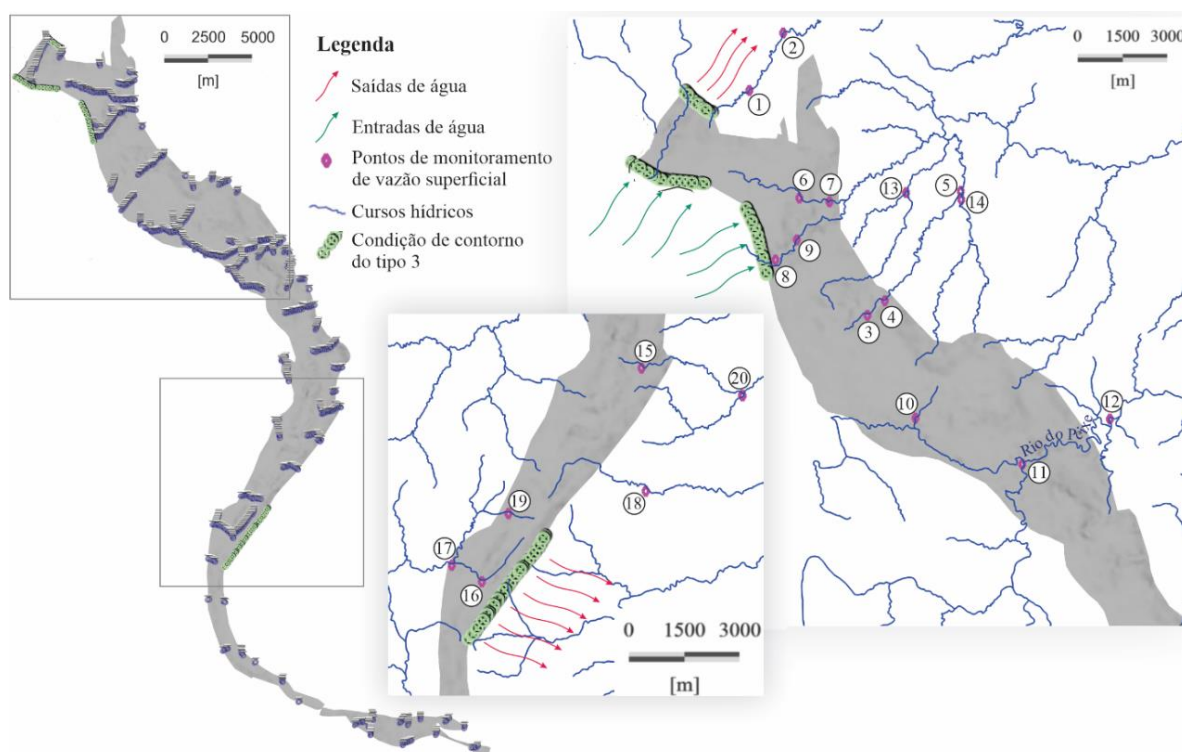


Figura 8. Localização das condições de contorno do tipo 3 e dos pontos de monitoramento fluviométrico. Fonte: Feflow®

Em algumas drenagens foram alteradas as condutividades hidráulicas dos elementos, representando as diferentes condutividades que pode haver nos leitos dos cursos hídricos. Essa propriedade interfere no fluxo de base das drenagens. A Tabela 3 mostra as vazões calculadas pelo modelo em cada ponto de monitoramento em comparação com os valores reais monitorados em outubro de 1999, compilados a partir dos relatórios disponibilizados pelo

IGAM. A localização dos cursos hídricos citados e pontos monitorados pode ser observada na Figura 8.

Nessa tabela encontram-se apenas cursos hídricos localizados nos setores Norte e Central 2. Nos demais setores não foram encontrados, nos relatórios analisados, instrumentos de monitoramento fluviométrico para calibração.

Tabela 3. Vazões calculadas para calibração do modelo. O símbolo "<" indica que os instrumentos estão localizados fora da área do modelo, a jusante, portanto as vazões medidas têm contribuições externas

	<i>Ponto de Monitoramento</i>	<i>Vazão Calculada (m³/h)</i>	<i>Vazão Observada (m³/h)</i>
<b>Setor Norte</b>	1 <i>Córrego da Mutuca (montante)</i>	0,2	< 131,4
	2 <i>Córrego da Mutuca (jusante)</i>	15,2	< 463,3
	3 <i>Córrego Grotta Fria (montante)</i>	11,9	19,0
	4 <i>Córrego Grotta Fria (intermediário)</i>	28,2	16,9
	5 <i>Córrego Grotta Fria (jusante)</i>	33,3	< 41,7
	6 <i>Córrego Sem Nome (norte) (montante)</i>	6,3	0,0
	7 <i>Córrego Sem Nome (norte) (jusante)</i>	10,0	6,0
	8 <i>Córrego Fechos (Surgência Cárstica)</i>	78,5	316,0
	9 <i>Córrego Fechos</i>	347,5	782,3
	10 <i>Córrego do Angú (Bacia do Rio do Peixe)</i>	11,3	13,0
	11 <i>Ribeirão dos Marininhos (Bacia do Rio do Peixe)</i>	31,9	< 35,9
	12 <i>Rio do Peixe</i>	1896,5	<2000
	13 <i>Córrego Tamanduá</i>	0,7	< 5,0
	14 <i>Córrego Marumbé</i>	5,2	< 20,0
<b>Setor Central 2</b>	15 <i>Córrego Cata Branca</i>	42,2	< 66,24
	16 <i>Córrego da Cascalheira (Baciado Ribeirão Arêdes)</i>	6,1	6,8
	17 <i>Ribeirão Arêdes</i>	54,2	< 87,5
	18 <i>Córrego Sem Nome (Central 2)</i>	82,7	< 106,2
	19 <i>Córrego do Bugre</i>	8,0	7,9
	20 <i>Córrego da Onça</i>	223,5	< 230,4

Os instrumentos relacionados ao Córrego Fechos apresentaram a maior diferença de vazão entre os valores observados e calculados, apesar das tentativas de elevar a condutividade hidráulica no leito desse curso hídrico e de aumentar a vazão de entrada na condição de contorno próxima. Interpreta-se que isso ocorreu devido à contribuição externa relacionada às feições cársticas dessa região, já que a surgência encontra-se no Aquífero Gandarela. Os demais instrumentos apresentaram vazão calculada coerente com a observada. As diferenças existentes podem ser atribuídas à presença de captações e reposições, que não foram levadas em conta.

#### 4.2 Calibração em Regime Transiente

Para verificar a aderência do modelo calibrado em regime transiente com os dados de carga hidráulica observados, foram calculados os erros máximo, médio e mínimo para cada

semestre entre outubro de 1999 e setembro de 2019, e os resultados foram plotados na forma de *box plot* na Figura 9, mostrando a aderência do modelo aos dados reais.

Em todo o período o Aquífero Cauê teve erro médio de 17,7 metros, mínimo de menos de 1 centímetro e máximo de 70,9 metros. O desvio padrão calculado foi de 13,2 metros. Para um modelo regional esses valores foram considerados suficientes, já que há uma amplitude de cerca de 600 metros na carga hidráulica da área como um todo. Dessa forma, o erro máximo representa 11,8% dessa amplitude, e o erro médio representa menos de 3%. Ademais, a discrepância do balanço hídrico resultante da calibração foi de 1,12%, indicando bom desempenho numérico da solução.

Nas demais unidades hidrogeológicas o erro médio foi de 25,7 metros, o mínimo foi de 0,14 metros e o máximo foi de 73,9 metros, com desvio padrão de 18,8 metros. Tanto o erro quanto o desvio padrão foram maiores do que no Aquífero Cauê devido ao maior número de pontos de observação naquela unidade e da maior variação de carga hidráulica durante o tempo, dando maior peso à calibração dos instrumentos do Aquífero Cauê.

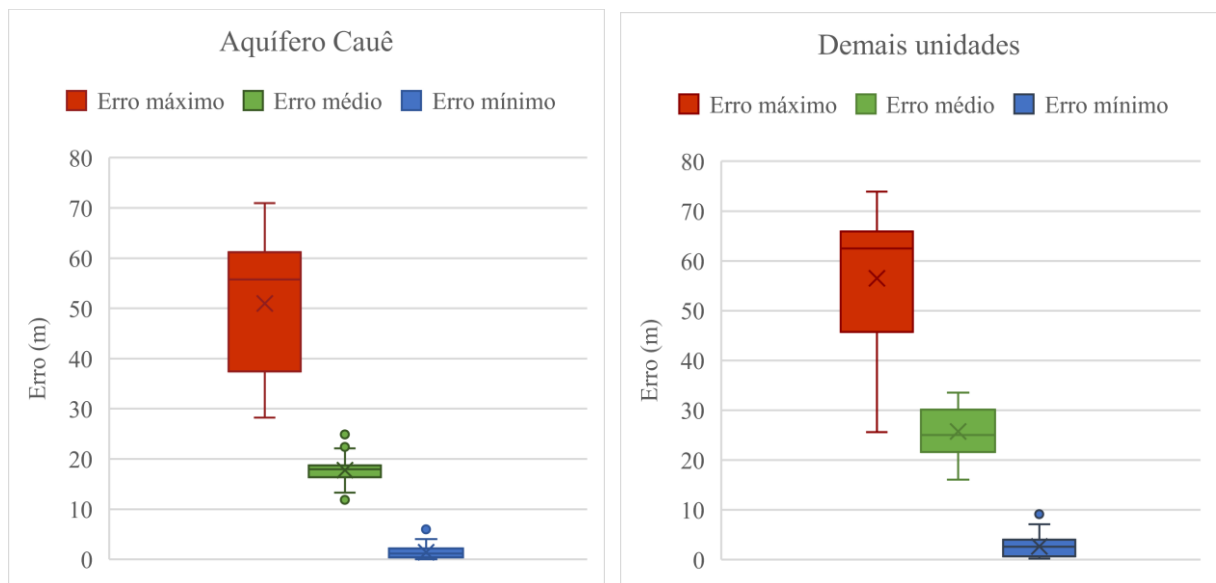


Figura 9. Aderência dos dados no Aquífero Cauê e nas demais unidades hidrogeológicas

Em relação à variação da carga hidráulica ocorrida no período do modelo transiente, a Tabela 4 apresenta de forma resumida o rebaixamento calculado a partir dos pontos de observação e a partir das superfícies de pressão zero. Não foi possível comparar essas informações com a média dos valores de rebaixamento observados pois poucos instrumentos contêm a série de dados completa no período analisado, impedindo o cálculo direto do rebaixamento total durante o período.

Tabela 4. Rebaixamento calculado nos diferentes setores entre 1999 e 2019

Setor	Rebaixamento (m) Pontos de observação	Rebaixamento (m) Superfícies de pressão zero
Norte	15,4	5,1
Central 1	5,9	5,5
Central 2	32,9	11,6
Sul	1,3*	1,0

\*Calculado a partir de pontos de controle

A tabela mostra que o rebaixamento calculado utilizando os pontos de observação é maior do que aquele obtido a partir das superfícies de pressão zero, resultado do acúmulo de instrumentos de monitoramento nas proximidades das cavas de mineração. Além disso, nota-se que o maior impacto ocorreu no setor Central 2. Os setores Norte e Central 1 apresentaram impacto intermediário, e o setor Sul obteve o menor rebaixamento entre os quatro compartimentos. Ressalta-se que o armazenamento não foi calibrado no Setor Sul devido à ausência de instrumentos com série de dados observadas para calibração. Assim, foram utilizados no Setor Sul os mesmos parâmetros obtidos para o setor Central 2.

Ainda, comparando o rebaixamento calculado em todo o Aquífero Cauê com as demais unidades, o primeiro obteve rebaixamento médio de 10,4 metros, enquanto as demais foram rebaixadas em média 2,2 metros. Conforme esperado, o rebaixamento no Aquífero Cauê foi maior do que no restante da área, favorecendo o fluxo dos aquíferos Gandarela e Moeda em direção ao Aquífero Cauê.

Já em relação ao fluxo de base, considerando todas as drenagens do modelo, no período de 1999 a 2019 observou-se redução de 13,6% da vazão na área como um todo. A redução ocorreu predominantemente no setor Central 2 (21,6%) seguida do setor norte (13,7%), Central 1 (9,4%) e Sul (6,2%).

A Figura 10 demonstra que o Aquífero Cauê apresentou  $S_y$  entre  $5,00 \times 10^{-02}$  e  $5,00 \times 10^{-01}$ , e  $S_s$  entre  $3,16 \times 10^{-04}$  e  $7,0 \times 10^{-03}$ , o que condiz com os valores obtidos por Magalhães *et al.* (2022). Além disso no geral nota-se maior armazenamento na porção superior dessa unidade, indicando maior capacidade de receber e ceder água. Isso ocorre devido ao caráter livre do aquífero em sua porção superior, e confinamento em profundidade.

Comparando o armazenamento médio do Aquífero Cauê com os demais (Tabela 2), notou-se que esta unidade apresenta os maiores valores, os quais são próximos do Aquífero Moeda e Aquífero Gandarela. Já o Aquitardo Batatal apresentou valores de  $S_s$  e  $S_y$  mais de 10 vezes inferiores aos demais, o que indica maior grau de confinamento.

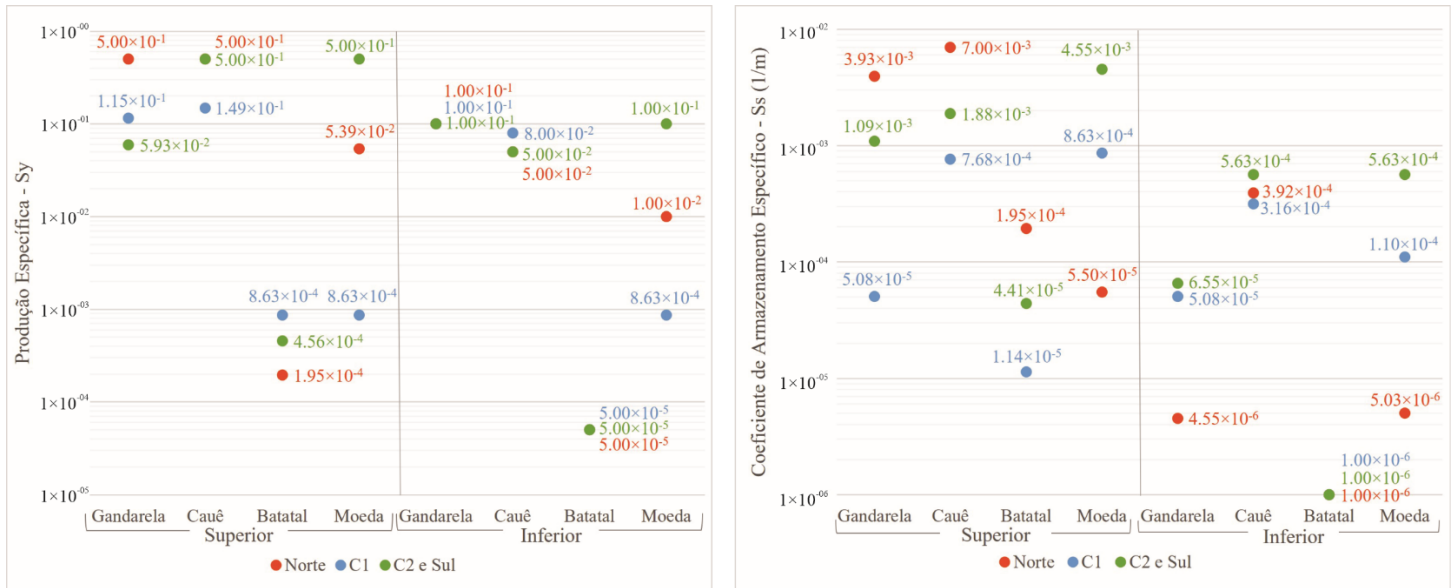


Figura 10. Distribuição do armazenamento obtido no modelo

### 4.3 Simulação

Para avaliar a provável evolução dos impactos ocorridos na área no futuro, foi simulado o cenário de manutenção das taxas de bombeamento do final do modelo transiente (setembro de 2019), de 52 milhões de  $m^3$ /ano, durante o período entre outubro de 2019 e setembro de 2039. O balanço de massa nessa etapa obteve discrepância de 2,17%.

No período de simulação, considerando o cálculo usando as superfícies de pressão zero citado anteriormente, foi observado um rebaixamento de 7,4 metros, em média, na área como um todo. No setor Norte o rebaixamento médio foi de 7,6 metros, no setor Central 1 foi de 6,5 metros e no setor Central 2 foi de 10,8 metros. O Setor Sul apresentou rebaixamento de 0,5 metros em média.

Quanto às vazões fluviométricas, na área total o modelo prevê 7,6% de redução do fluxo de base no ano de 2039 em relação a 2019. Essa taxa é menor em relação ao período anterior (1999 a 2019, redução de 13,6%) devido ao rebaixamento das cargas hidráulicas, que resultou em trechos de drenagem sem saída de água no modelo. O setor Central 2 novamente mostrou maior impacto, com redução de 17,8% do fluxo de base inicial, seguido pelo setor Norte (7,4%), Central 1 (5,2%) e sul (0,04%).

Alguns dos cursos hídricos mais afetados de acordo com o modelo foram o Córrego Fechos e Córrego da Cascalheira, que registraram respectivamente 14,7% e 54,1% de redução do fluxo de base nesse período. O Córrego da Cascalheira se destaca devido ao complexo de 3 (três) cavas de mineração que realizam bombeamento próximas ao seu curso, no setor Central 2, influenciando sua vazão. O mesmo ocorre no setor Norte, onde há três empreendimentos

próximos ao Córrego Fechos que realizam bombeamento. Ressalta-se que esses valores não consideram as reposições realizadas nesses cursos hídricos para mitigação dos impactos do bombeamento.

## 5 DISCUSSÃO

A análise do rebaixamento das cargas hidráulicas, tanto no modelo transiente quanto na simulação, apontou para uma maior redução das cargas nos setores Norte e Central 2. Essa constatação é corroborada pelos mapas de carga hidráulica apresentados na Figura 11 a, b e c, nos quais é possível visualizar, nesses setores, um rebaixamento significativo da carga hidráulica ao longo do tempo. Nesses setores, encontram-se mais concentrados os empreendimentos minerários, onde há maiores taxas de bombeamento. Não foi observada alteração significativa nas áreas em roxo e azul, onde estão localizados os principais cursos hídricos da área e as menores altitudes, favorecendo cargas hidráulicas mais próximas da superfície e fluxo de base mais constante.

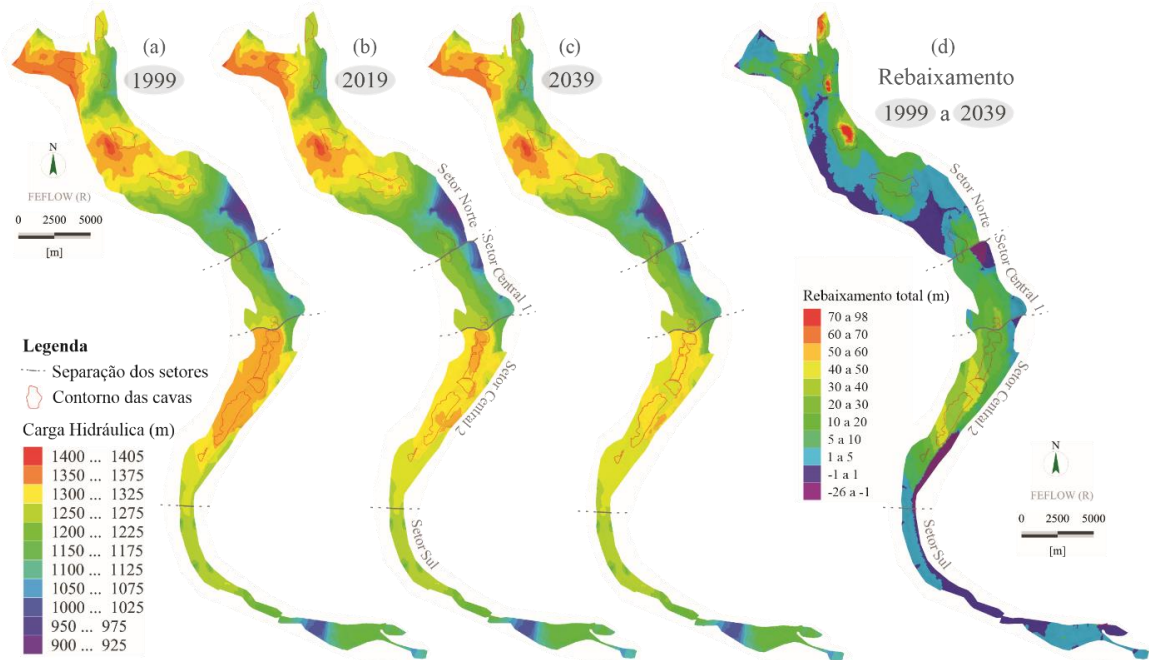


Figura 11. (a, b e c) Evolução da carga hidráulica entre 1999 e 2019 (modelo transiente) e entre 2019 e 2039 (simulação); (d) rebaixamento total previsto entre 1999 e 2039. Fonte: Feflow®

A Figura 11 (d) apresenta o rebaixamento das cargas hidráulicas ocorrido desde a data do modelo em regime permanente até o final da simulação (de 1999 a 2039). Nessa figura, nota-se que, apesar de o maior rebaixamento ser localizado na área das cavas, o efeito não se restringe a elas, sobretudo no setor Central 2. Isso demonstra o impacto regional do bombeamento, que não pode ser representado adequadamente por modelos operacionais locais. No sul do setor Central 2, entretanto, houve aumento da carga hidráulica devido à condição de contorno do tipo



3 inserida para indicar a entrada de água. Além disso, devido à baixa condutividade hidráulica associada às falhas, observa-se no modelo uma retenção do impacto no setor Central 2, limitando o rebaixamento no setor Central 1.

Outro ponto de discussão refere-se às trocas de água entre as unidades hidrogeológicas. Tanto no modelo conceitual (mapa potenciométrico, Figura 3 d) quanto no modelo calibrado em regime permanente observou-se que inicialmente, no geral, o Aquífero Cauê atua como divisor de águas, cedendo água para o Aquífero Gandarela e Aquitardo Batatal, e conseqüentemente para o Aquífero Moeda. A Figura 12 mostra a evolução do fluxo em direção ao Aquífero Cauê ao longo do tempo, no modelo em regime permanente (1999), final do modelo em regime transiente (2019) e final da simulação (2039). A partir dessa figura nota-se que ao longo do tempo há uma tendência de reversão de fluxo no modelo. O Aquífero Gandarela, que originalmente recebia água do Aquífero Cauê, conforme a primeira seta da figura, passa a ceder água. Já as unidades Batatal e Moeda passam a receber menos água do Aquífero Cauê. Isso se deve ao intenso bombeamento, que reduz o gradiente hidráulico, prejudicando o fornecimento de água para as outras unidades.

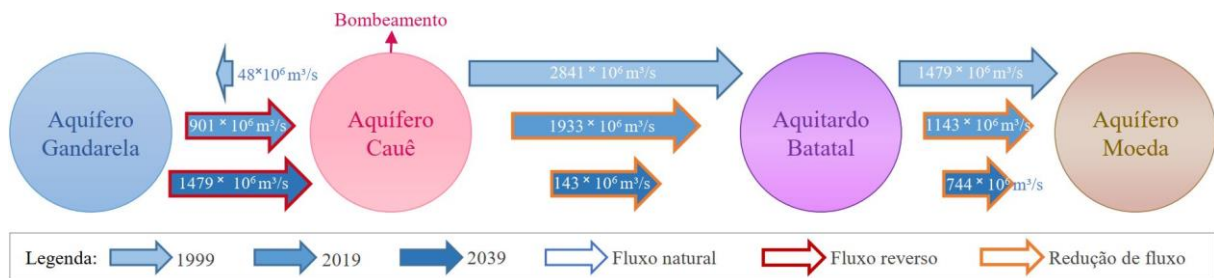


Figura 12. Evolução do fluxo em direção ao Aquífero Cauê. Valores negativos indicam fluxo de saída do Aquífero Cauê, e os positivos indicam entrada.

A partir dos erros e parâmetros hidráulicos obtidos, pode-se dizer que o modelo numérico construído e calibrado em regime permanente e transiente obteve resultados condizentes com o modelo conceitual elaborado anteriormente por Magalhães *et al.* (2022), sendo considerado adequado para representar as condições hidrogeológicas regionais. Entretanto, por o modelo ser uma representação aproximada da realidade, existem limitações e pontos a serem aprimorados.

Como as informações utilizadas foram provenientes de um banco de dados pré-existente, não foi possível validar a totalidade das informações, e muitas séries de dados encontradas estavam incompletas. Da mesma forma foi necessário desconsiderar as captações e reposições superficiais devido à dificuldade de encontrar esses dados nos relatórios. Outra limitação é que o caráter regional do modelo não permite contemplar variações faciológicas e estruturas locais que podem influenciar no fluxo. Por outro lado, esse tipo de modelo possibilita

representar regiões de maior e menor susceptibilidade a impactos hídricos, e conseqüentemente nortear órgãos competentes para uma gestão mais assertiva dos recursos hídricos.

Como pontos de melhora, destaca-se que seria importante haver pontos de monitoramento de carga hidráulica no sul da área, além de maior monitoramento fora do Aquífero Cauê. Também seria enriquecedora a presença de mais pontos de monitoramento da vazão superficial para permitir uma avaliação mais precisa do impacto do rebaixamento no fluxo de base dos cursos d'água. Considerando as limitações existentes, o modelo foi construído e calibrado até o ano de 2019 de forma conservadora em relação ao cenário real. Desconsiderou-se as outorgas de baixa vazão e as captações superficiais e foram consideradas apenas as taxas de bombeamento outorgadas para os empreendimentos minerários.

Assim, para proporcionar um melhor controle ambiental da região no futuro, sugere-se a definição de uma rede de monitoramento mais assertiva que possibilite a obtenção de dados representativos de toda a área. Caso o monitoramento aponte a necessidade de redução dos impactos, algumas alternativas para a gestão seriam a diminuição das vazões outorgadas e maior controle das reposições nos cursos hídricos afetados.

Diante disso, a partir da Figura 11 (d) pode-se definir as áreas prioritárias para monitoramento das cargas hidráulicas e drenagens para formar uma rede de monitoramento regional. De forma geral, as áreas em azul escuro, onde a alteração da carga hidráulica prevista em 40 anos foi menor do que 1 metro, necessitam de poucos instrumentos de monitoramento de nível d'água, sendo o foco nessas áreas para os cursos hídricos. Já as áreas em azul claro, que tiveram rebaixamento entre 5 e 10 metros, necessitam também de maior concentração de instrumentos de medição de vazão dos cursos hídricos, e com foco no monitoramento da água subterrânea no Aquífero Cauê. As áreas em vermelho correspondem ao centro das cavas, onde se concentram a maioria dos instrumentos. Uma eventual rede de monitoramento hidrológica regional, portanto, deve focar na alocação de instrumentos de monitoramento subterrâneo nas áreas em verde e amarelo, principalmente aquelas fora do Aquífero Cauê, onde atualmente existem poucos instrumentos de monitoramento. Isso permitiria apontar com mais clareza os impactos regionais não restritos às áreas das cavas.

## **6 CONCLUSÕES**

Primeiramente, conclui-se que o modelo gerado se mostrou adequado para representar as condições hidrogeológicas regionais, dados os baixos valores de erro e discrepância do balanço de massa tanto em regime permanente quanto transiente. Isso permite que o modelo

seja utilizado para definir as regiões mais impactadas e possibilitar melhor gestão das vazões de bombeamento outorgadas na área. A partir da modelagem realizou-se a simulação para estimar as mudanças futuras na carga hidráulica subterrânea e nas vazões superficiais.

Com base na simulação realizada espera-se que nos próximos 20 anos haja rebaixamento do nível d'água mais expressivo no setor Central 2. Ademais, apesar de ser a região com menor quantidade de dados, pode-se dizer que o setor sul foi o menos impactado no período de simulação, apresentando baixa redução média tanto na carga hidráulica (0,5 m) quanto no fluxo de base (0,04%).

Além dos impactos à água subterrânea, conclui-se que o rebaixamento na região afeta também a vazão das drenagens superficiais. A previsão é de que entre 2019 e 2039 o fluxo de base dos cursos hídricos seja reduzida em 7,6%, além dos 13,6% reduzidos nos 20 anos anteriores. Essa diminuição de vazão na área implica na maior vulnerabilidade de alguns cursos hídricos, que podem deixar de ser perenes a depender do rebaixamento da carga hidráulica em sua região. Se não houver controle adequado das reposições isso pode prejudicar tanto o abastecimento local quanto o regional, já que o fluxo superficial e subterrâneo da área de estudo contribuem para o Rio das Velhas, nível de base da região e manancial de suma importância para o abastecimento da RMBH.

Considerando que o cenário simulado pressupõe a manutenção das taxas de bombeamento, a situação real pode tanto ser agravada pelo aumento das vazões outorgadas, bombeadas e captadas das drenagens superficiais, quanto atenuada pela redução ou paralisação do bombeamento em alguns empreendimentos que venham a ser desativados.

## **7 AGRADECIMENTOS**

À UFMG e Instituto de Geociências por proporcionar o desenvolvimento do trabalho; ao IGAM e Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Estado de Minas Gerais pela parceria e fornecimento da base de dados; à Water Services and Technologies por fornecer bolsa para curso do *software* Feflow; à DHI e Bentley Systems Limited pela autorização para uso dos *softwares* Feflow e Leapfrog Geo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento dos modelos conceitual e computacional possibilitou concluir que entre outubro de 1999 e setembro de 2019 houve impacto significativo sobre o Aquífero Cauê na área de estudo. Ainda, foi possível estimar que haverá maior impacto nos 20 anos subsequentes caso sejam mantidas as vazões outorgadas atualmente, podendo afetar a disponibilidade hídrica local e regional.

O modelo conceitual permitiu a quantificação do volume de água subterrânea bombeado na área anualmente e do que isso representa em relação à reserva renovável, um panorama regional antes inexistente na literatura. Também foram aprimorados no primeiro artigo os conhecimentos sobre as condições de fluxo da região. Além disso essa etapa gerou um banco de dados de monitoramento hidrogeológico, reunindo informações anteriormente dispersas por relatórios, que poderá ser utilizado posteriormente, pelo IGAM.

Já o modelo numérico permitiu estimar os impactos do bombeamento na carga hidráulica, e a distribuição desses impactos pela área, o que também não havia sido feito anteriormente de forma regional e integrada. A construção desse modelo permitiu a simulação do cenário dos próximos 20 anos, o que poderá contribuir para uma melhor gestão dos recursos hídricos no futuro. Esse modelo também será disponibilizado para que o IGAM possa fazer novas análises e previsões pertinentes.

Apesar de esse trabalho ter gerado resultados importantes e satisfatórios, houve dificuldades que não permitiram maior aprofundamento e definições mais acuradas dos impactos. As principais dificuldades se relacionam à deficiência na quantidade e qualidade dos dados. Como exemplo, na fase de compilação os relatórios utilizados encontravam-se digitalizados, sendo necessário digitar os dados manualmente ou utilizar *softwares* de leitura automática de gráficos e tabelas. Além disso os dados obtidos não se encontravam bem distribuídos localmente e temporalmente, havendo deficiência principalmente no setor Sul e nas unidades hidrogeológicas que não o Aquífero Cauê, além da escassez de dados da primeira década do modelo. Os pontos de monitoramento, ainda, se localizam majoritariamente próximos às cavas de mineração, podendo gerar resultados enviesados.

Outra dificuldade verificada relaciona-se ao tamanho da área, principalmente na modelagem computacional. Por ser um estudo de escala regional, houve maior dificuldade em encontrar parâmetros adequados para uma calibração que atendesse aos níveis de todos os instrumentos de monitoramento, tanto no modelo permanente quanto no transiente.

Devido a essas dificuldades e incertezas, a avaliação do impacto foi feita de forma conservadora. Foi considerado que a vazão bombeada para cada empreendimento não ultrapassa a vazão outorgada e foram desconsideradas as captações superficiais e subterrâneas para outros usos que não a mineração. Assim, pode-se dizer que os impactos reais são ainda maiores que os apresentados.

Sugere-se, portanto, que em trabalhos futuros seja feita uma coleta de dados mais robusta, que inclua parcerias com a iniciativa privada (empreendimentos minerários), de forma a obter os dados brutos produzidos por ela. Ademais, sugere-se que seja feita maior setorização, possibilitando maior diversidade de comportamentos hidrológicos em cada litologia, já que essas não são homogêneas por toda a área.

Para integrar todos esses dados e gerar modelos mais confiáveis no futuro, sugere-se ainda a instalação de uma rede de monitoramento que garanta a distribuição dos instrumentos pela área, sendo estes alocados além da Formação Cauê, e a obtenção adequada e constante dos dados, tanto de vazão superficial quanto do nível d'água subterrânea. Essa rede possibilitaria monitorar a região de forma integrada, permitindo estimar adequadamente o alcance e a magnitude do impacto do rebaixamento do nível d'água. Essas informações podem aprimorar a gestão da água subterrânea no Sinclinal Moeda, sobretudo nas regiões e unidades aquíferas que atualmente são pouco monitorados.

Por fim, conclui-se que é necessário maior controle das vazões outorgadas e medidas de mitigação, definindo limites de captação, sobretudo para a região mais impactada, aqui denominada "Setor Central 2". Dessa forma será possível realizar uma gestão mais adequada dos mananciais, garantindo a disponibilidade hídrica para as gerações futuras e ecossistemas.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). 2016. SAR–Sistema de acompanhamento de reservatórios. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/>. Acesso em: 27 de março de 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). 2020. Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas (Ano-Base 2019). Brasília: ANM, 34 p.
- ALKMIM FF, MARSHAK S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Res*, 90:29-58.
- ÁLVARES CA, STAPE, JL, SENTELHAS PC, GONÇALVES JL de M, SPAROVEK, G. 2014. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22:711–728.
- AMORIM LQ, RUBIO RF, ALKMIM FF. 1999. The effects of mining Capão Xavier iron ore deposit on the water supply of Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil. In: *Mine, water & environment 1999 IMWA Congress*, Sevilla, Espanha, p. 359-366
- ANDERSON MP & WOESSNER WW. 1992. *Applied Groundwater Modeling— Simulation of Flow and Advective Transport*. San Diego: Academic Press, 381 p.
- ANDERSON MP, WOESSNER WW, HUNT RJ. 2015. *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*, 2nd ed. San Diego: Academic Press, 630 p.
- ARENAS MC, PESCADOR JP, DONADO GARZÓN LD, SAAVEDRA EY, ARBOLEDA OBANDO PF. 2020. Hydrogeological Modeling in Tropical Regions via FeFlow. *Earth Sciences Research Journal*, 24(3):285-295
- ASHRAF A, AHMAD Z. 2008. Regional groundwater flow modelling of Upper Chaj Doab of Indus Basin, Pakistan using finite element model (Feflow) and geoinformatics. *Geophysical Journal International*, 173(1):17-24
- AZEVEDO ÚR, MACHADO MMM, CASTRO PDTA, RENGER FE, TREVISOL A, BEATO DAC. 2012. Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG): proposta. CPRM.
- BARNES BS. 1939. The structure of discharge recession curves. *Transactions - American Geophysical Union*, 20(4):721-725.
- BEATO DAC, MONSORES ALM & BERTACHINI AC. 2005. Hidrogeologia. In: CPRM/SEMAD/CEMIG. Projeto Apa Sul RMBH - Estudos do Meio Físico: Área de Proteção Ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte:CPRM/SEMAD. 116p.
- BEATO DAC, MONSORES ALM, BERTACHINI AC. 2006. Potencial aquífero nos metassedimentos do Quadrilátero Ferrífero - região da APA SUL RMBH - MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14., CURITIBA. Anais..., Curitiba, p. 1–20.
- BERTACHINI AC. 1994. Hidrogeologia e desaguamento da Mina de Águas Claras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS – ABAS, 8., RECIFE. Anais..., Recife, p. 274-283

BERTACHINI MNA, BERTACHINI AC, PEREIRA B, GRANDCHAMP CA, NUNES F, PEREIRA FILHO M. 2012. Estudos sobre os efeitos da Recarga Artificial (RA) sobre o Aquífero Cauê, no Quadrilátero Ferrífero-MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 17. BONITO. Anais..., Bonito.

BERTACHINI MNA. 2020. Determinação da condutividade hidráulica do Aquífero Cauê na região oeste do Sinclinal Moeda, Nova Lima/MG. Monografia para conclusão do MBA, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BOUWER H, RICE RC. 1976. A Slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, 12(3):423–428.

BRAGA, SCM. 2006. Modelagem estrutural e geofísica da porção centro-norte do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, MG. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 113 p.

CBH RIO DAS VELHAS. 2015. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas: Resumo Executivo. Belo Horizonte. Acesso em 16 de setembro de 2021. Disponível em: [cdn.agenciapeixevivo.org.br/media/2020/06/RESUMO-EXECUTIVO-PDRH-VELHAS-2015.pdf](http://cdn.agenciapeixevivo.org.br/media/2020/06/RESUMO-EXECUTIVO-PDRH-VELHAS-2015.pdf)

CBH RIO DAS VELHAS. 2019. Revista Rio das Velhas – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, n. 9, março 2019.

CHEMALE JR F, ROSIÈRE CA, ENDO I. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Res*, Amsterdam, 65:25-54.

CHISTE-COSTA, JP. 2017. Numerical Groundwater Flow Modeling Applied to Dewatering Prediction of Cauê Aquifer in Alegria Mine, East of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais / João Paulo Chiste Costa; orientadora Alexandra Vieira Suhogsoff. – São Paulo. 117 p. doi:10.11606/D.44.2019.tde-12122019-092658

COOPER HH, BREDEHOEFT JD, PAPADOPULOS SS. 1967. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water, *Water Resources Res*, 3(1):263-269.

COSTA WD. 1998. Avaliação de Reservas, Potencialidade e Disponibilidade de Aquífero. In: X Congresso Brasileiro de Água Subterrânea. São Paulo, Anais.

CUNHA APMA, ZERI M, LEAL KD, COSTA L, CUARTAS LA, MARENGO JA, TOMASELLA J, VIEIRA RM, BARBOSA AA, CUNNINGHAM C, GARCIA JVC, BROEDEL E, ALVALÁ R, RIBEIRO-NETO G. 2019. Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, 10(11):642.

DANTAS JCM, MESQUITA DC, PAULA RS, GUERRA KJ. 2017. Correlação entre dados de perfilagem geofísica e potencial de bombeamento de poços em litotipos da Formação Cauê no sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. *Águas Subterrâneas*, 31(4):373-383.

ENGELLEN GB, KLOOSTERMAN FH, ENGELLEN GB, KLOOSTERMAN FH. 1996. Numerical Modelling of Groundwater Flow Systems; a Case Study in the SE part of the Netherlands. *Hydrological Systems Analysis: Methods and Applications*, p. 62-63.

FEITOSA FAC (Cord.), MANOEL FILHO J, FEITOSA EC, DEMETRIO, JGA. 2008. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: CPRM; Recife: LABHID, 812p.

FERREIRA QCG, BACELLAR LAP. 2010. Avaliação preliminar das condições hidrogeológicas na área do município de Ouro Preto, MG. Geonomos, 18:13-21.

FREITAS SMACD, BACELLAR LDAP. 2013. Avaliação da recarga de aquíferos em microbacias do Alto Rio das Velhas, Minas Gerais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 18:31-39.

GONÇALVES RD, TERAMOTO EH, CHANG HK. 2020. Regional groundwater modeling of the Guarani Aquifer System. Water, 12(9):2323

GUERRA KJ. 2010. Aplicação de Método geofísico em estudo hidrogeológico no município de Nova Lima – MG. Caracterização De Aquíferos Em Área Urbana. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 116 p.

GUSTARD A, BULLOCK A, DIXON JM. 1992. Low flow estimation in the United Kingdom. Wallingford, Institute of Hydrology, 88pp.

HOAN TV, RICHTER KG, BÖRSIG N, BAUER J, HA NT, NORRA S. 2022. An improved groundwater model framework for aquifer structures of the quaternary-formed sediment body in the southernmost parts of the Mekong Delta, Vietnam. Hydrology, 9(4):61

HOU GC, ZHANG MS. 2008. Exploration and Study of Groundwater in the Ordos Basin. Geological Publishing House, Beijing, 563 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2020. Regiões Metropolitanas, Aglomerações Urbanas e Regiões Integradas de Desenvolvimento. IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/18354-regioes-metropolitanas-aglomeracoes-urbanas-e-regioes-integradas-de-desenvolvimento.html>. Acesso em 3 de maio de 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). 2020. Banco de Dados Meteorológico para Ensino e Pesquisa - BDMEP. Brasília. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 10 de fevereiro 2020.

IRITANI MA. 1999. Modelação Matemática Tridimensional para a Proteção das Captações de Água Subterrânea. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/T.44.1999.tde-16082013-125326.

KOCHANEK K, TYNAN S. 2010. The environmental risk assessment for decision support system for water management in the vicinity of open cast mines (DS WMVOC). Technological and Economic Development of Economy, 16(3):414-431.

KÖPPEN W, GEIGER R. 1928. Klimate der Erde. Gotha: Verlagcondicionadas. Justus Perthes. n.p.

LOBATO LM, BALTAZAR OF, REIS LB, ACHTSCHIN AB, BAARS FJ, TIMBÓ MA, BERNI GV, MENDONÇA BRV, FERREIRA DV. 2005. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero – Integração e Correção Cartográfica em SIG. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais, 2005. Folha Ouro Preto. Escala 1:50.000.



MAGALHÃES CCC, MELO MC, GUIGUER N, PAULA RS. 2022. The Cauê Aquifer on the eastern limb of Moeda Syncline: characterization, impacts, and flow in an area west of Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero) – MG, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 52(4):e20220005, 2022. <https://doi.org/10.1590/2317-488920220220005>

MAXWELL CH. 1972. *Geology and ore deposits of the Alegria district, Brazil*. Washington: USGS/DNPM. 72p.

MESQUITA DC, DANTAS JCM, DE PAULA RS, GUERRA KJ. 2017. Estudo dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos em ensaios de campo em itabiritos brandos da porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. *Geonomos*, 25(2):12-19.

MIDDLEMIS H, MERRICK NP, ROSS JB. 2000. *Groundwater flow modelling guideline*. Aquaterra Consulting Pty Ltd. Western Australia, 133 p.p. 133. 2000.

MILLER JA. 1999. *Groundwater Atlas of the United States: Introduction and National Summary*. United States Geological Survey Publication HA 730-A, 15 p.

MINAS GERAIS - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. 2020. Produto 1: plano de trabalho adequado. t.1. In: *Plano Estadual de Saneamento Básico de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2020. Disponível em: [http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2020/SANEAMENTO/PESB/Produtos/PT\\_Tomo\\_I\\_PESB\\_Rev01\\_24\\_07\\_2020.pdf](http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2020/SANEAMENTO/PESB/Produtos/PT_Tomo_I_PESB_Rev01_24_07_2020.pdf). Acesso em: 12 de dezembro de. 2022.

MOHAN S, PRAMADA SK, ANJU M. 2022. Management of dewatering schemes in an open cast mine operation using groundwater flow modeling: a case study of karst aquifer, Tamil Nadu, India. *Acta Geophysica*, 70(1):283-303

MOURÃO MAA. 2007. *Caracterização hidrogeológica do Aquífero Cauê: Subsídios para a gestão de recursos hídricos no Quadrilátero Ferrífero*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 297 p.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA (UNESCO). 2021. *World Heritage Convention: States Parties in Brazil*. Disponível em: <https://whc.unesco.org/en/statesparties/br/>. Acesso em 11 de janeiro de 2023.

PAULA RS, MESQUITA DC, DANTAS JCM & GUERRA KJ. 2018. Caracterização hidroquímica e isotópica das águas, na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero no município de Congonhas-MG, e sua correlação com a localização em cota das unidades aquíferas deste sistema. *Águas Subterrâneas* 32(1):140-153.

PEREIRA AR, ANGELOCCI LR, SENTELHAS PC. 2002. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba: Agropecuaria.

PIMENTA F, LOPES-SILVA L, PIROTTE N, ROSIÈRE CA. 2009. Stratigraphic analysis of a carbonate sequence related to the BIFs of the Iron Quadrangle, southeastern Brazil. In: SGA2009: BIENNIAL MEETING OF THE SOCIETY OF GEOLOGY APPLIED TO MINERAL DEPOSITS, 10., TOWNSVILLE. SGA2009: The 10th Biennial Meeting of The Society of Geology Applied to Mineral Deposits.

- RAMOS MLS, PAIXÃO MMOM. 2003. Disponibilidade Hídrica de Águas Subterrâneas – Produtividade de Poços e Reservas Explotáveis dos Principais Sistemas Aquíferos. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco. IGAM, Belo Horizonte, 41 p.
- ROESER HMP, ROESER PA. 2010. O Quadrilátero Ferrífero – MG, Brasil: aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados. *Geonomos* 18:33-37.
- ROLIM GS, SENTELHAS PC, BARBIERI V. 1998. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria 6:133- 137.
- ROSIÈRE CA & CHEMALE JR F. 2013. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero-uma visão geral e discussão. *Geonomos* 8:27-43.
- ROSSI DQ. 2014. Estratigrafia e arcabouço estrutural da região de Fábrica Nova, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.
- RUBIO RF, GRANDCHAMP EC, MAURO E, DE REZENDE LOBO, FERNÁNDEZ EDL, BERTACHINI GAC. 2009. Dewatering at the capão xavier iron open pit mine (Minas Gerais, Brazil). In: INTERNATIONAL MINE WATER CONFERENCE, PRETORIA, ÁFRICA DO SUL. Anais..., p. 149-161
- RUPP J, BEALE G, HOWERTON K, ALLEN M. 2021. Integration of Regional and Site Scale Models for an Open-Pit Mine. In: PROCEEDINGS OF THE IMWA—MINE WATER MANAGEMENT FOR FUTURE GENERATIONS; Stanley P, Wolkersdorfer C, Wolkersdorfer K, Eds, p. 496-501.
- SCHLUMBERGER WATER SERVICES. 2017. Estudo Hidrogeológico Coca-Cola FEMSA Unidade Itabirito. Relatório: FEMSA\_Itabirito\_Estudo\_Hidrogeologico\_rev2\_FINAL. Rio de Janeiro.
- SILVA RG, GOMES CJS. 2001. Análise da deformação na porção centro-sul do Sinclinal da Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Ouro Preto: Geo.br* 1:1–23.
- SILVA SL, MONTEIRO EA, BALTAZAR OF. 2005. Geologia. In: CPRM/SEMAD/CEMIG. Projeto APA SUL RMBH - Estudos do Meio Físico: Área de Proteção Ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD. 73p.
- SUN RJ, JOHNSON RH. 1994. Regional Aquifer System Analysis Program of the U.S. Geological Survey, 1978–1992. U.S. Geological Survey.
- SURINAIDU L, RAO VG, RAO NS, SRINU S. 2014. Hydrogeological and groundwater modeling studies to estimate the groundwater inflows into the coal Mines at different mine development stages using MODFLOW, Andhra Pradesh, India. *Water Resources and Industry*, 7:49-65
- SZCZEPÍŃSKI J. 2019. The significance of groundwater flow modeling study for simulation of opencast mine dewatering, flooding, and the environmental impact. *Water*, 11(4):848
- THIESSEN AH. 1911. Precipitation Averages for Large Areas. *Monthly Weather Review* 39(7):1082–1084.

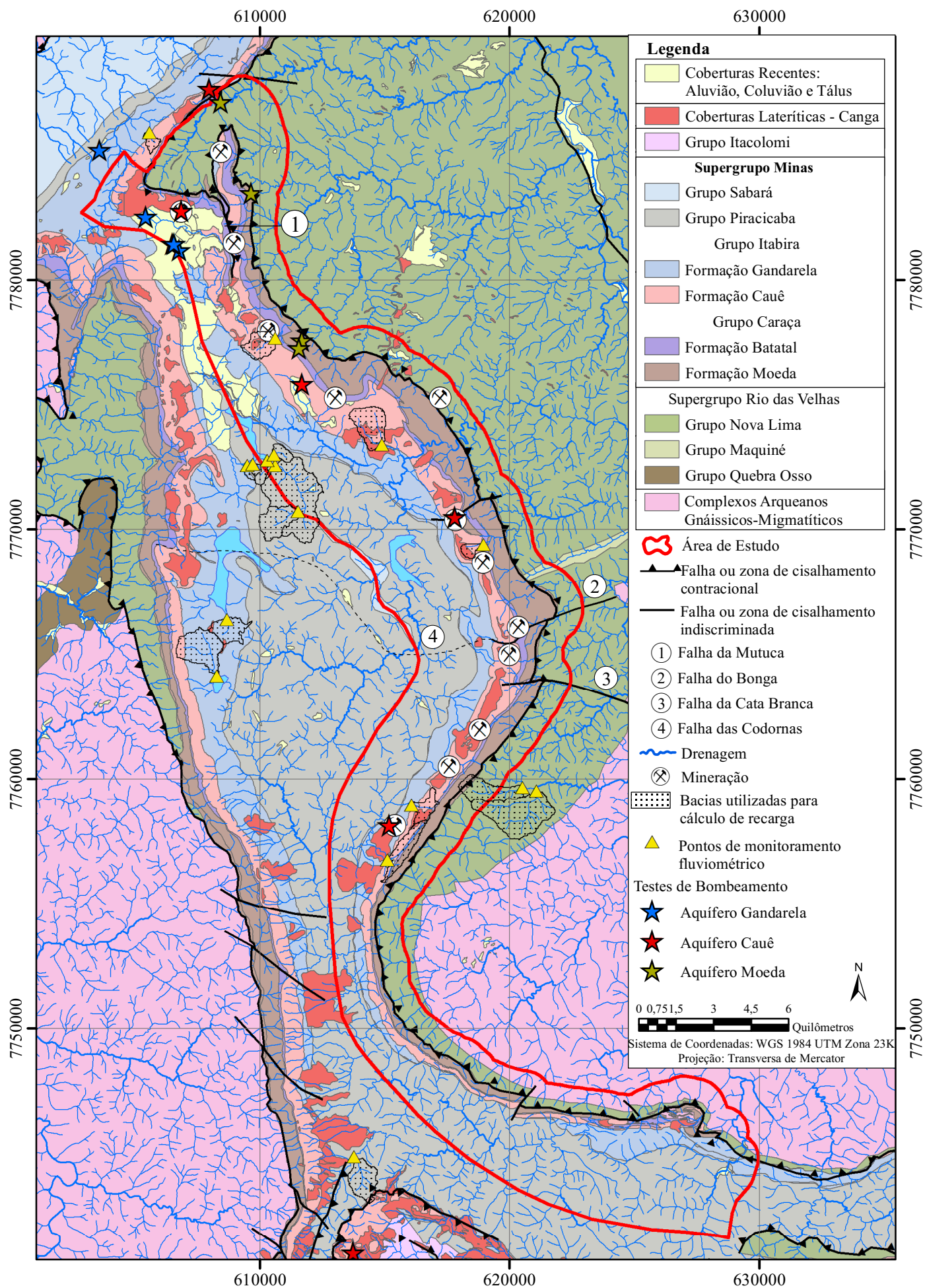
THORNTHWAITE CW, MATHER JR. 1955. The water balance. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p.

VENTURA LC, BACELLAR LAP. 2011. Influência de filitos no padrão de fluxo e na estabilidade de taludes de cavas a céu aberto. Geotecnia 121:71-88

WATERLOO HYDROGEOLOGIC. 2016. AquiferTest Pro v. 2016.1: Pumping & Slug Test Analysis, Interpretation & Visualization Software. Waterloo, Canada: Waterloo Hydrogeologic.

ZHOU Y, LI W. 2011. A review of regional groundwater flow modeling. Geoscience frontiers, 2(2):205-214.

## APÊNDICE A - Mapa dos pontos de monitoramento fluviométrico e testes de bombeamento utilizados no cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos



## APÊNDICE B - Cálculo da Reserva Renovável

	A	B	C	D	E	
1	<p style="text-align: center;">Cálculo da Reserva Renovável</p> <p style="text-align: center;"><b>Rr = A x P x I</b></p> <p>Sendo: Rr = Reserva Renovável (m³/ano)            A = Área de Ocorrência do Aquífero (m²)            P -precipitação pluviométrica média anual na área (m/ano)            I -taxa de infiltração            Fonte: Costa (1998)</p>		<p style="text-align: center;">Exemplo 1:</p> <p>Fórmula da reserva renovável da área total, ano hidrológico 1999-2000</p> $= ((B\$5 * \$E\$5 + B\$6 * \$E\$6 + B\$7 * \$E\$7 + B\$8 * \$E\$8 + B\$9 * \$E\$9 + B\$10 * \$E\$10 + B\$11 * \$E\$11 + B\$12 * \$E\$12) * B17 + (C\$5 * \$E\$5 + C\$6 * \$E\$6 + C\$7 * \$E\$7 + C\$8 * \$E\$8 + C\$9 * \$E\$9 + C\$10 * \$E\$10 + C\$11 * \$E\$11 + C\$12 * \$E\$12) * C17 + (D\$5 * \$E\$5 + D\$6 * \$E\$6 + D\$7 * \$E\$7 + D\$8 * \$E\$8 + D\$9 * \$E\$9 + D\$10 * \$E\$10 + D\$11 * \$E\$11 + D\$12 * \$E\$12) * D17) / 1000$		<p>Exemplo 2:</p> <p>Fórmula da reserva renovável do aquífero cauê, ano hidrológico 1999-2000</p> $= (B\$6 * B18 + C\$6 * C18 + D18 * D\$6) * \$E\$6 / 1000$	
2						
3	<b>Área de afloramento separada pelos polígonos de Thiessen (km²)</b>				<b>Taxa de Recarga (%)</b>	
4		Caixa de areia (1943022)	Rio do Peixe (2043004)	Itabirito (2043060)		
5	<b>Aquitardo Batatal</b>	2.062	6.004	2.511		
6	<b>Aquífero Cauê</b>	4.283	26.570	15.493		
7	<b>Aquífero Gandarela</b>	1.985	19.901	12.634		
8	<b>Aquífero Moeda</b>	0.958	20.603	10.460		
9	<b>Aquitardo Nova Lima</b>	16.857	22.151	24.885		
10	<b>Aquitardo Piracicaba</b>	0.000	38.799	57.945		
11	<b>Coberturas Aluvionares</b>	0.403	8.674	0.337		
12	<b>Aquitardo Complexo Bação</b>	0.003	1.961	9.941		
13	<b>Área Total (km²)</b>	<b>305.420</b>	[1] Média entre Aquífero Cauê e Aquífero Gandarela [2] Freitas e Bacellar (2013)			
14						
15	<b>Pluviometria anual separada por estação (mm)</b>					
16	<b>Ano Hidrológico</b>	Caixa de areia (1943022)	Rio do Peixe (2043004)	Itabirito (2043060)		
17	1999-2000	1777.6	1662	1537.8		
18	2000-2001	1234.6	1153	1170.3		
19	2001-2002	1890.2	1800.6	1386.5		
20	2002-2003	2103.2	1595	1355.7		
21	2003-2004	2150.1	1676.4	1415.9		
22	2004-2005	1746.5	1845.7	1494.2		
23	2005-2006	1464.5	1428.9	1271.7		
24	2006-2007	1508.4	1342.7	1114.2		
25	2007-2008	1915.4	1770.7	1348.4		
26	2008-2009	2016.8	2339.4	2091.2		
27	2009-2010	1993.4	1660.3	1297.3		
28	2010-2011	2004.5	1584.7	1414.7		
29	2011-2012	2049.7	2335.7	1825.8		
30	2012-2013	1268	1532.1	1293.3		
31	2013-2014	1393.5	1101.2	890.1		
32	2014-2015	1094.5	1300.4	1176.8		
33	2015-2016	1413.6	1447.4	1337.9		
34	2016-2017	1225.2	1227.2	1076.2		
35	2017-2018	1453.7	1377.2	1256.2		
36	2018-2019	2051	1670.2	1289.4		
37	2019-2020	-	-	-		

### APÊNDICE B - Cálculo da Reserva Renovável

	A	B	C	D	E
38	<b>Resultados</b>			<b>Vazão outorgada (milhões de m<sup>3</sup>/ano)</b>	
39	<b>Ano Hidrológico</b>	<b>Reserva Renovável - Área Total</b>	<b>Reserva Renovável - Aquífero Cauê</b>		
40	1999-2000	100.43	29.23	14.23	
41	2000-2001	72.28	20.90	14.19	
42	2001-2002	101.56	29.94	14.19	
43	2002-2003	95.67	27.99	14.19	
44	2003-2004	99.98	29.27	21.64	
45	2004-2005	104.83	30.81	40.13	
46	2005-2006	84.70	24.73	44.60	
47	2006-2007	78.33	22.97	48.55	
48	2007-2008	99.83	29.44	50.07	
49	2008-2009	136.69	39.91	50.06	
50	2009-2010	95.58	28.13	50.06	
51	2010-2011	96.26	28.08	50.11	
52	2011-2012	130.09	38.33	50.72	
53	2012-2013	87.29	25.59	52.83	
54	2013-2014	64.56	18.96	52.74	
55	2014-2015	76.19	22.22	52.61	
56	2015-2016	86.64	25.23	53.34	
57	2016-2017	72.15	21.09	53.20	
58	2017-2018	82.65	24.08	53.20	
59	2018-2019	96.03	28.28	53.33	
60	2019-2020	-	-	-	