



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Investigação do Fluxo no Sistema Aquífero do Flanco Oeste do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil

Isabella Brito Andrade¹; Rodrigo Sérgio de Paula²; Gabriela Meira Teixeira³; Tiago Amâncio Novo⁴; Marília Carvalho de Melo⁵; Felipe Andre Costa⁶

¹ Mestre em Geologia Regional, Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, CPTMC-IGC, CEP 31270-010, Avenida Presidente Antônio Carlos, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil (31) 99123-2938. isa.andrade25@gmail.com (autor correspondente). ² Dr. Pesquisador e Professor Titular, Departamento de Geologia, Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, CPTMC-IGC, CEP 31270-010, Avenida Presidente Antônio Carlos, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, rodrigo.spdm@yahoo.com ³ Mestre em Geologia Regional, Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, CPTMC-IGC, CEP 31270-010, Avenida Presidente Antônio Carlos, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, gabriellameira1998@gmail.com ⁴ Dr. Pesquisador e Professor Titular, Departamento de Geologia, Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, CPTMC-IGC, CEP 31270-010, Avenida Presidente Antônio Carlos, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. tiagoanovo@gmail.com ⁵ Mestre em Geologia Regional, Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, CPTMC-IGC, CEP 31270-010, Avenida Presidente Antônio Carlos, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. marilia.melo@meioambiente.mg.gov.br ⁶ Estudante de pós-graduação, Departamento de Geologia, Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, CPTMC-IGC, CEP 31270-010, Avenida Presidente Antônio Carlos, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. felipeaffc@gmail.com

Artigo recebido em 04/03/2024 e aceito em 02/02/2025

RESUMO

O Quadrilátero Ferrífero, conhecido por sua importância histórica, social, física e biológica, destaca-se também pela relevância hidrogeológica, especialmente no abastecimento de água para municípios e indústrias. Contudo, a crescente exploração mineral na região tem gerado preocupações quanto ao rebaixamento dos níveis de água, especialmente no Aquífero Cauê, localizado no flanco oeste do Sinclinal Moeda. O presente estudo foi realizado devido à necessidade de avaliar os impactos da exploração sobre os recursos hídricos do Quadrilátero Ferrífero, em particular o Aquífero Cauê, que desempenha um papel crucial no abastecimento local. A pesquisa analisou hidrogeologicamente os aquíferos do flanco oeste do Sinclinal Moeda desde 1999. Foram definidos os limites hidrogeológicos e realizadas avaliações dos parâmetros hidráulicos, além da elaboração de um mapa potenciométrico com base nos dados de monitoramento de 2019. O estudo também incluiu o cálculo do balanço hídrico e da reserva permanente. Como resultado, foram identificados um fluxo regional N-S e sub-regional E-W, além de definir cinco unidades aquíferas e cinco não aquíferas. Ademais, observou-se que o cone de rebaixamento se estendeu para além do Aquífero Cauê nas porções norte e central, impactando outras unidades aquíferas. No sul, o rebaixamento foi mais restrito ao Cauê. Desde 2009, o bombeamento de água ultrapassou a reserva renovável dessa unidade aquífera, resultando em uma reversão de fluxo e ampliação do cone de rebaixamento, o que compromete a disponibilidade de água na região.

Palavras-chave: água subterrânea; hidrogeologia; reserva renovável.

Investigation of Flow in the Aquifer System of the Western Flank of the Moeda Syncline, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil

ABSTRACT

The Quadrilátero Ferrífero, known for its historical, social, physical, and biological importance, also stands out for its hydrogeological relevance, particularly in supplying water to municipalities and industries. However, increasing water exploitation in the region has raised concerns about water level depletion, especially in the Cauê Aquifer, located on the western flank of the Moeda Syncline. This study was conducted to assess the impact of mineral exploitation on the water resources of the Quadrilátero Ferrífero, particularly the Cauê Aquifer, which plays a crucial role in local water supply. The research hydrogeologically analyzed the aquifers on the western flank of the Moeda Syncline since 1999. Hydrogeological boundaries were defined, hydraulic parameters were evaluated, and a potentiometric map was created based on 2019 monitoring data. The study also included the calculation of the water balance and permanent reserve. The results identified a regional N-S flow and a sub-regional E-W flow, along with the definition of five aquifer units and five non-aquifer units. The cone of depression extended beyond the Cauê Aquifer in the northern and central portions, affecting

other associated aquifers. In the southern portion, the drawdown was more localized to the Cauê Aquifer. Since 2009, water pumping has exceeded the renewable reserve of the Cauê, leading to a flow reversal and expansion of the cone of depression, compromising water availability in the region.

Keywords: groundwater; hydrogeology; renewable reserve.

Introdução

A escassez crescente de recursos hídricos tornou-se um dos principais desafios da sociedade contemporânea, impactando a sustentabilidade de diversas atividades econômicas e sociais. Esse problema é exacerbado pelas mudanças climáticas, que intensificam a redução da disponibilidade de água, tanto em qualidade quanto em quantidade. Com a ocorrência de secas severas e eventos climáticos extremos, as fontes de água se tornam cada vez mais vulneráveis, dificultando o atendimento das necessidades humanas e ambientais. No atual cenário, as políticas de gestão de recursos hídricos, muitas vezes ineficazes e mal implementadas, falham em atender a uma demanda crescente, gerando tensões e conflitos entre setores e comunidades pelo uso da água. A distribuição desigual dos recursos hídricos superficiais agrava essa crise, sobretudo em regiões onde os corpos d'água disponíveis são insuficientes para satisfazer as necessidades locais. Dessa forma, a água subterrânea emerge como uma alternativa crítica para o abastecimento, desempenhando um papel essencial na segurança hídrica.

A exploração intensiva de aquíferos é uma prática frequentemente adotada para suprir a falta de água superficial, mas traz consigo sérias preocupações ambientais e sociais. A superexploração pode levar à degradação da qualidade da água, ao rebaixamento dos níveis dos aquíferos e à contaminação dos recursos hídricos, fenômenos que comumente ocorrem em áreas de intensa atividade minerária e industrial. Essas práticas têm sido historicamente associadas a conflitos pelo uso da água em diversas comunidades ao redor do mundo, resultando em impactos diretos sobre a qualidade de vida das populações afetadas. Casos emblemáticos de conflitos hídricos foram registrados na Austrália (Hancock, 1982), na China (Sun et al., 2012), na África do Sul (Adler et al., 2007), em Gana (Singh et al., 2007) e em diversos países da América Latina (Helwege, 2015). No Brasil, os conflitos relacionados ao uso da água têm sido especialmente associados ao avanço das commodities (Miguel, 2023; Aguiar, 2021; Araújo, 2021; Marent et al., 2011), refletindo a pressão cada vez maior sobre os recursos hídricos devido à crescente demanda por exploração mineral.

No contexto brasileiro, destaca-se o Quadrilátero Ferrífero (QF), uma região de grande relevância econômica, histórica e ambiental, situada na porção centro-sul de Minas Gerais e caracterizada por suas ricas reservas de ouro e ferro. A exploração mineral nesta região teve início no século XX e, desde então, contribui significativamente para o desenvolvimento econômico do Brasil. Entretanto, essa atividade intensiva tem gerado consequências socioambientais consideráveis, evidenciadas por conflitos pelo uso dos recursos hídricos. Dados históricos mostram que, nos anos 1970, o Brasil exportava cerca de 1,5 milhão de toneladas de minério de ferro por ano; esse volume aumentou para 160 milhões de toneladas anuais nos anos 2000, impulsionado pela privatização de estatais e pela crescente demanda internacional (Castro, 2015). Com o aumento da produção mineral, as necessidades operacionais das minas, como o aprofundamento de cavas, têm demandado volumes significativos de água, resultando em intervenções substanciais nos recursos hídricos superficiais e subterrâneos do Quadrilátero Ferrífero.

Dentro desse cenário, o Sinclinal Moeda, localizado na porção oeste do QF, destaca-se por sua relevância hidrogeológica, especialmente em relação ao Aquífero Cauê. Esse aquífero é uma fonte vital de abastecimento de água para a cidade de Belo Horizonte, sua região metropolitana e os condomínios adjacentes. No entanto, o aquífero tem sido impactado pelo rebaixamento do nível d'água, causado principalmente pelas atividades minerárias (Gonçalves et al., 2022; Mourão, 2007). Esse impacto reforça a preocupação com a preservação e a sustentabilidade do aquífero, especialmente devido ao seu papel crucial no abastecimento de água regional. Estudos recentes têm se concentrado na análise das dinâmicas hidrogeológicas do Aquífero Cauê e nos efeitos das atividades extrativas sobre sua resiliência (Borelli, 2023; Cenni, 2022). Além disso, a abundância hídrica da região do Sinclinal Moeda tem atraído empreendimentos industriais, que aumentam a pressão sobre os recursos hídricos locais, dificultando ainda mais a gestão sustentável desse território.

Essas pressões comprometem a disponibilidade de água na Serra da Moeda, situada no flanco oeste do Sinclinal Moeda (Palha, 2021), onde, historicamente, vêm ocorrendo conflitos pelo uso da água (Mourão, 2007). O cenário se agrava diante do aumento da frequência de eventos de seca, o que torna evidente a vulnerabilidade da região tanto às mudanças climáticas quanto à má gestão dos recursos hídricos. Este estudo propõe, por meio da compartimentação aquífera da Serra da Moeda, o desenvolvimento de um modelo hidrogeológico conceitual para o flanco oeste do Sinclinal Moeda. O objetivo é avaliar as dinâmicas hidrogeológicas dessa unidade aquífera entre setembro de 1999, um marco no aumento da produção de minério de ferro, e setembro de 2019, projetando os impactos de longo prazo da exploração mineral e da utilização dos recursos hídricos subterrâneos.

Com isso, o estudo busca verificar se a exploração da água subterrânea no Quadrilátero Ferrífero, particularmente no flanco oeste do Sinclinal Moeda, impulsionada pelas atividades minerárias, pode vir a comprometer as reservas permanentes do Aquífero Cauê. Essa hipótese será investigada por meio da análise das dinâmicas hidrogeológicas e dos impactos das atividades extrativas sobre a resiliência do aquífero, com o objetivo de identificar se a exploração em curso compromete a capacidade do recurso de atender às necessidades das gerações atuais e futuras.

Diante dessa realidade, a discussão sobre o papel estratégico da água subterrânea torna-se crucial em um cenário global em que o acesso a fontes confiáveis de água constitui uma questão de segurança nacional e econômica. A água subterrânea é amplamente considerada uma solução viável para mitigar a escassez hídrica; no entanto, é essencial avaliar as implicações da sua exploração, especialmente em áreas de intensa atividade mineradora. A gestão inadequada desses recursos pode resultar em um ciclo vicioso de degradação ambiental e conflitos sociais, destacando a necessidade de uma abordagem integrada e sustentável para a governança hídrica.

Assim, o presente artigo propõe-se a analisar a importância da água subterrânea como recurso estratégico e os desafios de sua exploração em regiões mineradoras, com foco na gestão hídrica no Quadrilátero Ferrífero e na Serra da Moeda. Serão discutidas alternativas para a governança sustentável desses recursos, enfatizando a urgência de políticas públicas eficazes que promovam a conservação e o uso

responsável da água subterrânea, em alinhamento com as necessidades sociais e ambientais da região.

Material e métodos

Localização e Caracterização dos Aspectos Físicos

A área de estudo está localizada na porção centro-sul de Minas Gerais, Brasil (Figura 1), e abrange aproximadamente 470 km², com orientação predominante norte-sul, seguindo a morfologia da Serra da Moeda. Seus limites são o Homoclinal Serra do Curral ao norte, o Complexo Metamórfico de Bonfim a oeste, o Sinclinal Dom Bosco ao sul e a zona de charneira do Sinclinal Moeda a leste. A área situa-se ao sul de Belo Horizonte e intercede os municípios de Brumadinho, Belo Vale, Congonhas, Itabirito, Jeceaba, Moeda, Nova Lima e Ouro Preto. Inclui onze empreendimentos minerários, dois condomínios residenciais e uma indústria, todos com alta demanda hídrica.

O Quadrilátero Ferrífero (QF) é uma província metalogenética de importância global, cuja história de estudo e exploração remonta ao desenvolvimento das geociências. Litoestratigraficamente, o QF é dividido em cinco macro-unidades (Alkmim & Marshak, 1998):

- i) embasamento cristalino arqueano, composto por rochas gnáissicas;
- ii) Supergrupo Rio das Velhas, com sequência metavulcanossedimentar do tipo greenstone-belt;
- iii) Supergrupo Minas, formado por rochas metassedimentares paleoproterozoicas;
- iv) rochas intrusivas pós-Minas; e,
- v) Grupo Itacolomi, composto por rochas metassedimentares proterozóicas. Sobreposto por depósitos terciários e quaternários.

A estrutura regional do QF resulta da sobreposição de dois eventos deformacionais: a Orogênese Transamazônica (2.1 – 2.0 Ga) e a Orogênese Pan-Africana/Brasiliana (0.8 – 0.6 Ga) (Chemale Jr. et al., 1994). Esses eventos geraram megadobras sinformes e antiformes, além de falhas de empurrão com orientação predominante N-S e vergência para oeste (Endo et al., 2019). Entre as principais estruturas geotectônicas da região estão o Sinclinal Gandarela, Homoclinal Serra do Curral, Sinclinal Mariana, Sinclinal Vargem do Lima e o Sinclinal Moeda.

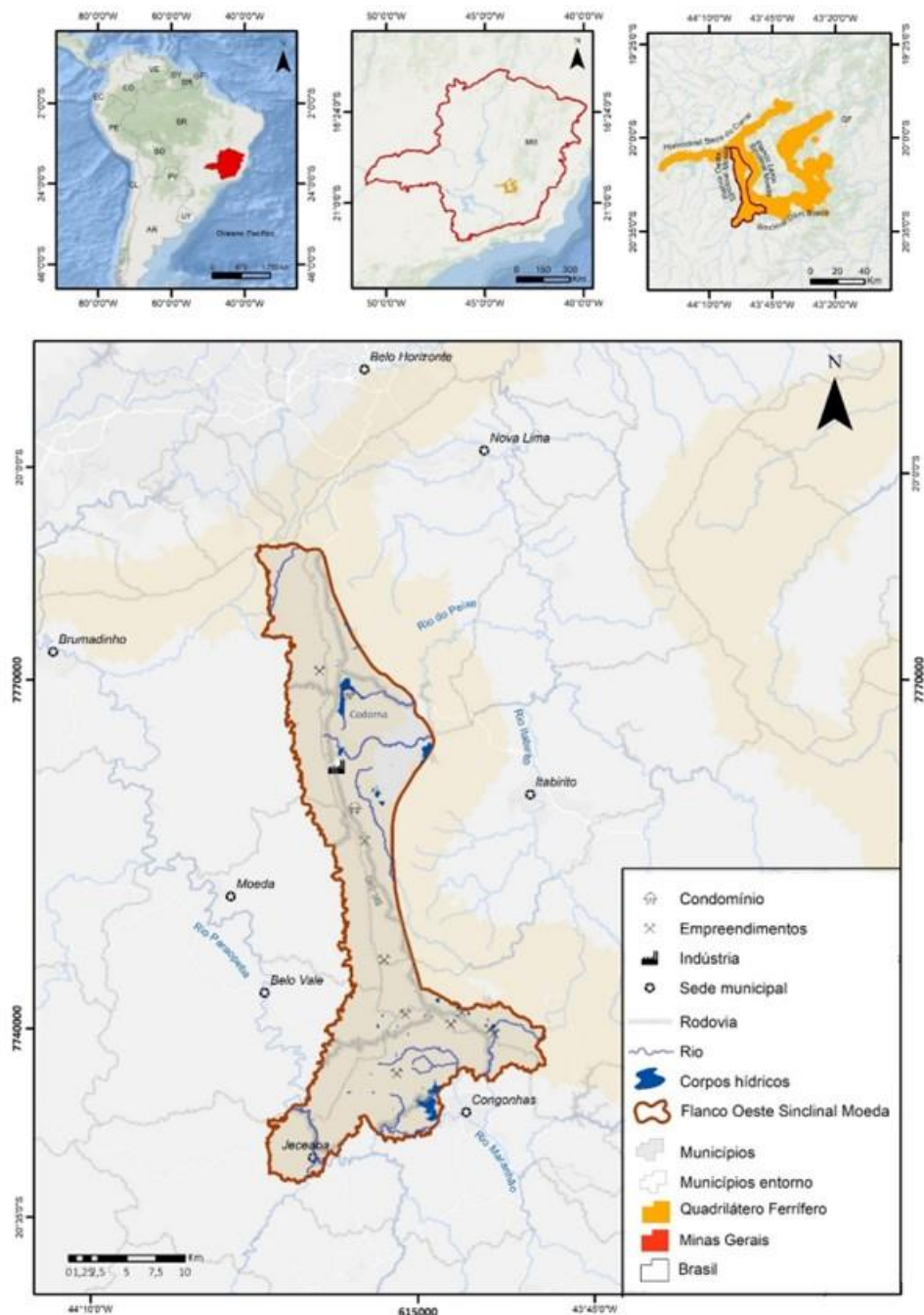


Figura 1. A área de estudo está localizada na porção centro-sul da América do Sul, no estado de Minas Gerais, Brasil.

Se insere na porção oeste da província minerária do Quadrilátero Ferrífero, e engloba parcialmente oito municípios brasileiros. Indicam-se as localidades dos quatorze empreendimentos que fazem uso direto do recurso hídrico superficial e subterrâneo.

No flanco oeste do Sinclinal Moeda, as rochas do Supergrupo Minas estão em contato com o Complexo Metamórfico Bonfim por meio da Zona de Cisalhamento Moeda-Bonfim, de natureza dúctil-rúptil (Silva, 2001; Endo & Nalini, 1992;

Hippertt et al., 1992). Já o flanco leste registra variações de mergulho na foliação, com um espesso pacote do Supergrupo Rio das Velhas separando o embasamento cristalino das rochas metassedimentares do Supergrupo Minas. A deformação predominante neste flanco é compressiva, com polaridade tectônica de ESE para WNW (Silva, 2001).

A área de estudo situa-se em uma superfície suspensa, o Platô do Sinclinal Moeda, cujas elevações variam de 1500 a 1600 metros nas abas externas, compostas por quartzitos da

Formação Moeda. A área central é ocupada por xistos e filitos do Grupo Piracicaba, com as formações Cercadinho, Fecho do Funil e Barreiro (Dorr, 1969; Pomerene, 1958; Simmons, 1968).

O clima é tropical semiúmido, classificado como Cwa (Köppen, 1948), com verões chuvosos e invernos secos. A precipitação média anual é de 1475 mm, com temperaturas médias de 18,8°C (Cruz et al., 2022; Agência Nacional das Águas, 2021).

A área abriga sistemas hídricos que incluem várias nascentes, como o ribeirão Casa Branca e córregos que abastecem os municípios de Brumadinho, Moeda e Belo Vale. O fluxo de água subterrânea ocorre principalmente no Aquífero Cauê, associado às formações ferríferas, com fluxos paralelos e transversais devido à presença de fraturas (Mourão, 2007). As litologias presentes incluem aquíferos quartzíticos, itabiríticos e carbonáticos (Beato et al., 2006).

Visando caracterizar hidrogeologicamente e de maneira regional o flanco oeste do Sinclinal Moeda foram definidas as unidades aquíferas, estabelecidos os limites hidrogeológicos na área de estudo, foram calculados os parâmetros hidrodinâmicos, estimado o balanço hídrico e elaborado o mapa potenciométrico que apresenta o fluxo subterrâneo referente a setembro de 2019.

Unidades aquíferas

Visando o entendimento da relação litoestrutural e estratigráfica do flanco oeste do Sinclinal Moeda, elaborou-se perfis geológicos regionais de modo a estabelecer a relação estrutural entre as camadas em profundidade. Para a elaboração dos perfis utilizou-se o mapa geológico vetorial do Quadrilátero Ferrífero em escala 1:150.000 (Endo et al., 2019). Nessa etapa, também se consolidou os dados bibliográficos das espessuras das camadas. Ademais, esses perfis auxiliaram no entendimento da dinâmica hídrica superficial e subterrânea e na delimitação dos limites hidrogeológicos para estabelecimento do fluxo. Mediante à definição das unidades aquíferas, os perfis geológicos foram transformados em hidrogeológicos.

O compilado de pontos d'água - piezômetros, surgências e poços tubulares - na área de estudo foram obtidos a partir dos processos de outorga de direito de uso de recursos hídricos, disponibilizados pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), pela plataforma do Sistema de

Gestão Ambiental (SIAM), por meio da consulta online. Foram priorizados minerações, indústrias e condomínios que possuem uso não-insignificante e que possuem uma série histórica de monitoramento, por atuar desde 1999 na Serra da Moeda, fazendo uso dos recursos hídricos. Além disso, os dados de vazão outorgada da água subterrânea foram posteriormente complementados pelo IGAM. Os dados dos perfis geológicos dos poços levantados também foram considerados na consolidação dos perfis hidrogeológicos citados anteriormente.

Além da distribuição espacial dos pontos d'água levantados, 75 testes de bombeamento foram utilizados para cálculo da capacidade específica/produtividade dos poços tubulares auxiliando na caracterização das unidades aquíferas definidas.

Para definição da unidade aquífera, utiliza-se o conceito proposto por Miller (1999) no Atlas de Águas Subterrâneas dos Estados Unidos, de modo que “unidade aquífera” é o termo referente à unidade geológica, um grupo de formações geológicas ou uma parcela da formação suficientemente permeável, que permite a produção significativa de água por poços ou nascentes.

Limites hidrogeológicos

Com o objetivo de se entender e caracterizar o fluxo hidrodinâmico do flanco oeste do Sinclinal Moeda utilizou-se das definições das unidades aquíferas e não aquíferas da área de estudo, além da capacidade específica calculada dos poços levantados durante a etapa anterior. Essas informações auxiliaram na definição das condições de contorno.

As condições de contorno são equações matemáticas, que em hidrogeologia permite identificar e estabelecer as relações existentes entre as cargas hidráulicas e o fluxo d'água subterrâneo. Matematicamente, três condições de contorno são estabelecidas, sendo do tipo 1: carga hidráulica especificada (Condição de Dirichlet), do tipo 2: fluxo especificado (Condição de Neumann), e do tipo 3: fluxo dependendo da carga (Condições de Robin e Cauchy).

Hidrogeologicamente, as condições do tipo 1 estão vinculadas às situações em que a carga hidráulica do contorno é constante, ou seja, um lago ou um rio, que pode variar em função do tempo e do espaço.

As condições do tipo 2 são locais onde o fluxo é igual a zero, simulando zonas impermeáveis (rochas e/ou estruturas impermeáveis) ou fluxo nulo para divisores de água subterrânea.

As condições do tipo 3 estão associadas a uma combinação dos dois tipos anteriores, de forma que o fluxo é calculado com base na diferença entre a carga hidráulica especificada e a carga hidráulica calculada (Anderson & Woessner, 1992).

Parâmetros Hidrodinâmicos

Testes de bombeamento de poços também foram extraídos para cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos, como condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento e transmissividade, com auxílio do software Aquifertest da Waterloo Hydrogeologic®, e complementados com parâmetros hidrodinâmicos de pesquisas científicas realizadas na área de estudo para análise comparativa e suplementar.

Os parâmetros hidráulicos foram obtidos por três métodos, Hvorsley (1951) e Theis (1935) – para obtenção da condutividade hidráulica (K) e Cooper-Bredehoeft-Papadopulos (1967) – para obtenção dos coeficientes de transmissividade (T) e de armazenamento (S). Os valores de condutividade para o método de Cooper-Bredehoeft-Papadopulos (1967), assim como para os métodos de Hvorsley (1951) e Theis (1935), foram obtidos pela relação da condutividade e transmissividade com a espessura do aquífero: $T = K \times b$. Devido a heterogeneidade dos aquíferos foi utilizado o intervalo como valor representativo dos parâmetros hidrodinâmicos.

Balanço Hídrico

Para obtenção adequada da pluviometria, utilizou-se os dados provenientes da seleção de oito estações de monitoramento hidrometeorológico que abrangiam de setembro de 1999 a setembro de 2019, e por meio do método de polígonos de Thiessen obteve-se a média pluviométrica (mm/ano) em cada domínio. Em termos gerais as estações 2043043, 2043002, 2043013, 2044007 foram responsáveis por atribuir os principais domínios que abrangem a área de estudo. Cabe mencionar que o ano hidrológico se inicia no mês de outubro. Os dados hidrometeorológicos foram disponibilizados pela plataforma Hidroweb da ANA (Agência Nacional das Águas).

Dentre os 153 vertedouros levantados, 17 foram selecionados para cálculo da descarga superficial por abrangerem maior série temporal, por encontrarem-se distribuídos nas porções norte, central e sul da área de estudo, e são responsáveis por caracterizar unicamente o aquífero ao qual o vertedouro se insere. Mediante aos dados de série histórica realizou-se a separação de hidrograma e calculou-se o escoamento de base e o escoamento superficial.

Para essa etapa utilizou-se o método proposto por VU Smakhtin (1997). O autor baseia-se nos dados mensais de vazão de vertedouros, e, associando ao fenômeno ondulatório, diferencia o fluxo como ondas de baixa frequência (fluxo de base) e em ondas de alta frequência (fluxo superficial). Dessa forma, por meio do parâmetro recursivo de filtro digital diferencia-se ambos os fenômenos no hidrograma. Também, é necessário acrescentar um valor inicial que pode ser atribuído ao fluxo de base – correspondente ao filtro de baixa frequência. Nessa premissa, o parâmetro recursivo de filtro digital, aplicado à área de estudo, deverá ser superior a 0.925% já que os dados de pluviometria anual médio na área do Sinclinal Moeda equivale a 1475 mm/ano. O resultado obtido, da separação de hidrograma, é analisado conforme a pluviometria do domínio e a área da bacia de contribuição, de forma a se obter a taxa efetiva do percentual de recarga anual de cada unidade aquífera, a partir da vazão que corresponde ao escoamento de base.

A área da bacia correspondente a unidade hidrogeológica foi traçada manualmente a partir da localização do vertedouro no mapa hidrogeológico, com auxílio do modelo digital de terreno advindo da imagem Alos Palsar 12,5 x 12,5 m (2011) extraído do ASF (Alaska Satellite Facility) e da hidrografia correspondente (Figura 2).

Com os dados anuais obtidos da taxa da recarga aplicou-se a média como valor representativo da recarga nas unidades aquíferas e não aquíferas. Ademais, também foram avaliados os impactos antrópicos dos empreendimentos às unidades aquíferas. Para isso, foram levantados os dados de vazão outorgada dos poços de bombeamento, a partir de setembro de 1999, instalados nos empreendimentos. Com os dados de taxa de recarga, área e espessura estimada do aquífero, calcula-se a vazão da reserva renovável do Cauê e das unidades aquíferas (Custódio & Llamas, 1983). Ao subtrair a vazão bombeada da vazão da reserva renovável se obtém o excedente ou déficit hídrico.

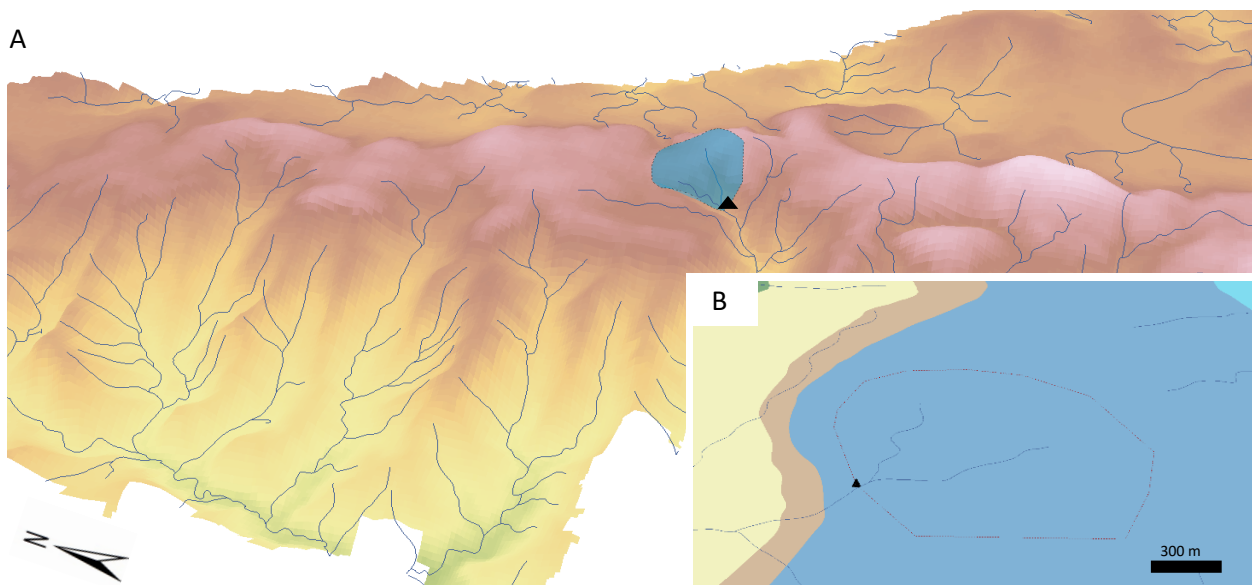


Figura 2. A) Representação esquemática para delimitação da microbacia a partir do modelo digital de terreno, localização do vertedouro (triângulo) no traçado da drenagem. Exagero vertical de 3 vezes. B) Posicionamento do vertedouro na unidade aquífera Cauê, no mapa hidrogeológico.

Fluxo subterrâneo

A definição do fluxo subterrâneo baseou-se nos níveis piezométricos. Esses dados provêm de uma rede de monitoramento de 82 poços e piezômetros que consolidam uma série histórica que abrange os anos de 1999 a 2019. Dessa forma, visando o entendimento do comportamento do fluxo em escala regional ao longo desses vinte anos, elaborou-se gráficos de carga hidráulica pelo tempo dos poços e piezômetros, por compartimento, de forma a visualizar temporalmente o comportamento do aquífero.

A partir dos dados mais recentes do nível d'água associados com as drenagens e nascentes elaborou-se o mapa potenciométrico – com auxílio do software Arcgis® 10.8. As curvas definem a superfície potenciométrica e a direção do fluxo é representada por setas. As linhas equipotenciais foram diferenciadas em definidas – próximos de locais que possuíam piezômetros para monitoramento – e inferidas – na ausência desses dados e interpretados.

Com auxílio do software da Bentley® 2022.1 apresentou-se as superfícies saturada e insaturada, evidenciando o rebaixamento tridimensional do nível d'água nos compartimentos definidos.

Resultados e discussão

Definições das unidades aquíferas

Conforme dados geológicos citados anteriormente, em uma análise regional, doze perfis geológicos foram elaborados na área de estudo, acompanhando o mergulho predominantemente E-W e NE-SW das camadas (Figura 3).

É possível se observar que na porção setentrional do flanco oeste do Sinclinal Moeda, afloram as respectivas unidades litoestratigráficas: Complexo Bação, Grupo Nova Lima, Grupo Quebra Osso, Formação Moeda, Formação Batatal, Formação Cauê, Formação Gandarela, e alguns litotipos do Grupo Piracicaba. As camadas, em termos gerais, possuem mergulhos que variam entre 65 e 52°. Na região central o mergulho varia entre 75 e 60°. À medida que se desloca para sul se observa que as camadas mergulham predominantemente 55 a 45°, e que além dos litotipos anteriormente descritas, afloram a Formação Itacolomi e as Suítes Alto Maranhão, Catas Altas da Noruega e Santa Rita, e de maneira mais expressiva o Grupo Sabará. É importante ressaltar que a Formação Batatal ocorre de maneira descontínua com orientação N-S ao longo de toda área de estudo.

As espessuras médias das camadas que sobrepõe o Complexo Bação variam ao longo de todo Sinclinal. No contato entre o Complexo

Bonfim/Grupo Nova Lima e a Formação Moeda à oeste se registra toda a zona de falha de cisalhamento normal Bonfim-Moeda, descrita na bibliografia. Nos perfis geológicos dos poços levantados, se observa que a Formação Cauê, na porção setentrional, possui profundidade mínima de 225 m, enquanto na porção sul, próximo do Sinclinal Dom Bosco, sua profundidade alcança 360 m. Dessa forma, visando representar as unidades hidrogeológicas definiu-se, pelos perfis elaborados, uma profundidade média de 1000 m. Essa profundidade é três vezes superior ao mais profundos dos poços, onde espera-se que o bombeamento – caso haja, não interfira nos aquíferos mais profundos. A partir de 1000 m, a profundidade das camadas é inferida, alcançando 3000 m, e interpretativa, de modo a dar continuidade lateral às camadas. Pelos perfis elaborados a espessura da Formação Cauê variou de 300 m a 600 m na porção norte e, à medida que se desloca para sul da área, a espessura dessa unidade varia dentre 100 m a 1000 m.

A partir da distribuição espacial dos pontos d'água levantados juntamente com a definição de Miller (1999), associados com as interpretações geológicas-geoestruturais, levantamento bibliográfico e os dados de capacidade específica calculados dos poços outorgados foi-se possível definir cinco unidades aquíferas e cinco unidades não aquíferas aflorantes no flanco oeste do Sinclinal Moeda. Das unidades aquíferas, têm-se o Aquífero Moeda, o Aquífero Cauê, o Aquífero Gandarela, o Aquífero Itacolomi e o Aquífero das Coberturas. Das unidades não aquíferas, cita-se os aquícludes Sabará, Piracicaba, Supergrupo Rio das Velhas e os aquíquitos Batatal e do Complexo Bação. Ressalta-se que, devido ao caráter regional desse estudo, as Suítes intrusivas Alto Maranhão, Catas Altas da Noruega e Santa Rita – de pequena espessura, não foram representadas na escala das seções hidroestratigráficas (Figura 4).

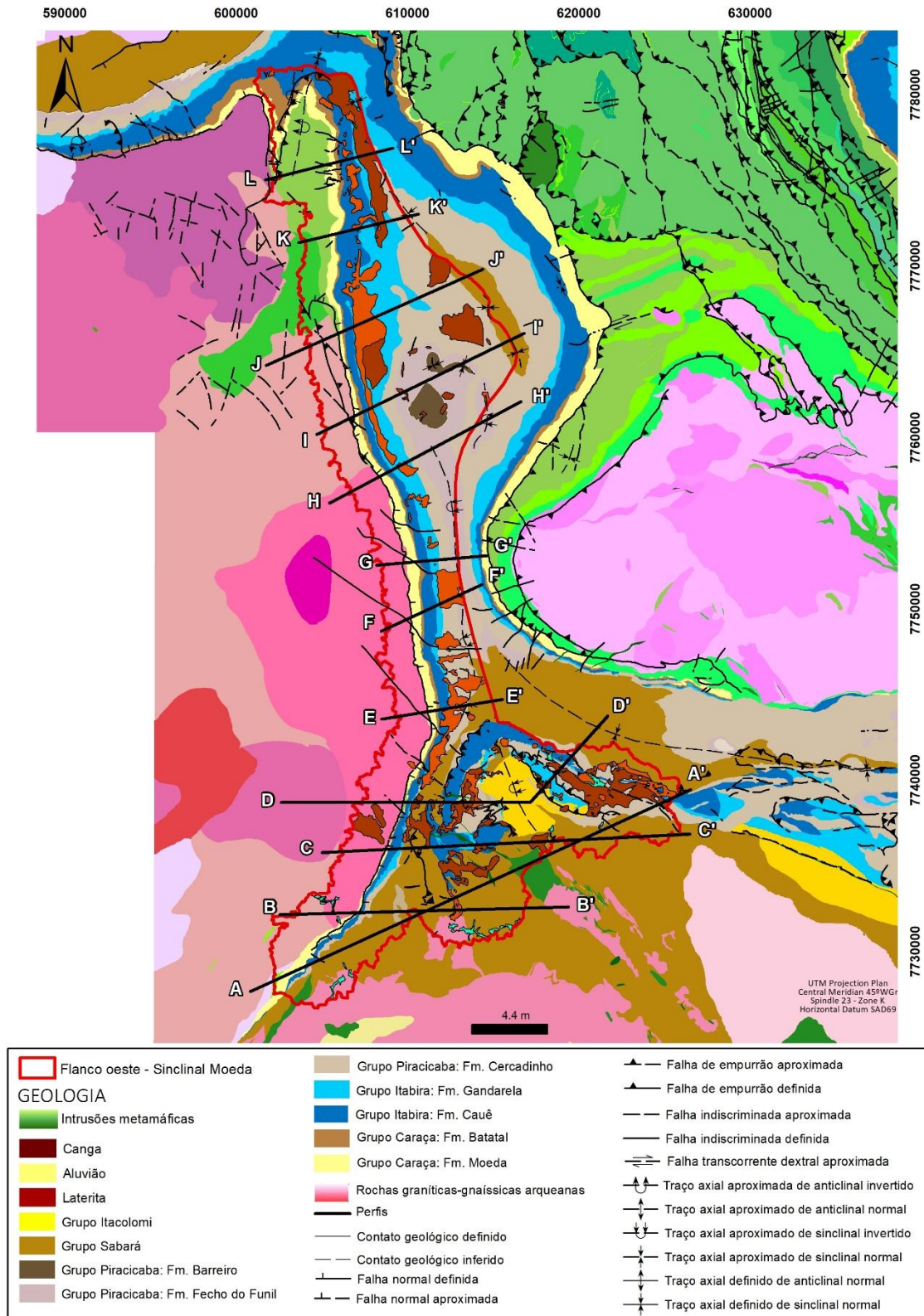


Figura 3. Mapa geológico (Endo et al., 2019) modificado com a representação do flanco oeste do Sinclinal Moeda, com as indicações dos perfis litoestratigráficos acompanhando o mergulho das camadas.

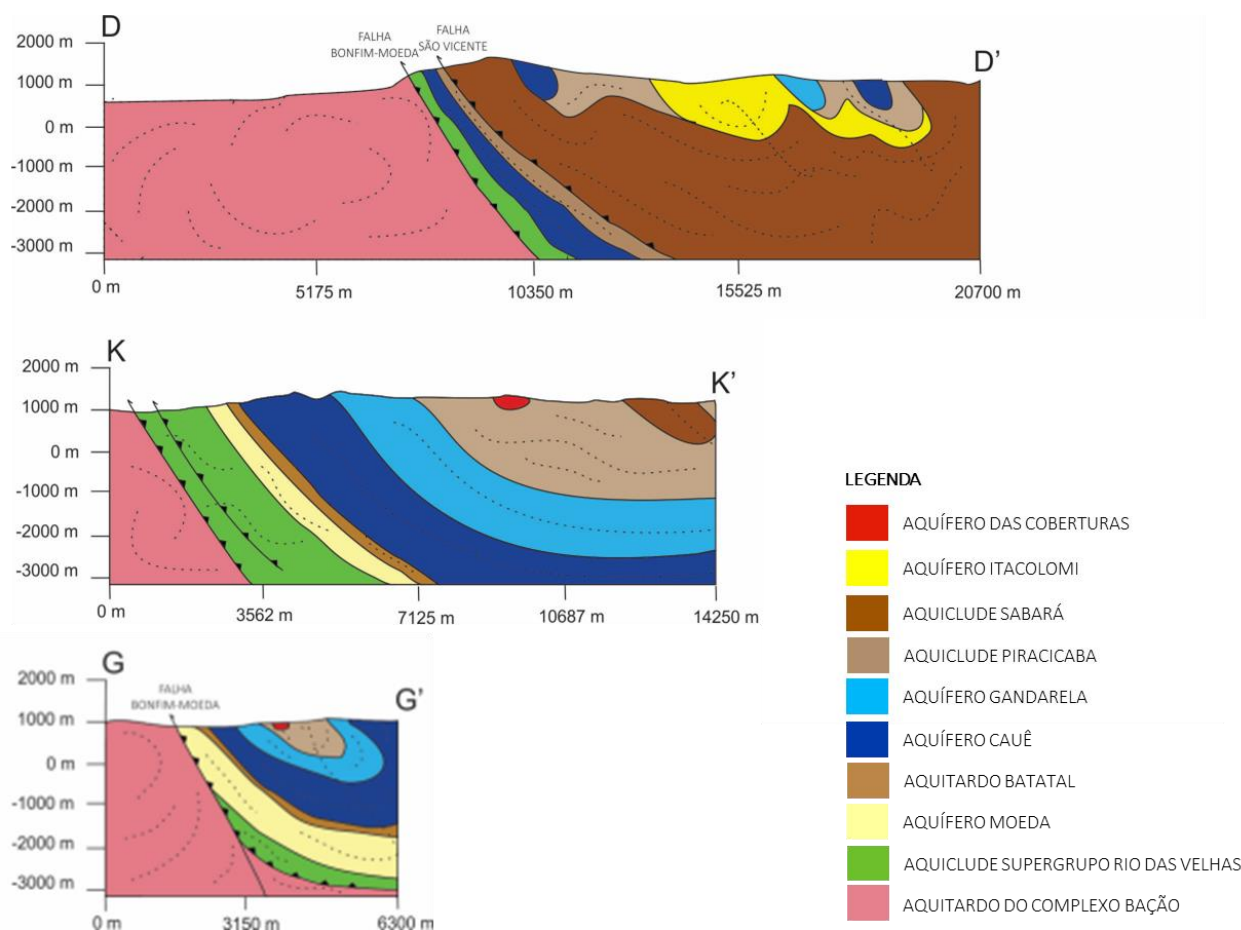


Figura 4. Perfis hidrogeológicos apresentando as unidades aquíferas e não aquíferas. Exagero vertical de 3 vezes. Seção K-K' – porção setentrional: Nota-se o confinamento local das unidades aquíferas Moeda e Gandarela, pelo aquitardo Batatal e aquícluede Piracicaba, respectivamente. Seção G-G' – porção central – apresenta o plano axial do Sinclinal Moeda, e o confinamento local das unidades aquíferas Moeda e Gandarela pelo aquitardo Batatal e aquícluede Piracicaba. Seção D-D' – porção sul: apresenta o Aquífero Cauê localmente confinado pelo aquícluede Piracicaba, e o Aquífero Itacolomi confinado localmente pelo aquícluede Piracicaba.

As associações litoestratigráficas com as unidades hidrogeológicas, tipos de aquíferos, distribuição quantitativa dos poços/piezômetros,

com os dados de capacidade específica são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Unidades litoestratigráficas correlacionado com as suas respectivas unidades aquíferas, dados de capacidade específica e a quantidade dos poços/piezômetros utilizados para caracterização

Unidades litoestratigráficas	Litotipos	Unidades hidrogeológicas	Caracterização	Quantidade de poços/piezômetros	Intervalo capacidade específica (m³/h/m)
Coberturas cenozóicas	Aluvião; canga	Aquífero das Coberturas	Livre; poroso; heterogêneo e anisotrópico	77	-
Grupo Itacolomi	Quartzitos e filitos	Aquífero Itacolomi	Livre; poroso/fissural; heterogêneo e anisotrópico	0	-
Grupo Sabará	Pelitos e grauvas	Aquiclude Sabará	Fissural; heterogêneo e anisotrópico	12	0.3 (Beato et al., 2005)
Grupo Piracicaba	Quartzitos, xistos, filitos, filitos dolomíticos	Aquiclude Piracicaba	Fissural; heterogêneo e anisotrópico	46	0.04 (Beato et al., 2005)
Formação Gandarela	Calcários e dolomitos	Aquífero Gandarela	Livre/confinado; fissural-cárstico; heterogêneo e anisotrópico	80	2.8 (Mourão, 2007)
Formação Cauê	Formação ferrífera bandada	Aquífero Cauê	Livre/confinado; poroso/fissural; heterogêneo e anisotrópico	315	0.41 – 11.48 (Autor, 2023)
Formação Batatal	Filitos	Aquitardo Batatal	Fissural; homogêneo e anisotrópico	15	-
Formação Moeda	Quartzitos e conglomerados	Aquífero Moeda	Livre/confinado; poroso/fissural; heterogêneo e anisotrópico	1	-
Supergrupo Rio das Velhas: Grupo Nova Lima, Quebra Osso e Intrusões metamáficas	Xistos metavulcânicos	Aquiclude Supergrupo Rio das Velhas	Fissural; heterogêneo e anisotrópico	2	0.23 – 0.58 (Autor, 2023)
Complexo Bação	Rochas graníticas gnáissicas	Aquitardo do Complexo Bação	Fissural; heterogêneo e anisotrópico	0	-

Além da definição das unidades aquíferas, a partir da distribuição espacial dos dados levantados, foi possível compartimentar a área de estudo em três setores: porção norte, porção central e porção sul. Também foi possível compartimentar verticalmente as rochas a partir de 500 m, devido ao comportamento livre/confinado das rochas e da alteração da permeabilidade dos aquíferos em profundidade.

O aquífero do Complexo Bação possui caráter fissural e anisotrópico, cujo manto de intemperismo contribui para a recarga das fraturas na rocha sã. É formado pelas rochas graníticas-gnáissicas do Complexo Bação, de baixo potencial hidrogeológico e que consolida o embasamento da região. Os aquíferos Supergrupo Rio das Velhas, Piracicaba e Sabará, que se caracterizam, predominantemente, como xistos metassedimentares e metavulcânicos (constituente do Supergrupo Rio das Velhas), além de quartzitos, metassiltitos e filitos (Grupo Piracicaba e Sabará), possuem porosidade fissural, são heterogêneos, de caráter anisotrópico, com poços pouco produtivos (0.04 a 0.58 m³/h/m). O aquífero Supergrupo Rio das Velhas aflora localmente na região sul, com espessura aproximada de 200 m, e de maneira mais expressiva à norte, com espessura de 1500 m. As unidades hidrogeológicas Piracicaba e Sabará, possuem aproximadamente 2000 m e 3000 m de espessura, respectivamente. Quanto ao aquífero Batatal que se caracteriza por filitos homogêneos, se observa que 2,7% dos poços e piezômetros levantados se inserem nessa unidade. Contudo, apesar de possuir boa capacidade de armazenar água, os filitos são incapazes de transmiti-la. Essa unidade pode atuar como confinante do Aquífero Moeda no flanco oeste do Sinclinal, contudo essa unidade é pouco espessa, cerca de 100 m, e ocorre de maneira descontínua ao longo da linearidade N-S.

O Aquífero Moeda, cuja ocorrência está localizada na borda oeste do flanco e na crista da Serra da Moeda, também possui espessura variável ao longo da estrutura, variando de 1000 m na porção norte, para 200 m na porção central e 500 m na porção sul. Caracteriza-se predominantemente por quartzitos e conglomerados, tornando-o um aquífero heterogêneo e anisotrópico. Tem caráter poroso/fissural, e encontra-se ora semiconfinado pelo aquífero Batatal e ora livre. Apesar da ausência de dados hidrogeológicos provenientes de poços tubulares – justificado pela ocorrência local da Formação Moeda no topo da Serra Moeda e por ser Patrimônio Cultural Brasileiro – valores de

vazão de nascentes (Mourão 2007) evidenciaram descargas próximas de 18 m³/h.

O Aquífero Cauê, conforme notificado anteriormente possui uma riqueza hidrológica notável, o que é respaldado pelo grande número de poços produtivos nessa unidade em comparação as demais – abrange 58% da distribuição dos poços (Tabela 1). Esse aquífero é caracterizado por formações ferríferas bandadas, possui porosidade granular a fissural, e devido as variações litológicas e complexidade estrutural revela-se como um aquífero heterogêneo e anisotrópico (Mourão 2007). Aflorante nas porções norte, central e sul, encontra-se normalmente livre, mas pode adquirir caráter confinado quando sobreposto pelo aquífero Piracicaba na porção sul da área de estudo. É nesse cenário que se observa as maiores produtividades obtidas pelos poços tubulares.

O Aquífero Gandarela é caracterizado por rochas carbonáticas – calcários e dolomitos – do tipo fissural-cárstico, heterogêneo e anisotrópico. Abrange 14,6% dos poços e piezômetros levantados e possui capacidade específica com valores de 2,8 m³/h/m (Mourão 2007). Esse aquífero aflora em praticamente em toda a área de estudo e, por vezes, se caracteriza como livre e, por vezes, como confinado, quando sotoposto pelo aquífero Piracicaba ou Sabará. Assim como as outras unidades na região, a espessura do Aquífero Gandarela é variável. À norte possui aproximadamente 750 m, dobrando de espessura na região do eixo do sinclinal, e tornando-se menos espesso à sul.

Assim como o Aquífero Moeda, o Aquífero Itacolomi desenvolve-se nos quartzitos intercalados com filitos de aspecto heterogêneo e anisotrópico. Os poços exibem capacidade específica de até 5 m³/h/m, mas seu potencial é pouco conhecido (Mourão 2007). O aquífero é predominantemente livre, de aspecto heterogêneo e anisotrópico. Aflora localmente na porção sul da área de estudo.

Os aquíferos das Coberturas se caracterizam como livres, descontínuos, heterogêneos e anisotrópicos. Estão relacionados aos depósitos sedimentares aluviais e lacustrinos, além das coberturas detrito-lateríticas. Esses aquíferos possuem boa capacidade de armazenamento e são zonas preferenciais de recarga. Àqueles vinculados às formações ferríferas apresentam altos valores de condutividade hidráulica (Mourão 2007). 77 poços

situam-se sobre os aquíferos de Coberturas que corresponde a 14% da amostragem.

Limites hidrogeológicos

Com o objetivo de definir os limites hidrogeológicos das unidades aquíferas, a saber, da base para o topo: Aquífero Moeda, Aquífero Cauê, Aquífero Gandarela, Aquífero Itacolomi e Aquífero das Coberturas, foi feita uma análise das características hidrogeológicas e da interação entre elas com as unidades adjacentes, com auxílio das definições das condições de contorno aplicadas no âmbito da hidrogeologia.

Devido a importância do Aquífero Cauê as condições de contorno foram definidas a partir da relação hidráulica entre essa e as demais unidades aquíferas e o isolamento hidráulico entre as unidades não aquíferas. O Aquífero Cauê aflora de maneira contínua na porção oeste da área de estudo segundo a direção N-S. Na porção sul esse aquífero se desconecta hidráulicamente pelos aquícludes Sabará e Piracicaba à leste. Contudo, ainda nesse setor, a unidade aquífera Cauê volta a aflorar sobrepondo aos aquícludes, dando continuidade e integrando ao Sinclinal Dom Bosco (Figura 5).

A unidade aquífera Cauê que aflora regida pelo lineamento N-S possui conexão hidráulica à oeste com o Aquífero Moeda e à leste com o Aquífero Gandarela. Nesse cenário, cabe ressaltar que o Aquitardo Batatal apesar de estar entre os aquíferos Moeda e Cauê, não se caracteriza como uma condição de contorno em níveis regionais devido, principalmente, a ocorrência descontínua dessa unidade e pouca espessura quando comparada com os demais aquíferos. O aquitardo do Complexo e o aquíclude do Supergrupo Rio das Velhas são os limites laterais à oeste dessa unidade aquífera, e atuam como condição de contorno do tipo 2 (Condição de Neumann), ou seja, como barreira hidráulica litológica (fluxo zero) devido ao comportamento distinto de ambas as unidades em comparação com a característica hidráulica produtiva dos aquíferos Moeda, Cauê e Gandarela (Figura 5 – Condição Tipo 2A). A sul, devido a continuidade do Aquífero Moeda para além da área de estudo, desenvolve-se uma condição de contorno do tipo 3 de Robin e Cauchy (Figura 5 – Condição Tipo 3A). A norte, a unidade aquífera Cauê se estende para a porção setentrional da área de estudo, e, nessa localidade, ocorre uma condição

de contorno do tipo 3 - Condições de Robin e Cauchy (Figura 5 – Condição Tipo 3B). Há continuidade do Aquífero Cauê para além do limite definido da área de estudo, ou seja, há conexão hidráulica e litológica dessa unidade. A leste da unidade aquífera regida pelo lineamento N-S aflora o aquíclude Piracicaba, caracterizando-se como uma condição de contorno do tipo 2 - Condição de Neumann, ou seja, o contato entre essas duas unidades aquíferas opera como barreira hidráulica de fluxo zero (Figura 5 – Condição Tipo 2B). A sul, o aquíclude Piracicaba diminui expressivamente de espessura, e é sobreposto pelo aquíclude Sabará.

Conforme mencionado, a sul sobreposto aos aquícludes, aflora novamente em superfície a unidade aquífera Cauê, sendo limitado verticalmente na base e lateralmente à sul pelo aquíclude Sabará - Condição de contorno do tipo 2, que opera como barreira hidráulica simulação de fluxo zero (Figura 5 – Condição Tipo 2C). A leste, o Aquífero Cauê é sobreposto verticalmente pelo aquíclude Piracicaba e pelas unidades aquíferas Itacolomi e Gandarela – em que há conexão hidráulica. Lateralmente a unidade aquífera Cauê se estende para leste, além da área de estudo, caracterizando-se como uma condição de contorno do tipo 3 (Figura 5 – Condição Tipo 3C). A unidade aquífera Itacolomi também faz contato com o aquíclude Piracicaba lateralmente, e na base com o aquíclude Sabará, também atribuindo-se a mesma condição de contorno do tipo 2 – Condição de Neumann (Figura 5 – Condição Tipo 2C).

Cabe mencionar que o rio Paraopeba, condição de contorno do Tipo 1, intercede a porção SW da área de estudo, contudo, como o objetivo é avaliar sobre o Aquífero Cauê, e esse se estende para além do rio Paraopeba, optou-se por ir além dessa condição de contorno e delimitar a porção SW da área de estudo como condição do tipo 2 para o Aquífero Cauê e do Tipo 3 para o Aquífero Moeda (Figura 5 – Condição Tipo 3A).

Por fim, o Aquífero das Coberturas aflora ao longo de toda a área de estudo de maneira descontínua, ora sobrepondo as unidades aquíferas (estabelecendo uma localidade de conexão hidráulica), ora sobrepondo as unidades não aquíferas. Cabe mencionar que a unidade das Coberturas auxilia como meio de recarga para as unidades inferiores.

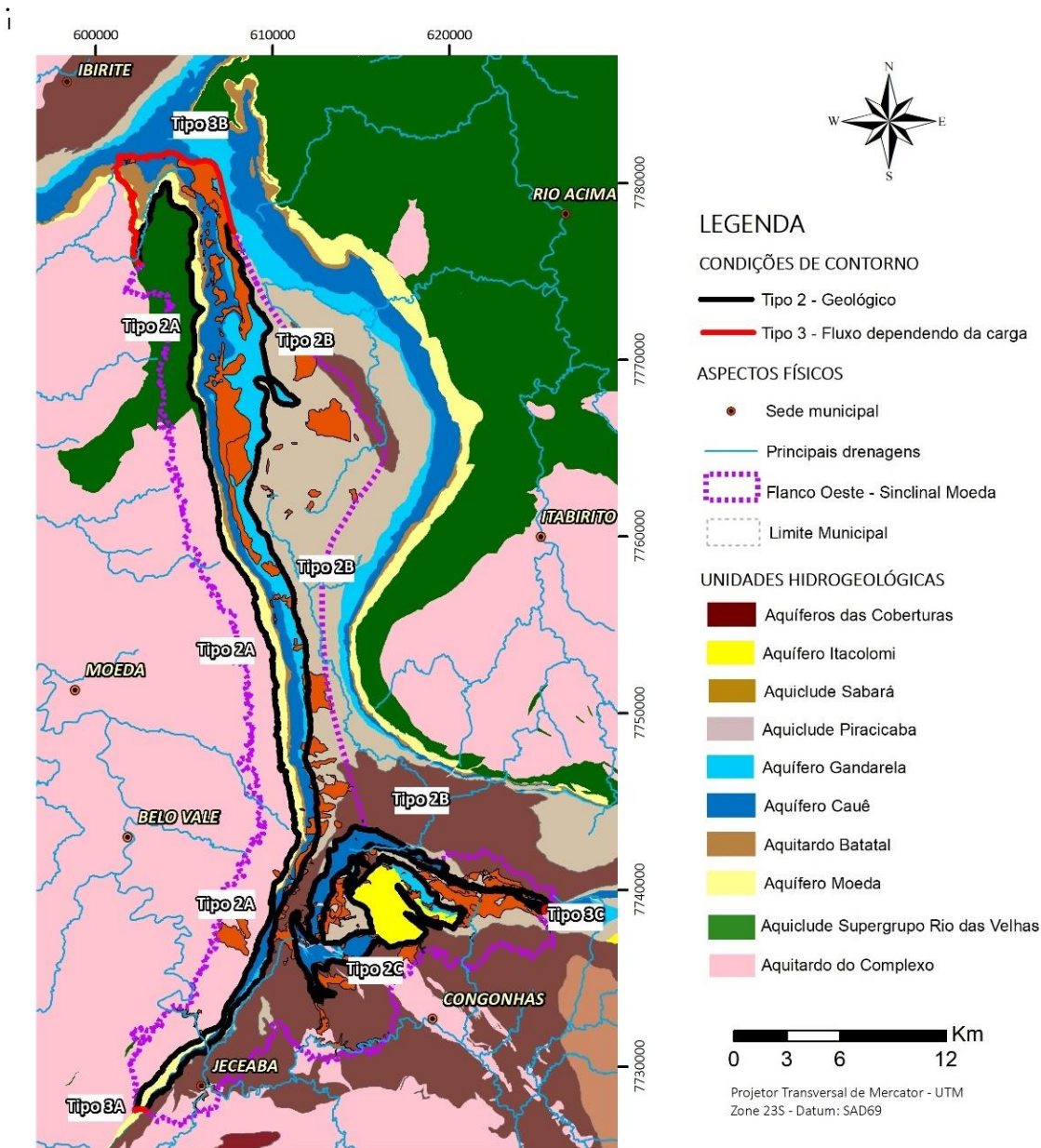


Figura 1. Condições de contorno. Condição de contorno do tipo 2A define o contato entre a unidade aquífera Moeda com as unidades não aquíferas do Complexo e do Supergrupo Rio das Velhas. Condição de contorno do tipo 2B e 2C são definidas pelo contato das unidades aquíferas Cauê, Gandarela e Itacolomi com as unidades não aquíferas Piracicaba e Sabará. Condição de contorno do tipo 3A, 3B e 3C refere-se a extensão das unidades aquíferas (Moeda, Cauê e Gandarela) para além da área de estudo.

Parâmetros hidrodinâmicos

O sistema aquífero avaliado e descrito a seguir é aquele que está contido na condição de contorno apresentado na Figura 5, baseando-se na premissa de que as intervenções no sistema externo não influenciam no sistema interno. Dentre os 66 testes de bombeamentos obtidos, 44 são de poços que se inserem na unidade aquífera Cauê e 5 na

unidade aquífera Gandarela, os demais inserem-se em unidades não aquíferas. Dessa forma, como o objetivo é caracterizar as unidades aquíferas apenas essas unidades serão apresentadas nesse item e nos seguintes.

Com auxílio do software Aquifertest, os parâmetros hidrodinâmicos obtidos foram Transmissividade ($T - m^2/s$), Condutividade

Hidráulica (K – m/s) e Coeficiente de Armazenamento (S). Os dados de unidades que não se obteve ensaios hidráulicos foram complementados com os dados secundários bibliográficos, tais quais as unidades aquíferas Moeda, Itacolomi e Coberturas.

Para o Aquífero Moeda, Bertachini (1994) atribuiu valores de transmissividade de 7×10^{-3} m²/s e Mourão (2007) identificou condutividade hidráulica de 3×10^{-9} m/s para essa unidade, caracterizando-a como um aquífero confinado. Contudo, essa unidade quando não é sobreposta pelo aquífero Batatal, se comporta como aquífero livre. Ao aquífero Batatal registra-se valores de condutividade hidráulica na ordem de 1×10^{-6} m/s a 1×10^{-8} m/s (Mourão 2007).

O Aquífero Gandarela, caracterizado por rochas carbonáticas, possui valores medianos de condutividade hidráulica de 8×10^{-8} m/s, mínimo de 4×10^{-9} m/s e máximo de 3×10^{-6} m/s. Os dados obtidos de transmissividade revelaram valores medianos de 2×10^{-6} m²/s. Os valores medianos de coeficiente de armazenamento corresponderam a 2×10^{-1} , mínimo de 8×10^{-5} e máximo de 5×10^{-1} . Esses valores obtidos revelam o caráter heterogêneo, anisotrópico e misto do aquífero, ora atuando como aquífero livre ora como confinado. Mourão (2007) encontrou valores de condutividade hidráulica de 1×10^{-7} m²/s a 9×10^{-6} m/s e de transmissividade de 1×10^{-4} m²/s para essa unidade aquífera.

O Aquífero Cauê, composto por formações ferríferas bandadas com diferentes graus de alteração, apresentou mediana de condutividade hidráulica de 1×10^{-8} m/s, com mínimo de 3×10^{-10} m/s e máximo de 2×10^{-2} m/s, ou seja, o aquífero Cauê apresenta ampla variabilidade de permeabilidade ao longo de sua ocorrência. A mediana da transmissividade correspondeu a 7×10^{-7} m²/s, mínimo de 4×10^{-9} m²/s e máximo de 3×10^{-1} m²/s. Quanto ao coeficiente de armazenamento se obteve mediana de 2×10^{-3} , mínimo de 5×10^{-13} e máximo de 9×10^{-1} . Essa variação de valores obtidos para o Aquífero Cauê respaldam o caráter heterogêneo e anisotrópico dessa unidade, bem como seu caráter misto, de aspecto poroso/fraturado e livre/confinado. É correlacionado com os dados encontrados por

Mourão (2007), Lazarim (1999), Mesquita et al., (2017) e Gonçalves et al., (2021). Os valores de transmissividade obtidos dos poços subterrâneos para o Aquífero Cauê por Beato et al., (2006) variaram de 2×10^{-5} m²/s a 2×10^{-2} m²/s, e para Mourão (2007) variou de 5×10^{-4} m²/s a 2×10^{-2} m²/s.

De acordo com Mourão (2007), embora o Aquífero Itacolomi tenha potencial hidrogeológico pouco conhecido, é possível caracterizá-lo hidroestratigraficamente como aquífero de aspecto heterogêneo e anisotrópico. Os aquíferos das Coberturas possuem boa capacidade de armazenamento, são zonas preferenciais de recarga e aqueles vinculados às formações ferríferas apresentam altos valores de condutividade hidráulicos. Possuem condutividade hidráulica na ordem de 1×10^{-6} m/s em rolados de hematita a 1×10^{-10} m/s em argilas (Lazarim 1999).

Balanço hídrico

Os polígonos de Thiessen são apresentados na Figura 6A. As estações pluviométricas foram responsáveis por definir os domínios 1, 2, 3 e 4, cuja áreas atribuídas aos domínios foram 63 km², 183 km², 200 km² e 17 km², respectivamente, e obtiveram uma média pluviométrica anual de 1644 mm/ano, 1580 mm/ano, 1336 mm/ano e 1356 mm/ano. A média ponderada pluviométrica correspondeu a 1475 mm/ano. Os domínios 1, 2 e 3 abrangem majoritariamente a área de estudo, definindo uma porção norte, uma porção central, e uma porção à sul.

Considerando que a taxa de fluxo de base é o que corresponde a infiltração em mm/ano na área da bacia, e com auxílio do polígono de Thiessen, o qual o vertedouro se insere localmente, foi calculado a pluviometria e a porcentagem da chuva referente a recarga subterrânea anual. A média aritmética referente ao percentual obtido de taxa de recarga de cada unidade aquífera é apresentada na Tabela 2. Cabe ressaltar que como foram definidos diversos vertedouros para a mesma unidade aquífera, foi-se estabelecido valores mínimos e máximos, como um intervalo para caracterizar regionalmente o sistema aquífero.

Tabela 2. Valores médios, mínimos e máximos obtidos para a taxa de recarga subterrânea (% mm/ano) para as unidades aquíferas

Taxa percentual de recarga: unidades aquíferas					
Aquíferos	Cauê	Gandarela	Moeda	Itacolomi	Coberturas
Nº Bacias	11	2	3	1	-
Mínimo	9%	18%	3%	6%	-
Médio	26%	28%	18%	15%	-
Máximo	49%	45%	46%	44%	-

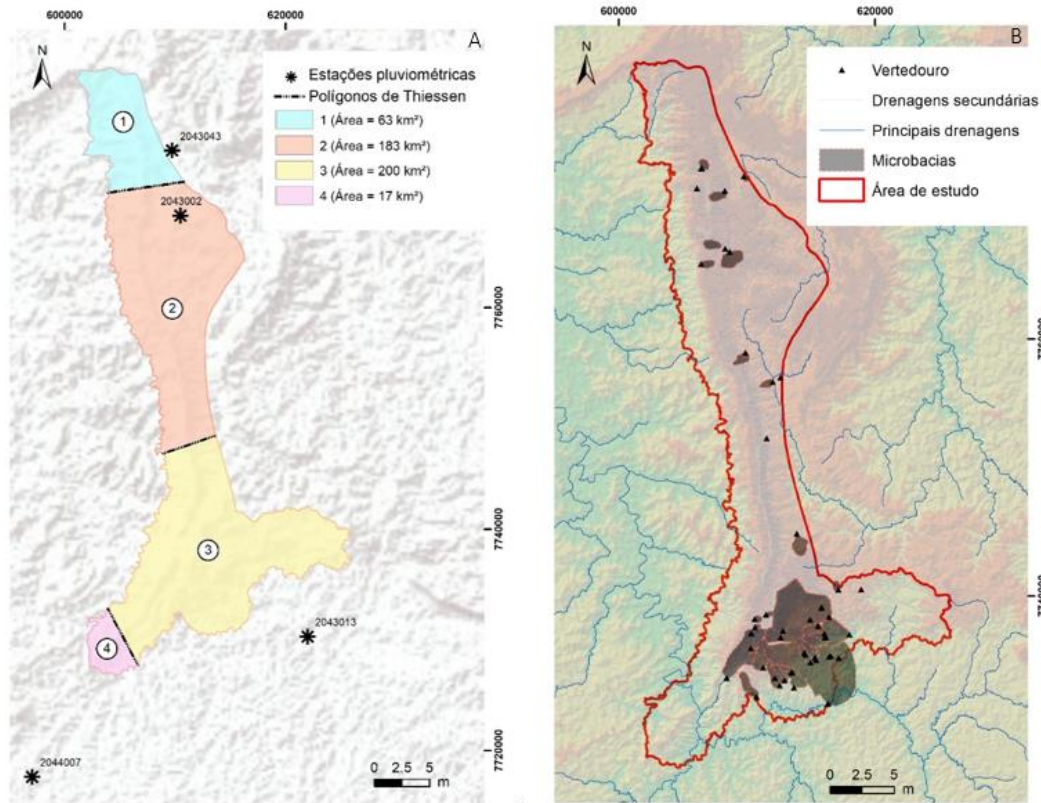


Figura 2. A) Polígonos de Thiessen com as quatro estações pluviométricas correspondentes, bem como a área obtida em intersecção com a área de estudo. B) Vertedouros utilizados para cálculo do escoamento de base e o fluxo superficial com as microbacias traçadas e as drenagens associadas.

Obteve-se que a taxa média de recarga anual corresponde a 26% para a unidade aquífera Cauê. O valor mínimo obtido foi de 9% e máximo de 49%. Mourão (2007) estimou taxa de recarga de 28% a 38% para essa unidade aquífera.

Para as demais unidades aquíferas têm-se: dois vertedouros representativos do Aquífero Gandarela, cuja taxa média de recarga foi de 28%, mínimo de 18% e máximo de 45%; um vertedouro para o Aquífero Itacolomi, com média de 15%, mínimo de 6% e máximo de 44%; três vertedouros para o Aquífero Moeda com média de 18%, mínimo de 3% e máximo de 46%. Mourão (2007) estimou valores de recarga inferior a 28% para as

unidades aquíferas Moeda e Gandarela. Não se obteve dados de vertedouros inseridos na unidade aquífera das Coberturas.

Para as unidades não aquíferas obteve-se valores mínimos de 4%, 6% e 4%, valores médios de 12%, 13% e 14% e máximos de 21%, 25% e 26% para os não aquíferos Batatal, Piracicaba e Sabará, respectivamente. Cabe ressaltar que essa análise acerca da taxa de recarga provém de uma avaliação regional, e que localmente essa taxa pode variar mediante as características hidrogeológicas das unidades aquíferas. Ademais, ressalta-se o caráter heterogêneo e anisotrópico dos aquíferos aflorantes.

A partir da taxa média anual de recarga de cada unidade aquífera, com os dados de pluviometria, e com a área é possível calcular o volume d'água que infiltra pelas chuvas anualmente, ou seja, a reserva renovável (Custódio & Llamas, 1983) regionalmente distribuída no sistema aquífero do flanco oeste do Sinclinal Moeda.

Em relação a descarga artificial considera-se que essa é realizada por poços de bombeamento. A partir dos dados de vazão outorgada dos empreendimentos com finalidade de rebaixamento elaborou-se uma análise temporal do total volume d'água extraído em m³/h anualmente a partir de 1999. Esses dados são apresentados na Tabela 3

Tabela 3. Vazão outorgada total dos empreendimentos, em m³/h, por período a partir de outubro de 1999

Período	Vazão outorgada (m ³ /h)	Período	Vazão outorgada (m ³ /h)
Out/1999 a Set/2000	500	Out/2009 a Set/2010	3563
Out/2000 a Set/2001	500	Out/2010 a Set/2011	3583.8
Out/2001 a Set/2002	500	Out/2011 a Set/2012	3583.8
Out/2002 a Set/2003	500	Out/2012 a Set/2013	4207.8
Out/2003 a Set/2004	700	Out/2013 a Set/2014	4208.8
Out/2004 a Set/2005	1200	Out/2014 a Set/2015	4273.9
Out/2005 a Set/2006	2215	Out/2015 a Set/2016	4773.9
Out/2006 a Set/2007	2215	Out/2016 a Set/2017	4816.5
Out/2007 a Set/2008	2215	Out/2017 a Set/2018	4816.5
Out/2008 a Set/2009	2713	Out/2018 a Set/2019	5198.8

Foi-se possível comparar a taxa média regional da recarga subterrânea em detrimento a taxa média da vazão que é explotada pelos poços de bombeamento no Aquífero Cauê e nas demais unidades aquíferas (Figura 7). Como apresentado, a recarga da reserva renovável é dependente da pluviometria, ou seja, entre os anos de 2013 e 2014, marcado por evento de seca intenso, a vazão bombeada é superior a taxa de recarga do Cauê e das unidades aquíferas.

A partir de outubro de 2009 a taxa de bombeamento outorgada dos poços torna-se superior a taxa de recarga regional referente a reserva renovável da unidade aquífera Cauê. A

Figura 8 apresenta graficamente esse déficit hídrico. Esse déficit, em 2019, alcança o valor de 3391 m³/h, e indica a reversão do fluxo subterrâneo das demais unidades aquíferas para a unidade aquífera do Cauê. É importante notar que tanto a taxa de recarga, quanto a avaliação da descarga subterrânea, natural e antrópica, baseia-se em uma avaliação regional do aquífero, ou seja, não avalia pontualmente o excedente e/ou déficit hídrico. Respalda-se que as unidades aquíferas aflorantes no flanco oeste do Sinclinal Moeda possuem natureza heterogênea e anisotrópica ao longo de toda área de estudo.

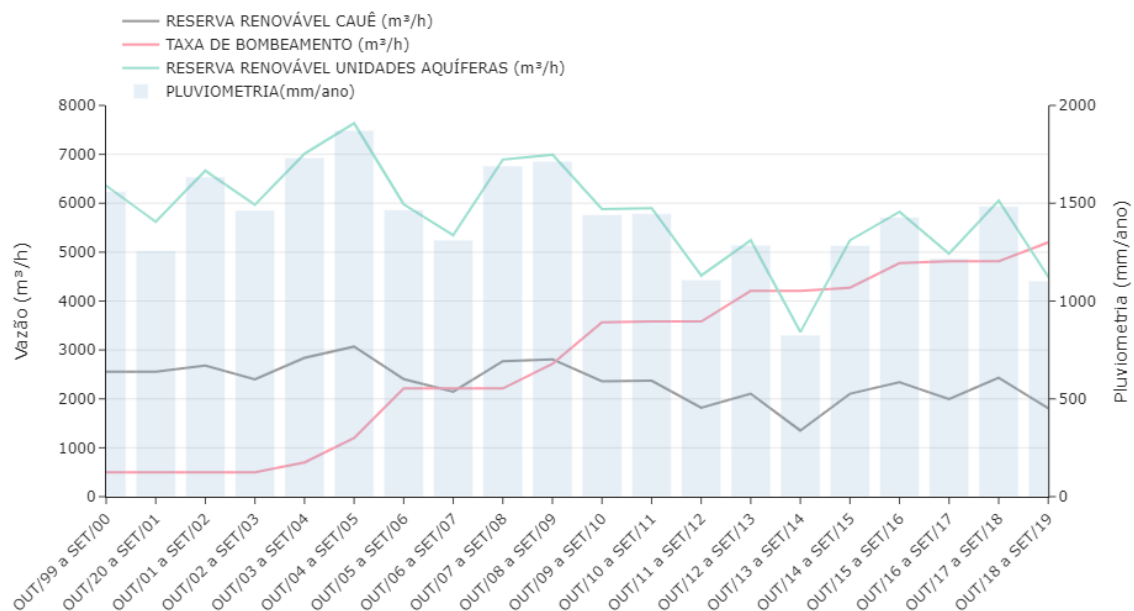


Figura 3. Taxa de recarga do Aquífero Cauê e das unidades aquíferas versus taxa de bombeamento – vazão explotada do aquífero em m^3/h . Também são apresentados os dados anuais pluviométricos. Se observa que as flutuações da reserva renovável coincidem com as flutuações do índice de chuvas.

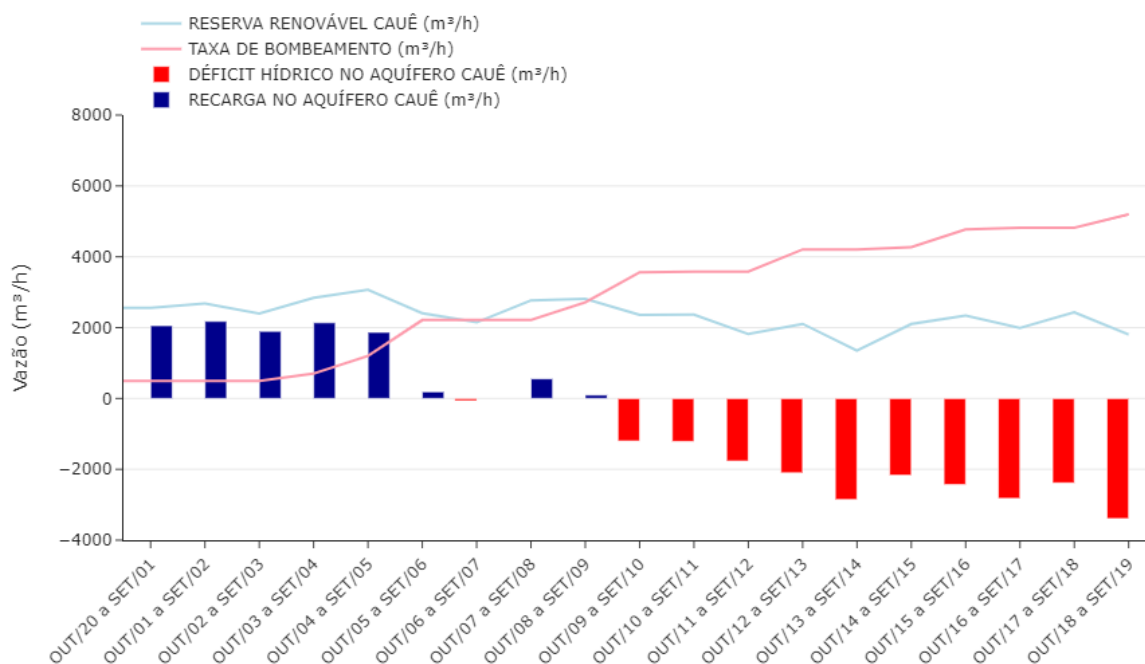


Figura 4. Excedente e déficit hídrico calculado considerando a taxa de recarga que infiltra (reserva renovável) da unidade aquífera Cauê e o quanto é bombeado (dados obtidos a partir da vazão outorgada dos empreendimentos). A partir do período de outubro de 2009 o volume d'água bombeado é superior a recarga.

Fluxo subterrâneo

A rede de monitoramento de água subterrânea é composta por poços de monitoramento e piezômetros distribuídos nas porções norte, central e sul da área de estudo, e conforme mencionado anteriormente, a série histórica de monitoramento abrange o intervalo de Andrade, I.B.; De Paula, R.S.; Teixeira, G.M.; Novo, T. A.; De Melo, M.C.; Costa, F.C.

1999-2019, com o ano hidrológico (estação chuvosa) iniciando-se em outubro.

O fluxo regional na área de estudo é N-S, em direção ao rio Paraopeba, e localmente possui direção E-W. A Figura 9 apresenta a potenciometria elaborada referente à 2019 a partir dos dados e distribuição espacial dos piezômetros.

É possível se observar quatro locais com superexploração mostrando regiões com reversão de fluxo subterrâneo devido ao bombeamento realizado pelos empreendimentos. No flanco oeste do Sinclinal Moeda se observa que a superfície saturada rebaixa de maneira abrupta em relação à topografia, conforme evidenciado pela descontinuidade das linhas equipotenciométricas. Nesse contexto o fluxo local é redirecionado de E-W para N-S. Esse comportamento evidencia a compartimentação da área de estudo, em relação ao fluxo subterrâneo, nos setores norte, central e sul, conforme mencionado anteriormente.

A Figura 10 apresenta os piezômetros com carga hidráulica constante, sujeito a variações sazonais, bem como os piezômetros que registraram o rebaixamento do nível d'água, distribuídos e compartimentados. Em termos gerais a cota piezométrica de toda área de estudo situa-se entre as altitudes de 1512 m (valor máximo) e 860 m (valor mínimo). A área norte o nível d'água rebaixou em média 90 m, enquanto na porção central se nota uma redução aproximada de 40 m. Na região sul, nos poços localizados próximos do *bottom pit* da mina, registram valores de rebaixamento do nível d'água em cerca de 140 m (Figura 10).

Como apresentado pela Figura 10, há 45 pontos de monitoramento distribuídos na área norte, central e sul que possuem a carga hidráulica superior a 1300 m, sendo que o maior valor registrado foi de 1512 m (na porção sul da área). Dezesesseis piezômetros possuem carga hidráulica inferior a 1300 m e superior a 1200 m, também distribuídos ao longo de toda área de estudo. Os demais, cerca de 21 pontos de monitoramento, possuem carga hidráulica inferior a 1200 m, cujo mínimo registrado foi de 860 m, e estão localizados na porção sul da área de estudo.

Os piezômetros que possuem carga hidráulica superior a 1200 m e inferior a 1300 m, ou seja, de caráter intermediário, estão situados próximos das cavas das minerações, regidas no lineamento N-S, e possivelmente são influenciados pelo cone de rebaixamento do nível d'água provenientes do bombeamento das minerações. Na porção sul da área de estudo o Sinclinal Moeda encontra-se deformado e próximo da junção com o Sinclinal Dom Bosco, onde desconecta-se hidráulicamente do lineamento N-S. Ainda assim nesse cenário permanece piezômetros que registram carga hidráulica superior a 1300 m, intermediários e inferiores a 1200 m. Os pontos de monitoramento com menor carga hidráulica estão

próximos das cavas das minas – que nessa região são as mais profundas em relação as demais localidades. À medida que se distancia das cavas, a carga hidráulica dos piezômetros assume valores intermediários e, posteriormente, valores acima de 1300 m – nesses locais se assume que o cone de rebaixamento não interfere nos níveis potenciométricos. Cabe mencionar que as variações bruscas de carga hidráulica em locais próximos foram associadas a atividade de bombeamento - principal agente de interferência no nível d'água subterrâneo na área de estudo.

Devido a diferença de permeabilidade das unidades aquíferas, a velocidade do fluxo para W é superior a velocidade do fluxo para E. Na porção sul, o fluxo se direciona de N para SE. A presença de empreendimentos que exploram água subterrânea interfere na carga hidráulica e, consequentemente, nas direções do fluxo subterrâneo. Nesses locais, devido a presença de poços de bombeamento, se observa influxo subterrâneo para a unidade aquífera Cauê, retirando água das unidades aquíferas associadas. No compartimento norte se observa que o influxo subterrâneo no Cauê retira água da unidade aquífera Gandarela à leste, bem como do aquíclode Batatal e do Aquífero Moeda à oeste (Figura 9A). Esse comportamento também é observado na porção central da área de estudo, contudo, devido à disposição das linhas potenciométricas se observa que o Aquífero Gandarela é acometido com maior intensidade pelo influxo na unidade aquífera do Cauê (Figura 9B).

O Aquífero Cauê, no compartimento sul da área de estudo, principalmente próximo da área do Sinclinal Dom Bosco, é em sua totalidade influenciado pela superexploração e consequente rebaixamento do aquífero. Além do rebaixamento ocasionado no Cauê, o Aquífero Gandarela, que aflora localmente em forma de lentes, também é influenciado pela reversão de fluxo (Figura 9C e Figura 9D). O cone de rebaixamento nessa região sul causa intervenção às equipotenciais à oeste da unidade não aquífera Sabará, próximo do alinhamento N-S da Serra da Moeda.

A Figura 11 e Figura 12 apresenta de maneira esquemática tridimensional as superfícies saturadas e insaturadas geradas a partir da potenciometria. Conforme mencionado, se observa rebaixamento na porção norte, central e sul da área, sendo que na porção sul se registra os menores valores de carga hidráulica e aumento da superfície insaturada.

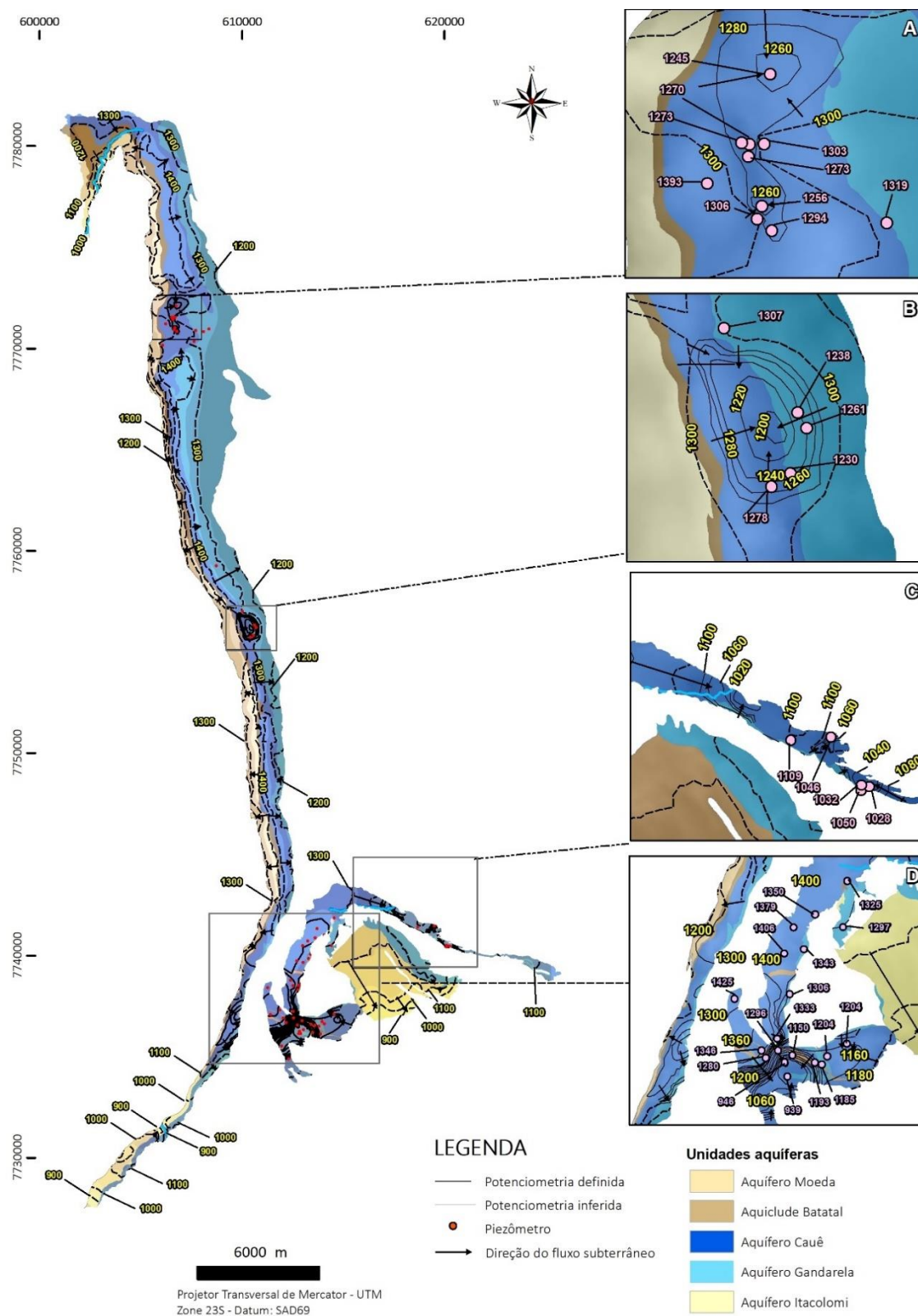


Figura 5. Mapa potenciométrico contendo as linhas equipotenciais em superfície e as linhas de fluxo das unidades aquíferas, em relação à condição de contorno. São evidenciados os compartimentos norte, central e sul com os piezômetros, com informação do nível d'água, bem como as áreas de rebaixamento, com reversão de fluxo no Aquífero Cauê. Na região central e sul há linhas equipotenciais que retiram água da unidade aquífera Gandarela.

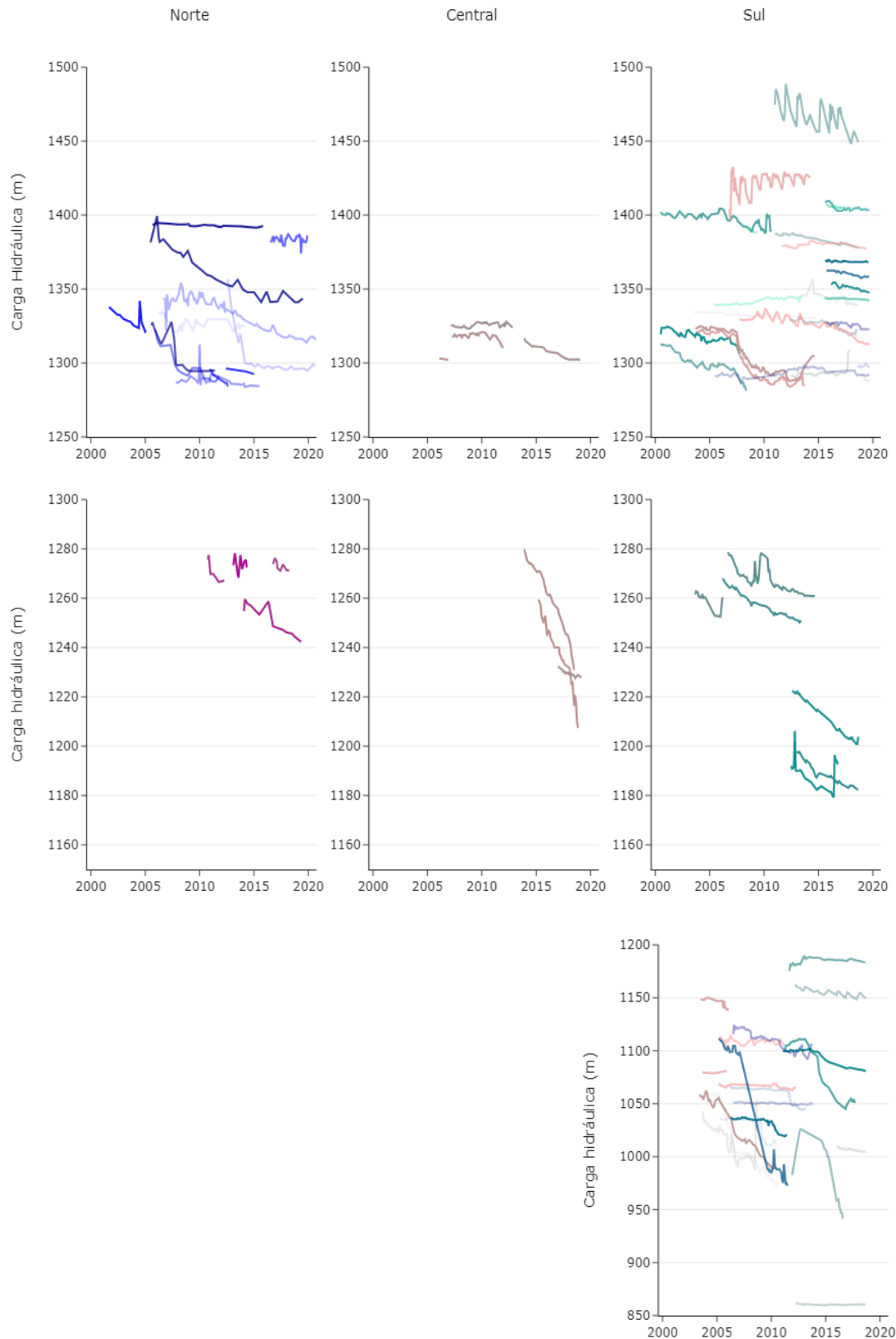


Figura 6. Gráficos apresentando a variação da carga hidráulica (incluso rebaixamento) ao longo do tempo por piezômetro, por cota e por compartimento (norte, central e sul). Cada linha do gráfico representa a carga hidráulica de cada instrumento temporalmente.

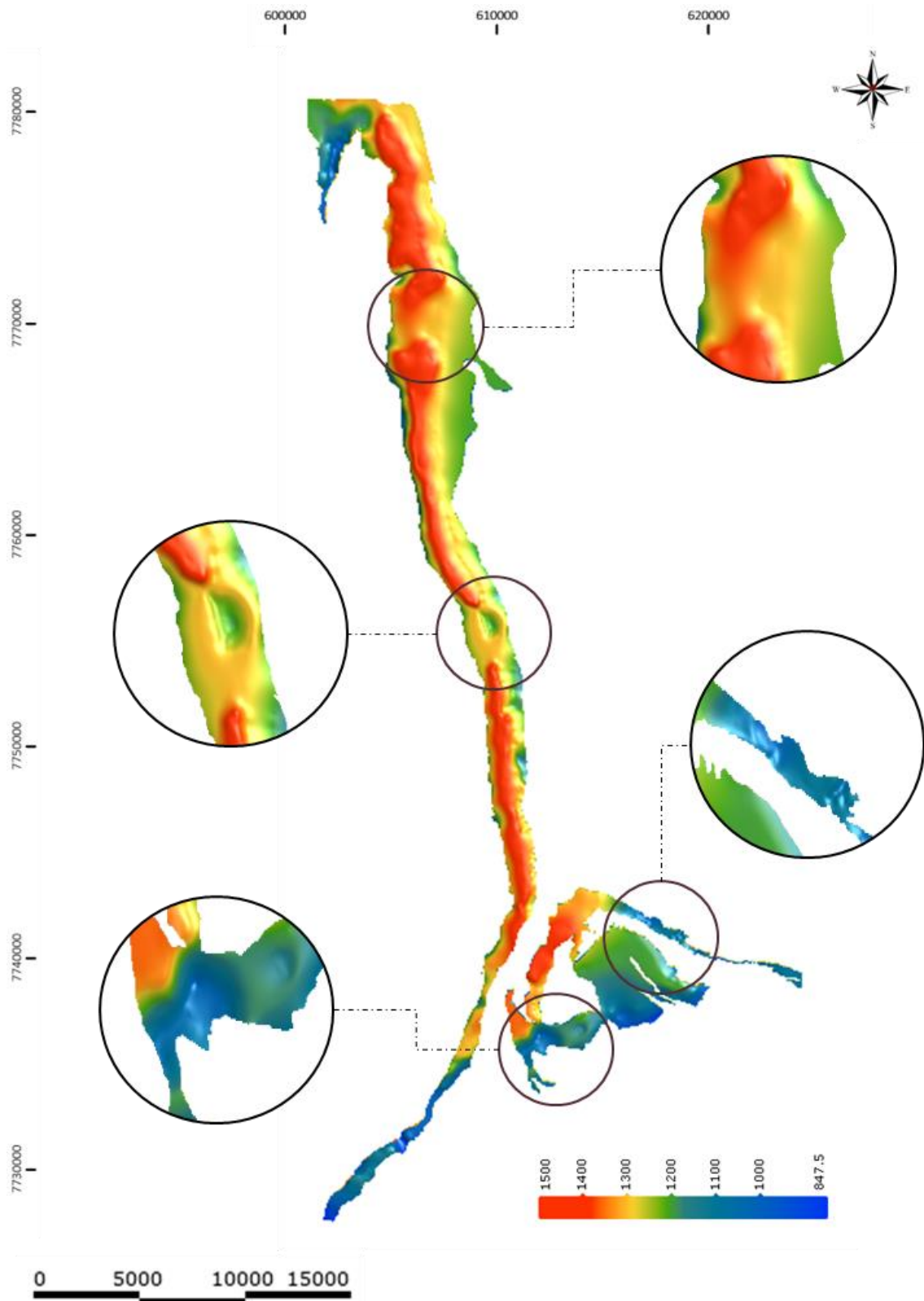


Figura 7. Representação tridimensional da superfície saturada, bem como das áreas rebaixadas por exploração do nível d'água por empreendimentos (demarcadas e ampliadas) – referente ao ano de 2019.

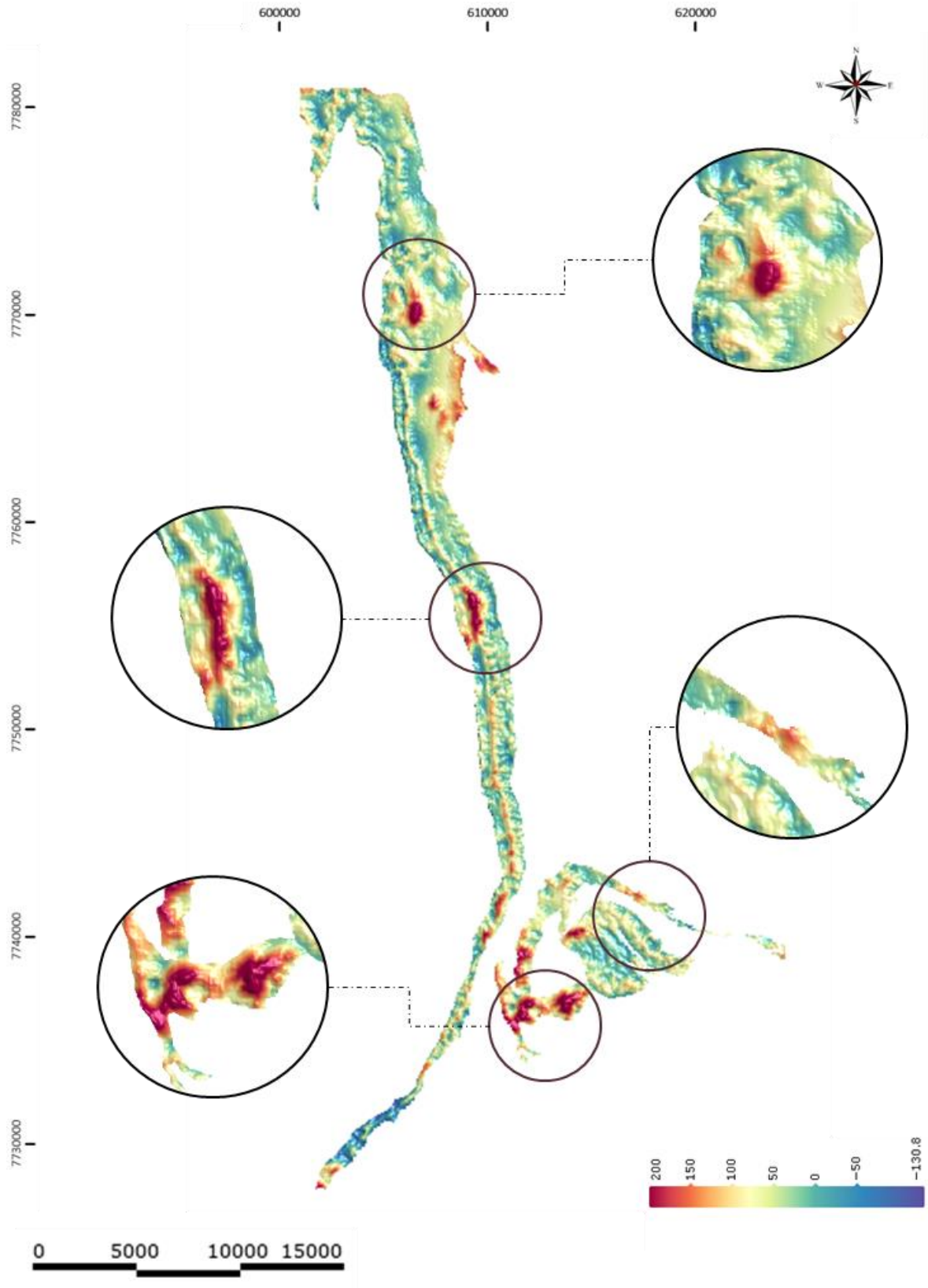


Figura 8. Representação tridimensional da superfície insaturada. É possível identificar aumento dessa superfície nas áreas demarcadas – referente ao ano de 2019.

Conclusões

A avaliação regional do sistema aquífero do flanco oeste do Sinclinal Moeda, baseada nas relações de fluxo subterrâneo das seis unidades hidrogeológicas (Cauê, Gandarela, Moeda, Itacolomi, Coberturas e Batatal), revelou que o Aquífero Cauê é a principal unidade aquífera da região devido aos seus valores de condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento. O aquífero Batatal, apesar de se comportar localmente como confinante ao Aquífero Moeda, permite fluxo entre as unidades aquíferas Moeda e Cauê devido à sua descontinuidade e pouca espessura, sendo assim incorporado ao sistema aquífero do flanco oeste do Sinclinal Moeda.

A compartimentação da área de estudo em três porções (norte, central e sul) e a análise vertical até 500 m de profundidade permitiram identificar as dinâmicas hidrogeológicas e os impactos das atividades minerárias sobre o Aquífero Cauê. A exploração da água subterrânea, impulsionada pela mineração, tem suprimido a contribuição natural do Aquífero Cauê desde 2006, com taxas de retirada superiores à taxa de recarga, resultando em mudanças no fluxo natural e afetando as unidades aquíferas adjacentes.

Os resultados indicam que a exploração contínua poderá afetar a capacidade do Aquífero Cauê de atender às necessidades das gerações atuais e futuras, destacando a necessidade urgente de aprimoramento na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. A análise regional das entradas e saídas do sistema aquífero, utilizando o método de balanço de massa, mostrou que a entrada total de água varia entre 3000 m³/ano em períodos de estiagem e 8000 m³/ano em períodos de cheia, com aproximadamente 40% dessa entrada proveniente do Aquífero Cauê.

A setorização da área de estudo permitiu identificar as porções mais impactadas, reforçando a necessidade de estudos hidrogeológicos adicionais para propor alternativas de gestão, monitoramento e remediação. A gestão inadequada desses recursos pode resultar em degradação ambiental e conflitos sociais, ressaltando a importância de uma abordagem integrada e sustentável para a governança hídrica.

Portanto, este estudo conclui que a exploração da água subterrânea no Quadrilátero Ferrífero, particularmente no flanco oeste do Sinclinal Moeda, poderá comprometer as reservas permanentes do Aquífero Cauê. É essencial

desenvolver políticas públicas eficazes que promovam a conservação e o uso responsável da água subterrânea, garantindo a sustentabilidade dos recursos hídricos para as gerações futuras.

Agradecimentos

Este estudo contém o apoio técnico do IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas) e da SEMAD (Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável) vinculado ao projeto “Proposta de uma rede de monitoramento hidrometeorológica a partir de estruturas existentes na região do Quadrilátero Ferrífero tendo como área piloto a região do Sinclinal Moeda, MG” desenvolvido em parceria com o IGC (Instituto de Geociências) da UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geologia (PPGEOL) vinculado ao Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG), e ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) pelo apoio técnico e à Bentley pela disposição do software acadêmico. A representação tridimensional da potenciometria foi gerada com a utilização do software da Bentley. Copyright © Bentley Systems, Incorporated.

Referências

- Adler, R. A., Claassen, M., Godfrey, L., & Turton, A. R. (2007). Water, mining, and waste: An historical and economic perspective on conflict management in South Africa. *The Economics of Peace and Security Journal*, 2(2). <https://doi.org/10.15355/epsj.2.2.33>
- Alkmim, F., & 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 Research*, 90(1-2), 29–58. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(98\)00032](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(98)00032)
- Anderson, M. P., & Woessner, W. W. (1992). *Applied Groundwater Modeling*. Academic Press.
- Araujo, G. M. (2021). *O Panorama das Serras. Investigando a dimensão política do conceito de paisagem nos conflitos entre a mineração e a preservação do patrimônio cultural no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais [Tese de doutorado]*.

- <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/4037>
- ASF Alaska Satellite Facility. (2011). Alos Palsar 12,5 x 12,5 m [Imagem de satélite]. Acessado em fevereiro de 2022. <https://asf.alaska.edu/>
- Beato, D. A. C., Monsores, A. L. M., & Bertachini, A. C. (2005). Hidrogeologia. In CPRM/SEMAD/CEMIG (Eds.), Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico: Área de proteção ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte (Vol. 8-A, p. 101). Belo Horizonte, Brasil: CPRM/SEMAD/CEMIG.
- Bertachini, A. C. (1994). Hidrogeologia e Desaguamento da Mina de Águas Claras. Congresso Brasileiro De Águas Subterrâneas, 274–283. <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24426/1637>
- Borelli, R.S. (2023). Avaliação da ferramenta geomodeller para a simulação de fluxo de água subterrânea em região de alta complexidade geológica. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Castro, P. de T. A. (2015). Entendendo a mineração no Quadrilátero Ferrífero. Ecológico - Comunicação em Meio Ambiente.
- Cenni, C., Carvalho, M., Nilson Guiguer, & Sergio, R. (2022). The Cauê Aquifer on the eastern limb of the Moeda Syncline: characterization, impacts, and flow in the western Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero), MG, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 52(4). <https://doi.org/10.1590/2317-4889202220220005>
- Chemale, F., Rosière, C. A., & Endo, I. (1994). The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, 65(1-4), 25–54. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(94\)90098-1](https://doi.org/10.1016/0301-9268(94)90098-1)
- Cintra, L. C., & Gonçalves, J. A. C. (2022). Avaliação quantitativa das outorgas emitidas para as águas subterrâneas no município de Itabira-MG. *Research, Society and Development*, 11(5), e0211527491. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.27491>
- Cooper, H. H., Bredehoeft, J. D., & Papadopoulos, I. S. (1967). Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resources Research*, 3(1), 263–269. <https://doi.org/10.1029/wr003i001p00263>
- Costa De Mesquita, D., Cotta, J., Dantas, M., Sérgio De Paula, R., & Guerra, K. (2017). Estudo Dos Parâmetros Hidrodinâmicos Obtidos Em Ensaio De Campo Em Itabirito Brandos Da Porção Sudoeste Do Quadrilátero Ferrífero, MG. *Geonomos*, 25(2), 12–19. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v25i2.1077>
- Cruz, C. E., Sabadini Henriques Caetano, I., Vieira Mota, A. C., Ferreira, J. J., Fernandes de Souza, J. V., Velásquez, L. N. M., & de Paula, R. S. (2022). Caracterização pluviométrica do Quadrilátero Ferrífero na região do Sinclinal Moeda – Minas Gerais. *Além Dos Muros Da Universidade*, 1(1), 17-35. Recuperado de <https://periodicos.ufop.br/alemur/article/view/5116>
- Custódio, E., & Llamas, R. (1983). *Hidrologia subterrânea (Vols. I & II)*. Barcelona, Espanha: Ed. Omega.
- Dorr, J. V. N. (1969). *Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. U.S. Government Printing Office. <https://pubs.usgs.gov/publication/pp641A>
- Endo, I., & Arias, H. (2024). Geometria e cinemática das estruturas extensionais e compressionais na borda oeste do sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, MG. Ufop.br. <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3754>
- Endo, I., Galbiatti, H. F., Oliveira, C. E. R., Zapparoli, M. M. F., Moura, A. de C., Peres, L. G. B. de, Oliveira, A. H. de, Zavaglia, G., Danderfer, F. A., Gomes, C. J. S., Carneiro, M. A., Nalini Jr, H. A., Castro, P. de T. A., Suita, M. T. de F., Seixas, L. A. R., Tavaza, E., Lana, C., Marns-Neto, de C., Marns, M. A., & Ferreira, M. de S. (2019). Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. [Map]. Escola de Minas.
- George Clarke Simmons. (1968). *Geology and iron deposits of the western Serra do Curral, Minas Gerais, Brazil*. In U.S. Geological

- Survey professional paper. United States Government Publishing Office. <https://doi.org/10.3133/pp341g>
- Gonçalves, J. A. C., Pereira, P. H. R., & Almeida, M. S. L. (2021). Caracterização dos Sistemas Aquíferos do Distrito Ferrífero de Itabira, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, 35(1). <https://doi.org/10.14295/ras.v35i1.30014>
- Hancock, S. (1982). Mine Water Problems In Australia -Conflicts Of Interest. First International Mine Water Congress of the International Mine Water Association . https://www.imwa.info/docs/imwa_1982/I MWA1982_Hancock_047.pdf
- Helwege, A. (2015). Challenges with resolving mining conflicts in Latin America. *The Extractive Industries and Society*, 2(1), 73–84. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2014.10.003>
- Hippertt, J. F., Borda, R. P., & Nalini, H. A. J. (1992). O contato Formação Moeda-Complexo Bonfim: Uma zona de cisalhamento normal na borda oeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista Escola de Minas*, 45(32-34).
- Hvorslev, M. J. (1951). Time Lag and soil permeability in ground water observations, Bulletin No. 36, U.S. Army Corps of Engineers, 50.
- Köppen, W. (1948). Climatologia con un estudio de los climas de la Tierra. México: Fondo de Cultura Económica, 479 p.
- Lazarim, H. A. (1999). Caracterização Hidrogeológica no Extremo Norte no Sinclinal da Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Nova Lima, MG: Proposta de Modelo [Dissertação].
- Marent, B. R., Lamounier, W. L., & Gontijo, B. (2011). Conflitos ambientais na Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero - MG. *Revista Geografias*, 7(1), 99–113. <https://doi.org/10.35699/2237-549x..13311>
- Medina, A.I., Dantas, M. E., & Saadi, A. (2005). Geomorfologia. In: PROJETO APA SUL RMBH -Estudos do Meio Físico. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, v.6.
- Miguel, R., & Campos, J. (2024). Relações entre Mineração e Recursos Hídricos Subterrâneos: o Caso da Mina Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero, MG. *Águas Subterrâneas*, 38(1), e–30219. <https://doi.org/10.14295/ras.v38i1.30219>
- Miller J.A. (1999) Groundwater Atlas of the United States. Introduction and National Summary. Accessed at: Ground Water Atlas of the United States (usgs.gov)
- Mourao, M. A. A. (2007). Caracterização hidrogeológica do aquífero cauê, quadrilátero ferrífero, MG: Subsídios para a gestão dos recursos hídricos no quadrilátero ferrífero [Tese de doutorado]. In repositório.ufmg.br. <http://hdl.handle.net/1843/ENGD-7AJNZE>
- Palha, F. P. (2021). Injustiça ambiental-hídrica em Brumadinho, Minas Gerais: Conflito ambiental em torno das operações industriais da Coca-Cola FEMSA. *AMBIENTES: Revista de Geografia E Ecologia Política*, 3(1), 224. <https://doi.org/10.48075/amb.v3i1.27025>
- Pomerene, J. B. (1958a). The Cercadinho Formation. *Sociedade Brasileira de Geologia Boletim*, 7(2), 64-65.
- Pomerene, J. B. (1958b). The Taboões Quartzite. *Sociedade Brasileira de Geologia Boletim*, 7(2), 66-67.
- Silva, R. G. da , & Gomes, C. J. S. (2001). Análise da deformação na porção centro-sul do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais (pp. 1–23) [Dissertação]. www.degeo.ufop.br/geobr
- Singh, N., Koku, J. E., & Balfors, B. (2007). Resolving Water Conflicts in Mining Areas of Ghana Through Public Participation A Communication Perspective. *Journal of Creative Communications*, 2(3), 361–382. <https://doi.org/10.1177/097325860700200306>
- Smakhtin, V. Y. (1997). Regional low-flow studies in South Africa (pp. 125–132). IAHS Publication.
- Sun, W., Wu, Q., Dong, D., & Jiao, J. (2012). Avoiding Coal–Water Conflicts During the Development of China’s Large Coal-Producing Regions. *Mine Water and the Environment*, 31(1), 74–78. <https://doi.org/10.1007/s10230-012-0173-9>
- Theis, C. V. (1935). The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Transactions*,

American Geophysical Union, 16(2), 519.
<https://doi.org/10.1029/tr016i002p00519>