

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL DA REGIÃO ENTRE AS SERRAS DO CURRAL E DE TRÊS IRMÃOS, BRUMADINHO-MG

*Alex Rodrigues de Freitas*¹; *Rodrigo Sérgio de Paula*²; *Gabriela Meira Teixeira*³

Abstract: The Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero) represents a Brazilian mineral province, with huge iron and gold deposits. Furthermore, the region homes very important aquifers to water supply for Belo Horizonte region, capital city of Minas Gerais State. This paper aimed to synthesize hydrogeological data of the Iron Quadrangle, specially of Brumadinho municipality region, compiled of Brazilian environmental and water resources agencies, including precipitation, fluviometric and pumping wells, that helped to estimated data of local aquifers, such as hydrodynamic parameters and groundwater recharge. That data was consolidated as a conceptual hydrogeological model, that aim better understand local groundwater flow conditions and the main characteristics of local aquifers. The most important local aquifers are Cauê, Itabiritic of double porosity (granular and fissured), Crystalline fissured aquifer, and Grandarela karstic aquifer. The most pumped aquifer is Cauê, followed by Crystalline and Gandarela. Moreover, Cauê showed the most relevant hydraulic conductivity. The highest recharges were observed in Crystalline aquifer, and the lowest in Gandarela, that has some mud horizons. Finally, a potentiometric map was constructed and the results showed that Curral and Três Irmãos ridges represents watershed, that divide the groundwater flux. The main groundwater flux flows from the top of the ridges to south, directly to Casa Branca and Paraopeba rivers. The inverse occurs in the north area, with groundwater flowing to north.

Key Words – Conceptual model, Hydrogeology, Iron Quadrangle

Resumo: O Quadrilátero Ferrífero representa uma importante província mineral brasileira, com depósitos de ferro e ouro. Ademais, a região abriga importantes aquíferos que abastecem a região metropolitana de Belo Horizonte, capital de Minas Gerais. O presente trabalho buscou sintetizar dados compilados das principais bases públicas acerca da hidrogeologia do Quadrilátero Ferrífero, especificamente na região do município de Brumadinho. Foram compilados dados pluviométricos, fluviométricos e de bombeamento por poços tubulares, que permitiram estimar as principais informações hidrogeológicas dos aquíferos locais, como parâmetros hidrodinâmicos e recarga aquífera. As informações foram consolidadas na forma de um modelo hidrogeológico conceitual, que permitiu definir as condições locais de fluxo subterrâneo, e características das principais unidades aquíferas locais. Os resultados mostraram que os principais aquíferos locais são o Cauê, essencialmente itabirítico de dupla porosidade (granular e fissural), Cristalino (fissural) e Grandarela (cártisco-fissural). O aquífero com os maiores bombeamentos é o Cauê, seguido do cristalino e Gandarela. O aquífero Cauê apresentou as maiores condutividades hidráulicas. As maiores recargas foram calculadas para o aquífero cristalino, e as menores para o Gandarela, que apresenta grandes porções argilosas. Finalmente, a potenciométrica mostrou que as serras do Curral e Três Irmãos representam grandes condicionantes de fluxo, sendo seus topos verdadeiros divisores de águas. O fluxo subterrâneo majoritário ocorre na direção norte-sul, da Serra Três Irmãos para o sul, ocorrendo o inverso em sua vertente norte.

Palavras-Chave – Modelo conceitual, Hidrogeologia, Quadrilátero Ferrífero.

1) Universidade Federal de Minas Gerais – Instituto de Geociências – Av. Pres. Antônio Carlos 6627 – Pampulha – Belo Horizonte - MG, +55 31 2527-7582. alexrdefreitas@yahoo.com

2) Universidade Federal de Minas Gerais – Instituto de Geociências – Av. Pres. Antônio Carlos 6627 – Pampulha – Belo Horizonte - MG, +55 31 2527-7582. rodrigo.spdm@yahoo.com.br

3) Universidade Federal de Minas Gerais – Instituto de Geociências – Av. Pres. Antônio Carlos 6627 – Pampulha – Belo Horizonte - MG, +55 31 2527-7582. gabrielameira1998@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A região de Brumadinho, está inserida no contexto do Quadrilátero Ferrífero (QF), que representa uma notável província metalogenética do Brasil, localizada na porção sul do Cráton do São Francisco (ALMEIDA, 1977; BALTAZAR E LOBATO, 2020). Localizada na porção central do estado de Minas Gerais, a região abriga importantes depósitos minerais, principalmente de ferro e ouro, ao longo da sua área de aproximadamente 7.000 Km² (DORR, 1969; LANA et al., 2013; VITORINO, et al., 2020). Por conta de sua importância metalogenética, diversas operações foram instaladas na região para exploração do potencial mineral local.

Além dos recursos minerais, há de se levar em conta que o QF importantes aquíferos, responsáveis pelo abastecimento de parte de região metropolitana de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais (MOURÃO, 2007; SABADINI et al., 2017; MAGALHÃES et al., 2022). Coincidentemente, o principal aquífero da região está abrigado na Formação Cauê, que corresponde às formações ferríferas, alvo das explorações minerais. Com isso, as operações instaladas no local, via de regra, precisam realizar atividades de rebaixamento de nível d'água por meio de bateria de poços tubulares, para que as atividades minerárias ocorram de forma segura e contínua (DE PAULA et al., 2019).

A compreensão clara das dinâmicas de fluxo da região do QF e da Bacia do Médio Paraopeba mostra-se altamente relevante, tanto do ponto de vista ambiental, social e estratégico, quanto do ponto de vista operacional das minas instaladas no QF. A principal ferramenta de gestão dos aquíferos, e que auxilia na tomada de decisão por parte de órgãos ambientais, e por empreendedores do setor mineral, representa os modelos hidrogeológicos, tanto em seu aspecto conceitual quanto quantitativo (numérico).

Em se tratando dos modelos hidrogeológicos conceituais, busca-se realizar uma síntese das principais características hidrogeológicas de determinada área. Essas ferramentas abordam principalmente os aspectos que determinam as condições de fluxo de determinado local (ANDERSON e WOESSNER, 1992; KRECIC, 2007; ANDERSON et al., 2015). Entre os principais aspectos abordados pelos modelos conceituais cita-se as condições de fluxo e armazenamento da água subterrânea, as unidades e parâmetros hidrogeológicos, principais regiões de descarga e recarga aquífera, e, finalmente, os resultados do balanço hídrico local. Ressalta-se ainda que os modelos conceituais são a base e fundamentação para a construção de modelos numéricos.

2. CONTEXTOS GEOLÓGICOS DE HIDROGEOLÓGICOS LOCAIS

A estruturação do arcabouço tectônico do QF mostra a superposição de estruturas desenvolvidas durante dois eventos tectônicos majoritários, Transamazônico e Brasileiro (CHEMALE JR. et al., 1994; SANGLARD et al., 2014). Tal estruturação deu origem à morfologia típica de domos e quilhas, onde os domos são representados pelos complexos do embasamento metamórfico, e as quilhas por rochas supracrustais dobradas (CHEMALE JR. et al., 1994; ALKMIN e MARSHAK, 1998; BALTAZAR e ZUCHETTI, 2005).

As principais unidades litoestratigráficas que ocorrem na área de estudos compreendem as rochas gnáissicas dos Complexos Bonfim e Souza Noschese, além dos filitos da Formação Barreiro, as rochas dolomíticas da Formação Gandarela, os itabiritos da Formação Cauê, filitos da Formação Batatal, quartzitos da Formação Moeda, além de depósitos aluvionares e coluvionares (Figura 1).

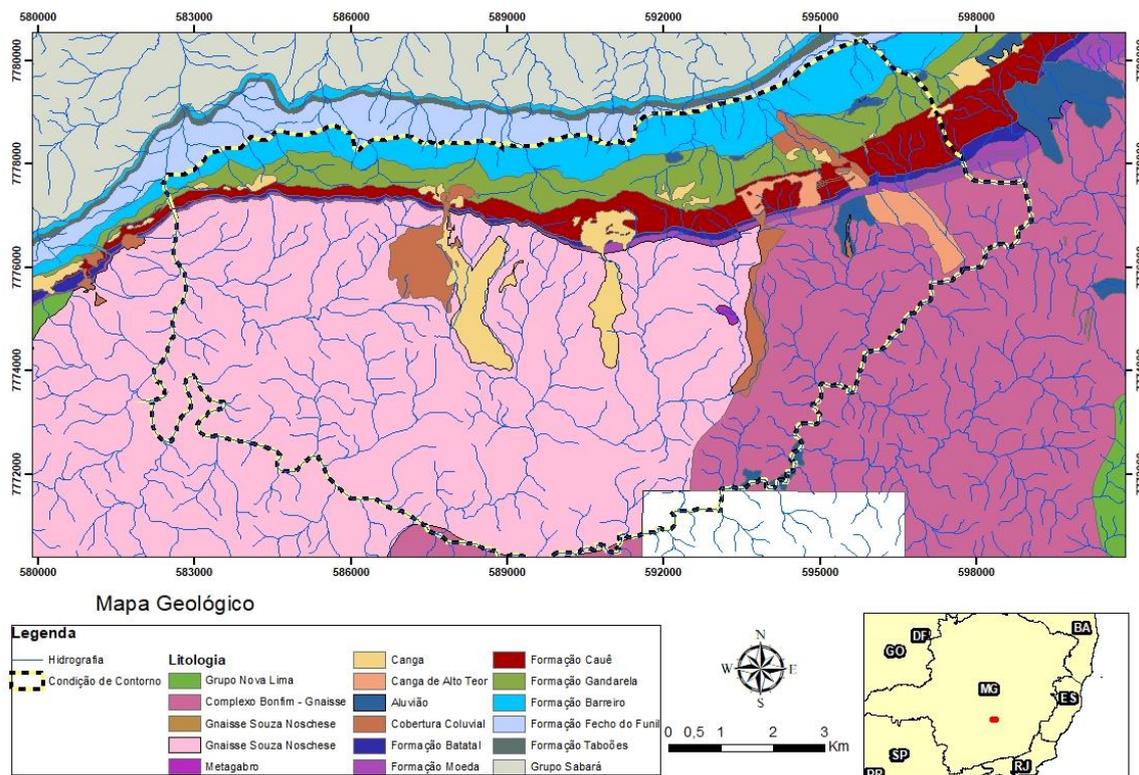
O aquífero Cauê representa o principal reservatório de água subterrânea da região do QF, e está abrigado nos itabiritos da Formação Cauê, que podem chegar a 250 metros de espessura (MOURÃO, 2007; SILVA e COTA, 2021). Essa unidade aquífera é confinada na base pelos filitos da Formação Batatal, e no topo está em contato discordante com as rochas dolomíticas, filíticas e itabiríticas da Formação Gandarela. Por conta do diferente comportamento intempérico dessa unidade, esse aquífero pode ser considerado de dupla porosidade, com características granulares quando composto por

formações ferríferas friáveis e pulverulentas, e ainda fissural, quando associado a fácies de hematitas compactas (MOURÃO et al., 2006; MOURÃO, 2007).

A interconexão hidráulica entre os aquíferos Cauê e Gandarela é especulada por diversos autores (MOURÃO, 2007; DE PAULA et al., 2018; SILVA e COTA, 2021). De Paula et al 2018 sugerem que pode haver interconexão em locais onde há predominância de cátions Ca^{2+} nas águas circulantes no aquífero Cauê. Segundo os autores, essa assinatura cálcica está diretamente associada a fluxos mais profundos e maiores tempos de residência, em consonância com as águas do aquífero Gandarela.

Há também a ocorrência local do aquífero fissural gnáissico, abrigado nas rochas dos granitos TTG do embasamento cristalino da região. Esse aquífero mostra-se altamente heterogêneo e anisotrópico, podendo ser confinados localmente pelas rochas alteradas (BEATO et al., 2006). Tem especial importância para a área de estudos, uma vez que tem ampla ocorrência, e também pelo fato do rio Paraopeba drenar em grande parte de seu domínio. O rio Paraopeba tem grande importância na área de estudos pois serve como fonte de abastecimento de grande parte do município de Brumadinho, e de outros da região metropolitana de Belo Horizonte. Salienta-se que o Rio Paraopeba, segundo Marcuzzo (2017), insere-se na sub-bacia do Alto São Francisco, até Três Marias.

Figura 1: Mapa geológico da região de Brumadinho-MG (Modificado de LOBATO et al., 2005).



3. MÉTODOS

Inicialmente foi feita compilação de dados disponíveis sobre a área de estudos, a partir de base de dados públicos fornecida pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), como processos de outorgas de direito de uso e relatórios anuais de condicionantes das outorgas de rebaixamento. Foram consultados ainda dados das principais bases públicas como HIDROWEB (ANA), SIAGAS (CPRM), que reúnem dados de monitoramento pluviométrico e fluviométrico e de poços tubulares, respectivamente.

De posse desses dados, e combinado com as informações relativas à geologia local, foi feita a definição das principais unidades aquíferas; com os dados dos testes de bombeamento, foram definidos os parâmetros hidrodinâmicos de cada unidade aquífera. Para o cálculo da condutividade hidráulica, usou-se o método de Hvorslev (1951), para a transmissividade, o método de Mace (1997), e para o armazenamento específico, a relação de Cooper-Jacob (1946).

O monitoramento fluviométrico permitiu a definição da separação do escoamento de base para estimativa da recarga de cada unidade aquífera. O método utilizado foi o filtro numérico recursivo de Eckhardt (2005), balizado por Collischonn e Fan (2012).

Por fim, com os dados de cota do nível d'água, bem como de níveis estáticos de poços de bombeamento compilados das bases públicas, foi feito um mapa potenciométrico para a área modelada, entre as serras do Curral e de Três Irmãos, a fim de melhor compreender as condições de fluxo locais.

4. RESULTADOS

4.1 Condições de Contorno

As condições de contorno buscam definir os limites do modelo hidrogeológico conceitual e levam em consideração principalmente aspectos hidrográficos, fisiográficos e geológicos da região de interesse. Na área de estudos ocorre condicionamento do fluxo de água subterrânea em função da Serra do Curral e localmente da Serra Três Irmãos.

Ressalta-se ainda que importantes cursos d'água drenam a porção sul e leste da área de estudos, como o Córrego Casa branca ao sul e o Rio Paraopeba a oeste. Há ainda a compartimentação hidráulica gerada pelas falhas principais que ocorrem na região, em geral com trend norte-sul, e que podem localmente aumentar as condutividades hidráulicas e condicionar principalmente o fluxo profundo de água subterrânea.

Diante disso, as condições de contorno de fluxo do presente estudo foram traçadas de forma a contemplar as principais ocorrências fisiográficas, hidrográficas e geológicas locais (Figura 2). O limite norte foi traçado passando na crista da Serra do Curral (Tipo 2 - Neumann), no contato geológico entre as Formações Cercadinho e Fecho do Funil, ambas compostas essencialmente de filitos que são formações geológicas com baixa vocação hidrogeológica e que selam as rochas dolomíticas da Formação Gandarela. Os limites oeste e sul foram traçados ao longo dos talwegues do Córrego Casa Branca e do Rio Paraopeba (Tipo 1 - Dirichlet), ambos medianamente caudalosos e que alimentam os principais aquíferos locais. O limite leste é condicionado por uma falha (Tipo 3 - Cauchy) classificada como indiscriminada por Lobato et al (2005).

4.2 Unidades Hidrogeológicas

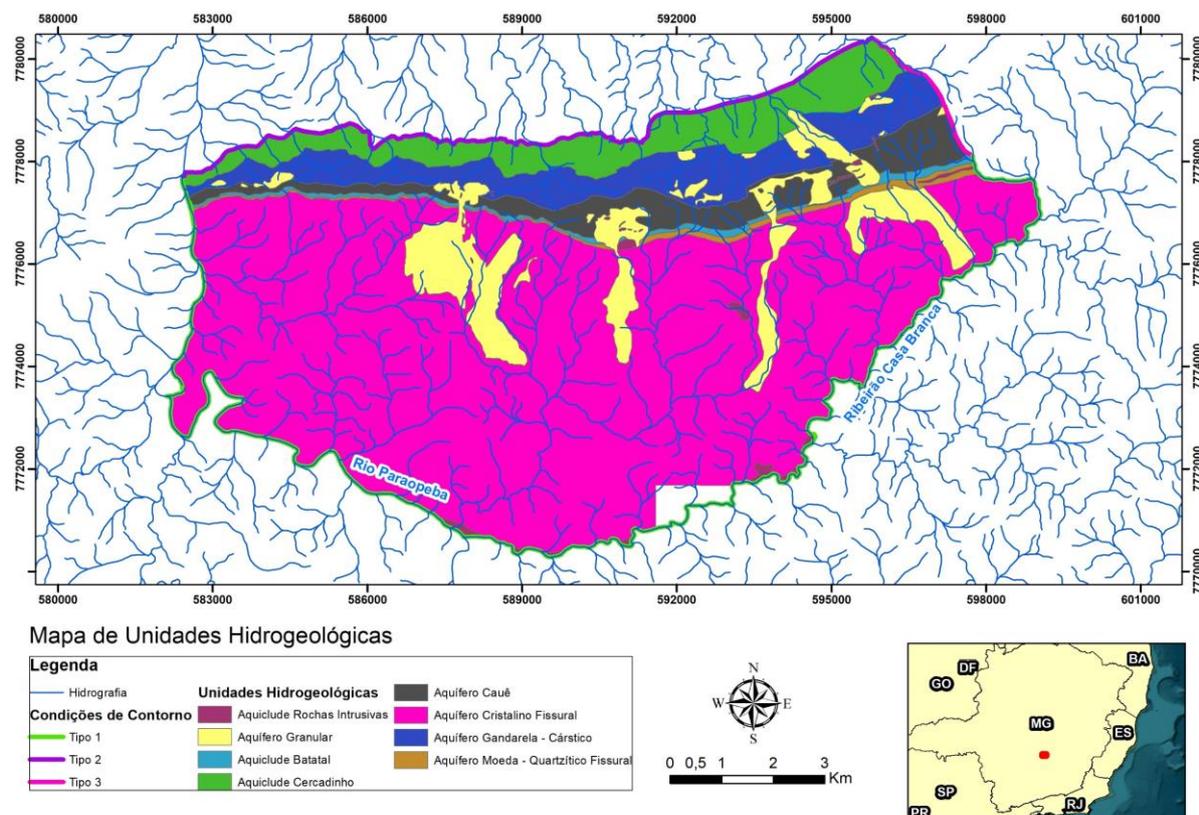
Aquíferos são definidos como unidades geológicas permeáveis, saturadas e que podem transmitir quantidades significativas de água sob gradientes hidráulicos (Freeze e Cherry, 1979). Ainda segundo os autores, aquícludes são unidades geológicas que são saturadas, no entanto são incapazes de transmitir quantidades significativas de água subterrânea. Para definir as unidades hidrogeológicas do presente estudo, utilizou-se esse conceito, levando em consideração as características das unidades litoestratigráficas, e reunindo aquelas com características semelhantes em unidades hidrogeológicas. Além disso, destaca-se a ocorrência de poços tubulares nas unidades aquíferas, o que permitiu a definição dos parâmetros hidrodinâmicos associados a cada unidade.

Foram, portanto, definidas cinco unidades hidrogeológicas, reunindo unidades litológicas com comportamento e características hidrogeológicas semelhantes. Destas, quatro são aquíferas e uma não aquífera: aquífero granular/fissural Cauê, aquífero granular de coberturas, aquífero gnáissico fissural, aquífero cárstico/dolomítico Gandarela e aquífero filítico representado pelas Formações Batatal e Moeda (Figura 2).

O aquífero Cauê representa o principal reservatório de água subterrânea do QF, sendo importante para o abastecimento de comunidades locais. Observa-se que essa unidade hidrogeológica

é confinada na base pelo aquíclode Batatal, ocorrendo no topo possível interconexão hidráulica com o aquífero Gandarela.

Figura 2: Condições de contorno e unidades hidrogeológicas da área de estudos (Modificado de Lobato et al., 2005).



4.3 Parâmetros Hidrodinâmicos

Dados de testes de bombeamento de 43 poços tubulares foram levantados para definição dos parâmetros hidrodinâmicos das 3 unidades aquíferas mais importantes da área de estudos: aquífero Cauê de dupla porosidade, aquífero cristalino fissural e aquífero Gandarela, predominantemente cárstico.

O aquífero Cauê apresentou condutividade hidráulica média de $2,79 \times 10^{-4}$ m/s, com valores variando de $7,7 \times 10^{-4}$ a $1,7 \times 10^{-6}$ m/s. O aquífero cristalino apresentou condutividade média de $1,44 \times 10^{-4}$ m/s, variando de $2,6 \times 10^{-4}$ a $8,16 \times 10^{-5}$ m/s. Acerca do aquífero Gandarela, obteve-se valores de condutividade variando de $1,33 \times 10^{-5}$ a $2,36 \times 10^{-7}$. Em se tratando de dados do parâmetro de transmissividade, observa-se valores médios de 11,63 m²/dia no cristalino, 20,41 m²/dia no Cauê e, 8,22 m²/dia no Gandarela. Finalmente, o coeficiente de armazenamento variou de 0,80 no Cauê, e 0,45 no cristalino.

4.4 Balanço de Massa

Para avaliação da pluviometria, foram levantados dados de 4 estações, de bases públicas de responsabilidade da ANA/CPRM, bem como da base de dados de processos de outorga do IGAM.

Tabela 1: Dados pluviométricos compilados para a área de estudos.

Código	Nome do posto	Fonte dos dados	Período de observação	Precipitação Média (mm/ano)	Área de Influência (Km ²)
2044053	Escola de Veterinária	ANA	1985 - 2020	1403,77	0,38
2044008	Melo Franco	ANA	1940 - 2020	1286,97	22,71
-	Córrego do Feijão	IGAM	1974 - 2020	1459,13	51,53

-	Jangada	IGAM	1996 - 2020	1409,48	29,01
---	---------	------	-------------	---------	-------

Conceitualmente, as áreas de recarga representam os topos das serras, onde predomina itabiritos da Formação Cauê, e fora da influência dos rebaixamentos. Ocorre ainda recarga importante nas zonas mais baixas, com menores declividades, e associadas a ocorrência de aquíferos cristalinos.

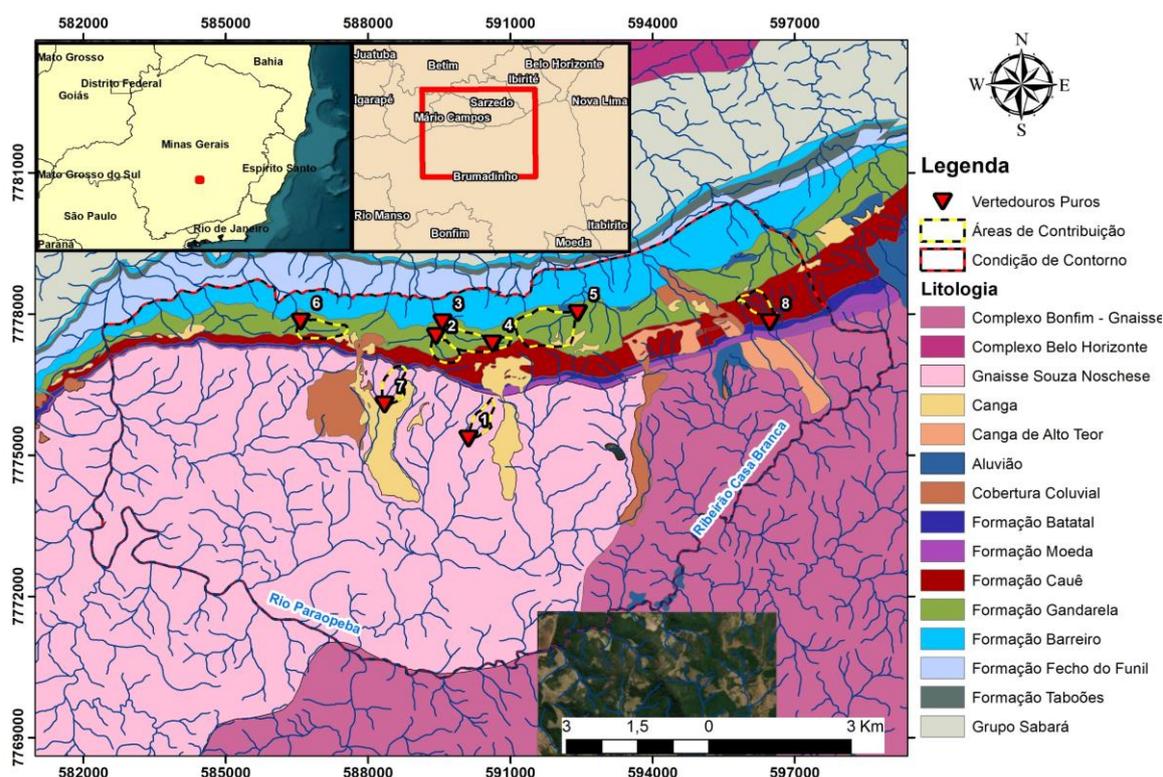
Para a definição da recarga foi realizada a compilação de dados de 9 estações fluviométricas na área de estudos, levantados do SIAM, e cujas áreas de contribuição drenassem somente por uma unidade aquífera específica. Com isso, objetivou-se a obtenção da recarga de cada unidade aquífera em separado.

Em cada posto fluviométrico procedeu-se a separação do escoamento de base lançando-se mão do método de filtro numérico recursivo de Eckhardt (2005), balizado por Collischonn e Fan (2012). Os dados compilados e tratados são expostos na tabela a seguir.

Tabela 2: Postos fluviométricos analisados no estudo.

Posto Fluvio.	Escoamento de base médio (m ³ /h)	BFI Máx	Área de Contribuição (Km ²)	Recarga (mm/ano)	Unidade Hidrogeológica
1	21,52	0,594	0,23	408,88	Cristalino
2	31,44	0,855	0,23	178,38	Gandarela
3	49,00	0,879	0,48	86,52	Gandarela
4	0,002	0,353	0,06	105,42	Gandarela
5	11,87	0,462	0,83	125,62	Gandarela
6	3,98	0,496	0,33	105,94	Gandarela
7	10,48	0,571	0,30	306,85	Cristalino
8	60,53	0,92	0,26	204,60	Cauê

Figura 3: Vertedouros puros utilizados na análise de descarga e recarga aquífera de cada unidade hidrogeológica.

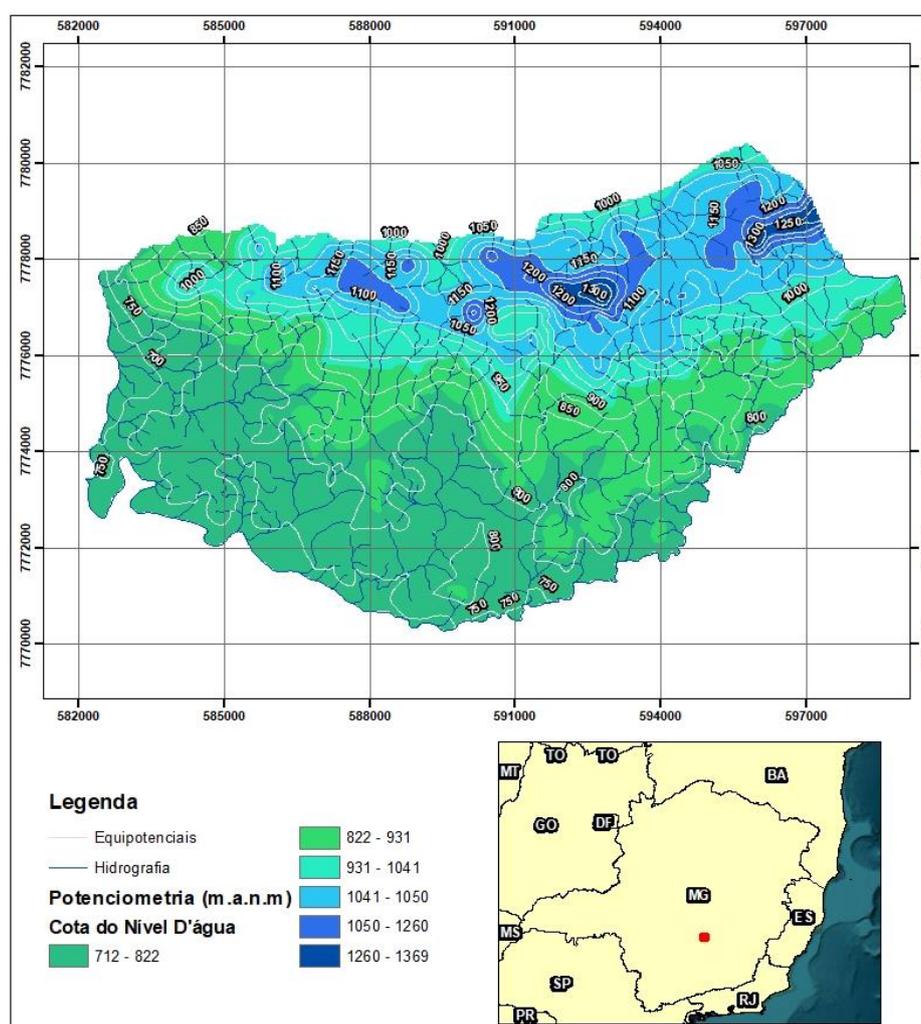


4.5 Piezometria e Potenciometria

Dados de piezometria das minas foram levantados de relatórios anuais de consolidação do monitoramento obtidos por pesquisas através do sistema integrado do Estado de Minas Gerais (SIAM). Além disso, foram usados dados de talvegues dos principais cursos d'água da região, para estimar as cotas de pontos de descarga subterrânea, para melhor executar o mapa potenciométrico desenvolvido para a área de estudos. O mapa foi confeccionado com dados de setembro/2018.

Observa-se que a Serra Três irmão e a Serra do Curral representam importantes divisores de águas superficial e subterrânea. Predomina a direção de fluxo subterrâneo das porções altas das serras em direção ao sul, ao talvegue do Ribeirão Casa Branca e ao Rio Paraopeba a leste, com cotas menos elevadas. Observa-se ainda a influência localizada do rebaixamento que era realizado em minas localizadas na região. Ocorre localmente aumento do gradiente hidráulico para sul, promovido pelas redes de bombeamento. Ocorre ainda reversão de fluxo na vertente norte da Serra do Curral, com fluxo subterrâneo no Gandarela, drenando preferencialmente para o norte. Na região sul da área, ocorre redução do gradiente hidráulico em direção aos leitos dos cursos d'água principais como o Ribeirão Casa Branca e Rio Paraopeba. A Figura 4 abaixo ilustra o mapa potenciométrico da área de estudos.

Figura 4: Mapa potenciométrico da área de estudos, confeccionado com os dados de monitoramento subterrâneo de setembro/2018, bem como dados de descarga em talvegues locais, e dados de níveis estáticos de poços tubulares.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou sintetizar as principais informações hidrogeológicas sobre a porção oeste do Homoclinal da Serra do Curral. Observa-se na área a ocorrência de três unidades hidrogeológicas principais: aquíferos Cauê, Gandarela e Cristalino, com parâmetros hidrodinâmicos variados, sendo o Cauê o principal reservatório de água subterrânea do Quadrilátero Ferrífero.

Os dados de escoamento superficial em cursos d'água permitiram estimar, a partir de separação dos escoamentos de base, a recarga aquífera das unidades hidrogeológicas, sendo o aquífero cristalino aquele que apresentou as maiores taxas de recarga.

A potenciometria mostrou grande influência das serras locais nos escoamentos subterrâneos, com grandes gradientes hidráulicos no contexto dessas serras por conta das altas declividades topográficas, bem como influência de poços de bombeamentos localizados na região. Observa-se grande fluxo do topo das serras para sul em direção aos talwegues do Rio Paraopeba e Ribeirão Casa Branca, e a norte reversão em direção às bacias de Belo Horizonte.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALKMIM, F.F.; MARCHAK 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*, 90:29-58. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301926898000321>>. Acesso em 25 jul. 2023.
- ALMEIDA, F.F.M., 1977. “*O Cráton do São Francisco*”. *Revista Bras. Geociências*. 7, p.349–364.
- ANDERSON, M.P; WOESSNER, W.W. (1992) “*Applied Groundwater Modeling— Simulation of Flow and Advective Transport*”. Academic Press, Inc., San Diego, CA, 381 p.
- ANDERSON, M.P; WOESSNER, W.W.; RANDALL, J.H. (2015) “*Applied Groundwater Modeling— Simulation of Flow and Advective Transport*”. 2nd edition. Academic Press, Inc., San Diego, CA, 381 p.
- BALTAZAR, O.F.; ZUCHETI, M. (2005). “*Geologia Estrutural. In: CPRM/SEMAD/CEMIG. Projeto Apa Sul RMBH - Estudos do Meio Físico: área de proteção ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte*”. Belo Horizonte. v.1. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Geologia%2C-Meio-Ambiente-eSaude/Projeto-APA-SUL-RMBH---Estudos-do-Meio-Fisico-1471.html>> . Acesso em: 25 jul. 2023.
- BALTAZAR, O. F.; LOBATO, L.M. (2020). “*Structural Evolution of the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: Influence of Proterozoic Orogenies on Its Western Archean Gold Deposits*.” *Minerals*, 10, 983. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/min10110983>>. Acesso em: 29 jul. 2023.
- BEATO, D.A.C., MONSORES, A.L.M., BERTACHINNI, A.C. (2006). “*Potencial aquífero nos metassedimentos do Quadrilátero Ferrífero – Região da APA Sul RMBH – MG*”. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Anais. Curitiba. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23106>>. Acesso em: 25 jul. 2023.
- CHEMALE JR. F., ROSIÈRE C.A., ENDO I. (1994). “*The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*”. *Precambrian Research*, Amsterdam, 65:25-54. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0301926894900981>>. Acesso em: 25 jul. 2023.
- COLLISCHONN, W.; FAN, F. 2012. “*Defining Parameters for Eckhardt's Digital Base Flow Filter*”. *Hydrological Processes*, 27 (18): 1614-1622. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.9391>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

COOPER, H.H., JACOB, C.E. (1946). “A Generalized Graphical Method for Evaluating Formation Constants and Summarizing Well Field History.” Transactions, American Geophysical Union, 27, 526-534.

DE PAULA R.S., MESQUITA D.C., DANTAS J.C.M., GUERRA K.J. 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. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28970>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

DORR, J.V.N. (1969). “Physiographic stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.” U.S. Geol. Survey Prof. Paper 614-A, USGS.

ECKHARDT K. 2005. “How to construct recursive digital filters for base flow separation”. Hydrological Process, 19: 507-515. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.5675>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

KRECIC, N. (2007). “Hydrogeology and Groundwater Modeling”. 2nd edition. CRC Press. 830p.

LANA, C.C.; ALKMIM, F.F.; ARMSTRONG, R.; SCHOLZ, R.; ROMANO, R.; NALINI, H.A. “The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil”. Precambrian Res. 2013, 231, 157–173. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301926813000946?via%3Dihub>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

LOBATO, L.M., BALTAZAR, O.F., REIS, L.B., ACHTSCHIN, A.B., BAARS, F.J., TIMBÓ, M.A., BERNI, G.V., MENDONÇA, B.R.V.D.E., FERREIRA, D.V., 2005. “Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa”. CODEMIG, Belo Horizonte, 2005. 1 CD-ROM. Disponível em: <http://www.codemig.com.br/wp-content/uploads/2016/08/nota_explicativa_qf.pdf>. Acesso em 25 jul. 2023.

MAGALHÃES, C.C.C.; MELO, M.C.; GUIGUER, N.; DE PAULA, R.S. (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.

MARCUZZO, F. F. N. (2017). “Bacias hidrográficas e regiões hidrográficas do Brasil: cálculo de áreas, diferenças e considerações”. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais. Florianópolis. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/18492>>. Acesso em 25 jul. 2023.

MOURÃO, M.A.A., LOUREIRO, C.O., ALKMIM, F.F. (2006). “O Aquífero Cauê na região metropolitana de Belo Horizonte, Quadrilátero Ferrífero, MG: procedimentos de investigação e análise”. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Anais. Curitiba. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23103>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

MOURÃO, M.A.A. (2007). “Caracterização hidrogeológica do Aquífero Cauê: Subsídios para a gestão de recursos hídricos no Quadrilátero Ferrífero”. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. pp. 297. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ENGD-7AJNZE>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

SABADINI, S. C., RUCHKYS, U. A., VELASQUEZ, L. N. M., TAYER, T. C. 2017. “Potencial de vulnerabilidade natural de aquíferos à contaminação no quadrilátero ferrífero, Minas Gerais e sua relação com a atividade minerária de ouro”. Caderno de Geografia. 27(49): 340-352. Disponível em: <<http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/p.2318-2962.2017v27n49p340>> Acesso em: 25 jul. 2023.

SANGLARD, J.C.D.; ROSIÈRE, C.A.; SANTOS, J.O.S.; MCNAUGHTON, N.J.; FLETCHER, I.R. (2014). “A estrutura do segmento oeste da Serra do Curral, Quadrilátero Ferrífero, e o controle tectônico das acumulações compactas de alto teor em Fe”. *Geologia USP: Série Científica*, 14, p.81-95. Disponível em: <<https://ppegeo.igc.usp.br/index.php/GUSPSC/article/view/4101>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

SILVA, A.F.P.; COTA, S.D. (2021). “Groundwater age dating using single and time-series data of environmental tritium in the Moeda Syncline, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil”. *Journal of South American Earth Sciences*. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981120305526>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

VITORINO, A.L.A.; SILVA, R.C.F.; LOBATO, L.M. (2020). “Shear-zone-related gold mineralization in quartz-carbonate veins from metamafic rocks of the BIF-hosted world-class Cuiabá deposit, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: Vein classification and structural control.”. *Ore Geology Reviews*. 127, 103789. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136819309965>>. Acesso em 25 jul. 2023.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da UFMG pelo apoio. Ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e à Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) pelo fornecimento de dados fundamentais para esta pesquisa, bem como apoio através do projeto de pesquisa 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”.