

AVALIAÇÃO DA CONECTIVIDADE HIDRÁULICA ENTRE OS AQUÍFEROS CÁRSTICOS NA REGIÃO APA CARSTE DE LAGOA SANTA E SUAS IMEDIAÇÕES, MG

EVALUATION OF HYDRAULIC CONNECTIVITY BETWEEN KARST AQUIFERS IN EPA KARST OF LAGOA SANTA REGION AND ITS SURROUNDINGS, MG.

Wallace Maciel Pacheco Neto ^{1*}, Gabriela Meira Teixeira ¹, Matheus Alonso Castelo Pena ¹, Pedro Henrique Pereira da Silva ¹, Gabriel Jubé Uhlein ¹, Leila Nunes Velásques Menegasse ¹, Rodrigo Sérgio de Paula ¹

¹Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG – Brasil. *autor correspondente, e-mail: wallacemaciel.geo@gmail.com

<https://doi.org/10.51359/1980-8208.2023.260090>

RESUMO

A Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa se localiza a norte de Belo Horizonte - MG e é uma das principais áreas de pesquisas relacionadas a arqueologia, paleontologia, espeleologia e hidrogeologia do território brasileiro. Pouco se sabe sobre a conexão desta região com suas imediações, sendo isto uma das motivações deste estudo, assim como os riscos que as áreas ao redor de um sistema cárstico conectado podem acarretar a uma área de proteção ambiental. O caráter hidrogeológico da pesquisa compreendeu a elaboração de um modelo de fluxo, com a descrição de quatro unidades hidrogeológicas, destacando o aquífero Cárstico-fissural da Formação Sete Lagoas como a unidade mais relevante da área. Os resultados sugerem que esta unidade, conecta a área de estudo e a área de proteção ambiental. Confirmou-se a conectividade hidrogeológica entre as regiões com a existência de dois compartimentos hidrogeológicos com níveis de carstificação distintos: Compartimento Bom Jardim e Compartimento Jequitibá. O compartimento Bom Jardim representa uma região mais carstificada do aquífero cárstico-fissural, que se estende além do domínio da APA Carste de Lagoa Santa, avançando até a área caracterizada por esse estudo, e é limitado pela zona de contato entre o embasamento cristalino e os calcários da Formação Sete Lagoas. Essa condição torna a área de estudo um local de recarga do aquífero cárstico-fissural que atua na dinâmica hidrogeológica existente na Área de Proteção de Ambiental.

Palavras-chave: APA Carste Lagoa Santa; unidades hidrogeológicas; conectividade hidrogeológica.

ABSTRACT

The Carste de Lagoa Santa Environmental Protection Area is located north of Belo Horizonte - MG and is one of the main research areas related to archeology, paleontology, speleology and hydrogeology in the Brazilian territory. Little is known about the connection of this region with its surroundings, which is one of the motivations of this study, as well as the risks that the areas around a connected karst system can cause to an environmental

Recebido em 25/02/2023. Aprovado em 22/06/2023. Publicado on-line em 30/10/2023



Este artigo está sob uma [Licença Creative Commons 4.0 Internacional - CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

protection area. The hydrogeological character of the research included the elaboration of a flow model, with the description of four hydrogeological units, highlighting the Karstic-fissural aquifer of the Sete Lagoas Formation as the most relevant unit in the area. The results suggest that this unit connects the study area and the environmental protection area. The hydrogeological connectivity between the regions was confirmed with the existence of two hydrogeological compartments with different levels of karstification: Bom Jardim Compartment and Jequitibá Compartment. The Bom Jardim compartment represents a more karstified region of the karst-fissural aquifer, which extends beyond the domain of the Lagoa Santa Karst APA, advancing to the area characterized by this study, and is limited by the contact zone between the crystalline basement and the limestones of the Sete Lagoas Formation. This condition makes the study area a place of recharge of the karst-fissural aquifer that acts on the hydrogeological dynamics existing in the Environmental Protection Area.

Keywords: APA Karst Lagoa Santa; hydrogeological units; hydrogeological connectivity.

1. INTRODUÇÃO

Localizada a norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG, a Área de Proteção Ambiental (APA) Carste Lagoa Santa representa uma das principais áreas de pesquisas relacionadas a arqueologia, paleontologia, espeleologia e hidrogeologia do território brasileiro (DA-GLORIA; NEVES; HUBBE, 2017). Marcada pelo turismo de grutas, a região é mundialmente conhecida por abrigar diversos sítios arqueológico, entre os quais foi encontrado o fragmento de esqueleto humano mais antigo das Américas, um crânio com cerca de 11 mil anos apelidado de Luzia (FEATHERS et al., 2010). Dessa forma, a compreensão dos fatores geológicos e hidrogeológicos acrescenta conhecimento a essa área de rica diversidade científica e cultural e que hoje representa um dos principais vetores de crescimento demográfico da região metropolitana de Belo Horizonte.

O termo carste é usado para descrever um estilo característico de paisagem, marcada por sistemas de águas subterrâneas desenvolvidas em rochas solúveis (FORD & WILLIAMS, 2007). Os aquíferos cársticos possuem

muitas características que os diferem daqueles formados pelos outros tipos de rochas. No geral apresentam forte heterogeneidade e anisotropia relacionada à diversificada distribuição de condutos (WORTHINGTON & FORD, 2009), o que pode acarretar grande variação na direção de fluxo em relação ao nível de base regional (MANOEL FILHO, 2008). O armazenamento e o fluxo subterrâneo da região são condicionados pela rede de condutos parcialmente conectados a superfícies de surgências, dolinas e cavernas (GALVÃO et al., 2016).

A área de estudo apresenta 201 km² e se localiza a sudeste da cidade de Sete Lagoas – MG. Sua relação com a Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa ocorre ao longo da faixa sudeste (Figura 1) em que ambas regiões se coincidem. Diante disso, a análise hidrogeológica da região acrescenta um arcabouço teórico e referencial aos estudos existentes na área da APA, principalmente se for comprovada a contribuição da área para a dinâmica hídrica do sistema da APA por meio da conectividade hidrogeológica das regiões.

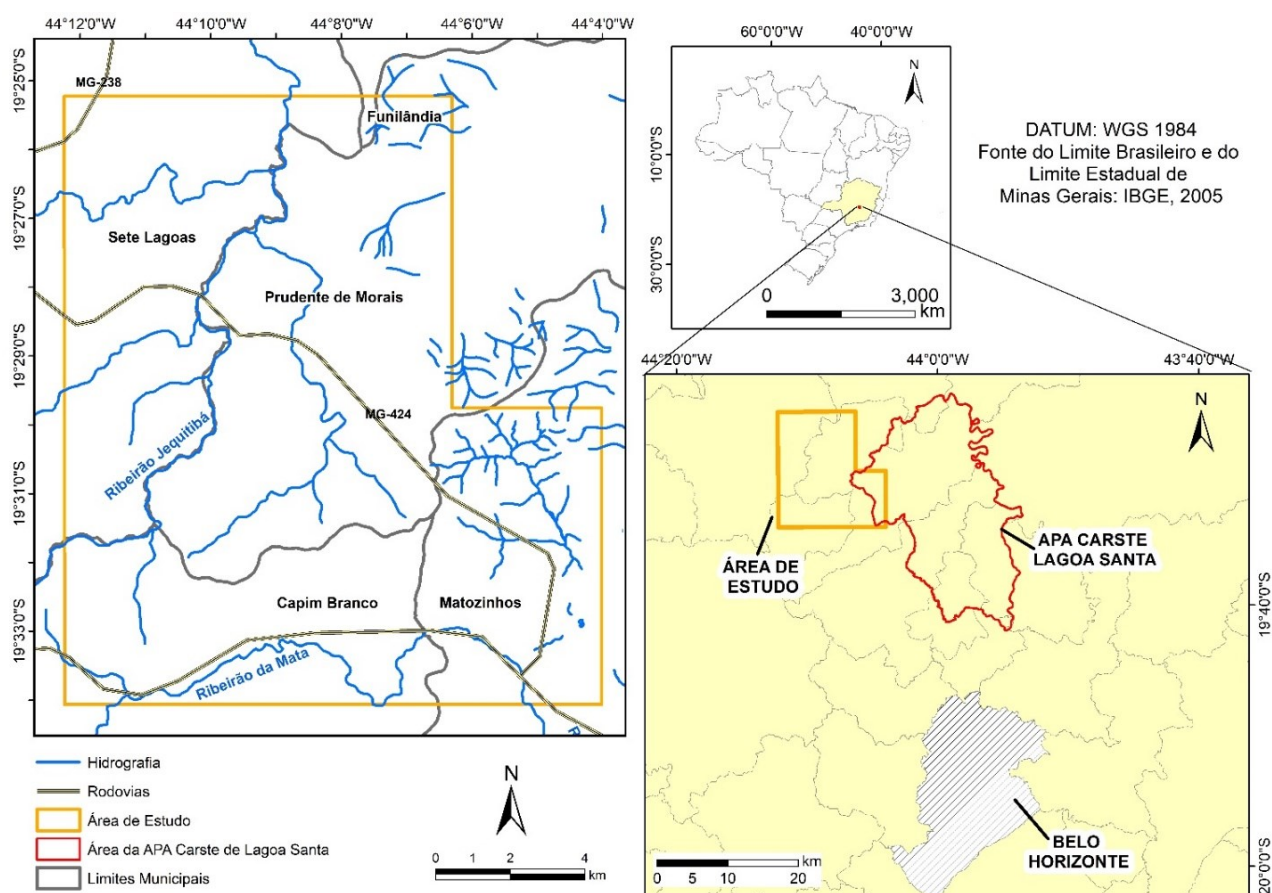


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo. O polígono em amarelo compreende a área estudada, e o polígono em vermelho trata-se da região da APA Carste de Lagoa Santa.

A região é geologicamente caracterizada por rochas pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí, que se assentam sobre rochas graníticas, gnáissicas e migmatíticas do Complexo Belo Horizonte (ALKMIM, 2004). A compreensão da relação entre as diversas litologias, estruturas e morfologia que ocorrem na região é fundamental para a análise do fluxo hídrico subterrâneo. Tendo isso em vista, as considerações acerca da dinâmica hidrogeológica da área de estudo e da APA, a possibilidade de conexão e/ou formação de um sistema único, a vulnerabilidade dos aquíferos cársticos evoluídos, com rápida recarga e descarga, aliada à possibilidade de degradação do patrimônio arqueológico, espeleológico e cultural frente aos crescentes empreendimentos industriais e imobiliários fazem dessa região uma

importante frente de pesquisas ambientais.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo investigar a existência de condições hidrogeológicas propícias a conexão hidráulica subterrânea entre o sistema aquífero da região sudeste de Sete Lagoas e a Área de Proteção Ambiental (APA) Carste Lagoa Santa, a partir da caracterização das hidrogeológicas, condições de contorno, balanço hidroclimatológico e dados de poços tubulares. Sendo portanto uma avaliação conceitual sem resultados computacionais de fluxo.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

A Geologia da área se insere na porção sul do Cráton São Francisco, na qual assentam-se rochas arqueanas do

embasamento gnáissico-migmatítico do Complexo Belo Horizonte, sobreposto pelas sequências metassedimentares e peliocarbonáticas neoproterozoicas do Grupo Bambuí (ALMEIDA, 1977; DARDENNE, 1978; ALKMIM, 2004). Na área, o Grupo Bambuí representa a deposição neoproterozoica da porção central da bacia por meio das Formações Sete Lagoas e Serra do Santa Helena, além das coberturas cenozóicas e quaternárias compostas por coberturas detrítico-lateríticas e aluvionares (RIBEIRO et al., 2013).

As rochas do embasamento, apresentam composição essencialmente granito-gnáissica e migmatítica. A Formação Sete Lagoas é subdividida em dois membros: Membro basal Pedro Leopoldo e Membro de topo Lagoa Santa (RIBEIRO et al., 2003; UHLEIN et al., 2018). Os litotipos que caracterizam o Membro Pedro Leopoldo são: calcissiltitos e/ou microesparitos/esparitos, micritas, subordinamente calcarenitos muito finos, margas e milonitos protoderivados (RIBEIRO et al., 2003), já o Membro Lagoa Santa apresenta maior expressão na área e litologicamente trata-se de um calcário puro ou majoritariamente puro, cinza-escuro a preto quando “fresco” e cinza médio a claro quanto mais alterado, de granulometria variando de fina a grossa (RIBEIRO et al., 2003).

A Formação Serra de Santa Helena ocorre tipicamente na serra homônima em Sete Lagoas, estendendo-se a norte da área de estudo. Nesta formação predominam litótipos de origem siliciclástica e mais raramente sedimentos carbonáticos. Os sedimentos de gênese siliciclástica, predominantemente muito finos, correspondem a siltitos e argilitos, em grande parte decompostos a semi-alterados (RIBEIRO et al., 2013). As coberturas cenozóicas estão presentes em formas de capas de alteração, limonitizadas e/ou representando colúvios de solos ferruginosos laterizados. Há ocorrência ainda de terraços aluviais e

aluviões nas regiões que margeiam os principais córregos.

A Geomorfologia da área é reflexo das estruturas e alterações intempéricas das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas e dos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena. Essa relação litológica está refletida nitidamente nas características morfológicas de superfície.

Neste trabalho, optou-se pela divisão realizada por KOHLER (1989), que descreve dois compartimentos geomorfológicos: um sob domínio cárstico e outro sob domínio não-cárstico. O domínio não-cárstico, controlado por rochas cristalinas e metamórficas, está presente na porção centro sul da área e é onde afloram as rochas do complexo Granítico-Gnáissico do Arqueano. O domínio de rochas carbonáticas é marcado por altos paredões rochosos, desfiladeiros e abismos, dolinas de abatimento que ligam o exocarste ao endocarste, presente na faixa leste e central da área. Existe ainda uma parte deste domínio que é encoberta pelos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena, que apresentam relevo aplainado e está localizada a norte da área.

A Hidrogeologia na área é definida em quatro unidades hidrogeológicas. Verifica-se, da base para o topo: o aquífero fissural que compreende as rochas cristalinas do Complexo Belo Horizonte; o aquífero cárstico-fissural formado pelas rochas carbonáticas Formação Sete Lagoas; o aquífero que compreende as rochas pelíticas da Formação Serra de Santa Helena; e os aquíferos porosos formados pelas coberturas detrítico-lateríticas e cenozóicas aluvionares. O aquífero fissural é classificado como pobre, de baixa produtividade, enquanto o aquífero cárstico-fissural apresenta boa produtividade. O aquífero que apresenta baixa permeabilidade e é marcado por faltas de entradas d'água, não apresentando dados correspondentes à

sua produtividade. Por sua vez, as unidades de cobertura correspondem às coberturas detrítico-lateríticas e aluvionares que atuam preferencialmente como zonas de recarga para os aquíferos subjacentes (DE PAULA et al., 2020).

A Hidrografia na área é dividida em duas sub-bacias principais, a bacia do ribeirão Jequitibá e do ribeirão da Mata, ambas afluentes do rio das Velhas pela margem esquerda. A bacia do ribeirão da Mata configura-se numa drenagem superficial na porção sul. Seu escoamento ocorre no sentido oeste-leste, tomando direção NW-SE em direção ao rio das Velhas, e margeia a faixa oeste da APA Carste de Lagoa Santa. O ribeirão Jequitibá configura-se no mais importante corpo hídrico que escoar na porção norte da área, o qual adentra o município de Sete Lagoas.

Destacam-se ainda a bacia hidrográfica do córrego Palmeiras na porção leste da área, já inseridas dentro dos limites da APA Carste de Lagoa Santa. O córrego Palmeiras desagua, nessa porção, em um sumidouro e retorna nas ressurgências Mocambo e Jaguará (região da APA Carste de Lagoa Santa). Segundo AULER (1994) e DE PAULA (2019), a surgência de Bom Jardim está inserida nesta bacia, contudo sua abrangência se estende para além dos limites da APA Carste de Lagoa Santa.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Levantamento de Dados: os dados primários foram levantados a partir de um mapeamento geológico e hidrogeológico em escala 1:50.000, desenvolvido no período entre o segundo semestre de 2019 e fevereiro de 2020. Os trabalhos de campo totalizaram 21 dias e foram descritos 169 pontos no interior da área de estudos com o objetivo de caracterizar os litotipos, os aspectos geo-estruturais, as relações de contato e os aspectos geomorfológicos existentes na região.

O levantamento de dados secundários consistiu em pesquisa bibliográfica para o conhecimento teórico acerca do contexto geológico e hidrogeológico. As fotografias aéreas utilizadas possuem escala 1:60.000, e foram disponibilizadas pela CPRM. A base topográfica utilizada corresponde a um modelo digital de elevação do terreno, gerado a partir da imagem de satélite ALOS PALSAR, com resolução de 12,5 metros (JAXA, 2008).

Os dados dos 86 poços tubulares utilizados foram obtidos por intermédio da consulta ao Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) pertencente à CPRM, e ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Os dados de precipitação e de temperaturas referentes ao ano hidrológico de outubro de 2018 a setembro de 2019 foram utilizados para os cálculos de balanço HidroClimatológico, estes dados foram disponibilizados pela plataforma digital do INMET. A estação de referência está localizada em Sete Lagoas (A569 - Código: OMM: 8670).

Unidades Aquíferas: MILLER (1999) define unidades hidrogeológicas a partir dos limites físicos que delimitam o fluxo d'água subterrâneo por meio da individualização das unidades geológicas que permitem a produção de água através de poços. Diversas características são necessárias para singularizar estas unidades, como dados de cotas de entrada d'água, dados de capacidade específica, estratigrafia dos pacotes geológicos da região, entre outros. O mapeamento geológico realizado e as descrições geológicas dos poços tubulares obtidos junto ao SIAGAS foram empregados na construção de perfis hidrogeológicos, estes perfis representam a superfície do terreno e o nível do aquífero, além da estimativa das espessuras das unidades geológicas.

Nesta etapa foram determinadas as condições de contorno de fluxo nulo que circundam a área de estudo. As condições

de contorno de fluxo nulo são estruturas que definem quantitativamente os domínios de um modelo hidrogeológico de fluxo. Em geral, são definidas por porções em que a carga hidráulica das drenagens superficiais não se configura como zonas de descarga do meio subterrâneo, ou por fatores em que os compartimentos geológicos são capazes de criar barreiras hidráulicas para o sistema aquífero. Essa determinação foi importante para limitar ou não, o contato entre a região de estudo e a APA Carste de Lagoa Santa.

Posteriormente, foi utilizado o programa *Aquífer Test* a partir de dados de ensaio de bombeamento e recuperação para cada um dos 86 poços disponíveis no SIAGAS. Esclarece-se que esses parâmetros foram obtidos utilizando-se dois métodos; HVORSLEV (1951) para obtenção do parâmetro Condutividade Hidráulica (K) e COOPER et al. (1967) para obtenção da Transmissividade (T) e Armazenamento (S). Vale ressaltar que não existem métodos específicos para aquíferos cársticos, ainda que os métodos apresentados tenham sido concebidos para aquíferos homogêneos, é possível aplicar os métodos para obtenção de Transmissividade e Armazenamento em aquíferos cársticos, utilizando o valor modal para melhor representação da anisotropia e heterogeneidade do sistema. Os resultados obtidos serão comparados com referências do carste regional, com valores que representam a região obtidos em estudos anteriores (GALVÃO, 2016; DE PAULA, 2019). Ressalta-se que os poços utilizados, apesar de se encontrarem no aquífero carbonático, podem receber água das unidades limitantes, e originar poços mistos (poços que extraem água de mais de uma unidade hidrogeológica).

A partir da análise dos contornos impermeáveis ou semipermeáveis e os parâmetros hidrodinâmicos, foi possível classificar as unidades hidrogeológicas e suas respectivas características

hidrológicas que serão utilizadas para definir compartimentos hidrogeológicos da área de estudos e consequentemente avaliar suas relações de fluxo com o sistema aquífero da APA.

Análise de Conectividade: para avaliar a análise de conectividade de fluxo entre a área de estudo e área adjacente, foram analisadas as entradas e saídas do sistema, assim como a relação do fluxo subterrâneo. Para estimativa das entradas e saídas, adotou-se a metodologia desenvolvida por THORNTHWAITE & MATHER (1955) para calcular a evapotranspiração real e potencial, definindo o excedente hídrico que escoar superficialmente ou infiltra no solo. Utiliza-se para o cálculo do balanço hídrico a planilha eletrônica desenvolvida por ROLIM et al. (1998), por onde carrega-se todos os dados de entrada para o cálculo da Evapotranspiração Potencial (ETP), do Excedente Hídrico (EXC) e do Déficit Hídrico (DEF). A evapotranspiração potencial (ETP), refere-se à perda máxima de água do sistema (evaporação e transpiração vegetal), e representa um limite superior ou igual ao da evapotranspiração real (ETR).

Para avaliação do fluxo de água subterrânea foi elaborado um mapa potenciométrico para definição de zonas de descarga, recarga e sentido do fluxo principal e secundários, além de áreas com maior ou menor transmissividade. As curvas equipotenciais foram obtidas a partir dos níveis estáticos de poços tubulares disponíveis na área. Foram utilizados dados dos anos 2018 e 2019 de imagens PALSAR.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização das Unidades Hidrogeológicas: conforme apresentados nos métodos, as unidades hidrogeológicas foram definidas com base na classificação geológica e pelos parâmetros hidrodinâmicos obtidos nos testes de recuperação dos poços

tubulares com dados no SIAGAS. Após avaliação dos contornos impermeáveis da área, foi avaliado o grau de conexão do sistema hidrogeológico cárstico-fissural.

O aquífero fissural, aflora até a parte central da área de estudo (Figura 2), esta unidade ocupa cerca de 20% da área e aflora nas cotas de 750 m até 900 m. O aquífero cárstico-fissural compreende 61% da área de estudo (Figura 2) e é compreendido pelas rochas Formação Sete Lagoas, apresentando espessura média de 45 m. Pode chegar a espessuras superiores a 60 m na região de ocorrência do Membro Pedro Leopoldo, e até 80 m nas regiões de ocorrência do Membro Lagoa Santa (pontualmente, pode alcançar espessuras de até 120 m). Essa unidade apresenta média dos valores de capacidade específica dos poços três vezes maior que a mediana (Tabela 1), o que expõe o caráter anisotrópico desta unidade aquífera. DE PAULA et al. (2020), em área adjacente, credita essa anisotropia a diferentes compartimentações verticais, em que um dos critérios de separação é a capacidade específica de poços.

O aquífero sobreposto ao aquífero cárstico-fissural compreende cerca de 14% da área (Figura 2) com espessura média de 100 m. DE PAULA (2019) classificou a unidade como um aquífero devido à falta de entradas d'água ou registro de nível d'água nos perfis dos poços tubulares que atravessam essa litologia. Este trabalho não encontrou nenhum dado correspondente à produtividade exclusiva desta unidade, portanto, adota-se a classificação do autor supracitado. Os aquíferos granulares ocupam cerca de 5% da área de estudo com espessura variando de 10 a 30 m. De

modo geral, essa unidade se distribui em pequenas faixas na área de estudo, e funciona como um aquífero raso para abastecimento de um sistema freático, e/ou um aquífero suspenso quando localizada diretamente sobre o aquífero. Esta unidade pode ainda funcionar como uma região de recarga para os aquíferos sotopostos.

A unidade Aquífera Cárstica Fissural Sete Lagoas foi definida como a principal responsável pela dinâmica regional de água subterrânea. Para esta unidade, foram definidas as regiões de fluxo nulo e suas condições de contorno para o melhor entendimento das fronteiras hídricas que esta unidade pode apresentar.

O Ribeirão da Mata funciona como um corpo d'água de fluxo de base para a região, por impedir o fluxo de água subterrânea para sul da área (Condição Tipo I – Dirichlet), apresentando carga constante e funcionando como uma barreira hidrológica. O Aquífero fissural apresenta baixo potencial hidrogeológico em comparação ao aquífero cárstico-fissural e atua como uma condição de fluxo nulo (Condição Tipo II – Neuman, apresentando um fluxo constante) no terceiro quadrante da área (Figura 2). Localmente, o aquífero fissural pode alimentar o aquífero cárstico-fissural, especialmente em regiões de contato litológico. O limite leste da área com o limite da APA não apresenta barreiras impermeáveis ou semi-permeáveis, proporcionando a continuidade de fluxo subterrâneo entre as áreas, sendo classificada como uma condição de contorno do tipo III – Cauchy, apresentando uma carga indeterminável, e seu fluxo dependente da carga.

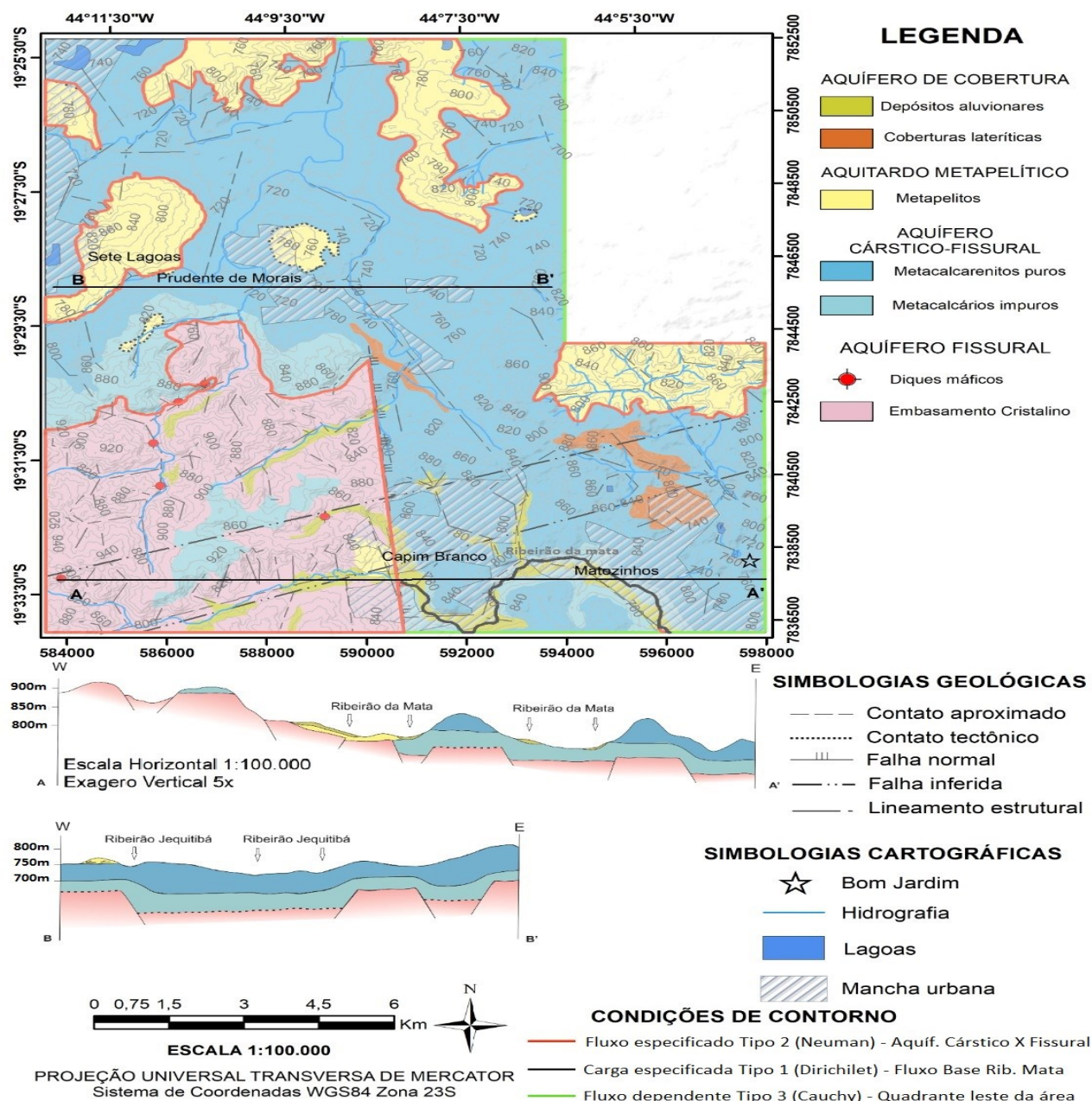


Figura 2. Mapa das unidades hidrogeológicas com destaque para as condições de contorno existentes na área de estudo.

A partir da denominação das unidades aquíferas e dos poços tubulares analisados na região, foram determinados os parâmetros hidrodinâmicos das unidades, como sintetizado na tabela 1.

Análise de Conectividade: para avaliar a conectividade inicialmente foi aplicado o balanço climatológico, considerando um CAD (Capacidade de Água Disponível) de 248 mm, calculado anteriormente por VIANA et al. (1998), e o

total de chuva precipitada no ano hidrológico de 2019/2020 (1333.2 mm), que equivale ao total de entrada d'água para o sistema. Dessa forma, o balanço retornou uma evapotranspiração potencial equivalente a 80,7% do total precipitado. A média de armazenamento no solo (ARM) ao longo ano foi de 185,5 mm, e o excedente hídrico resultou um valor de 386,2 mm, 29% da precipitação anual.

Tabela 1. Unidades hidrogeológicas com base na geologia da área e dados dos poços tubulares.

Unidade Hidrogeológica	Geologia	Poços na área	Parâmetros de aquíferos e poços	Classificação
Aquífero Fissural	Complexo Belo Horizonte	Um poço com entrada d'água em rocha cristalina, dois poços com entrada d'água na região de contato entre o embasamento e o calcário sobreposto, e dois poços mistos	Média menor que 1 m ³ /h/m e mediana de 0,215 m ³ /h/m. Vazão Específica para teste de bombeamento de 24h	Aquífero fissural pobre de baixa produtividade
Aquífero Cárstico-fissural	Formação Sete Lagoas	Treze poços com entrada d'água exclusiva no calcário e mais 20 poços mistos utilizados para cálculos (K, S T) sobre a litologia dos carbonatos	Média de 9,21 m ³ /h/m e mediana de 3,10 m ³ /h/m. Vazão Específica para teste de bombeamento de 24h. Valores medianos de K 4,08 x 10 ⁻⁷ m/s T 3,82 x 10 ⁻⁴ m ² /s e S 2,25 x 10.	Aquífero cárstico-fissural de alta produtividade
Aquitardo	Formação Serra de Santa Helena	Nenhum poço	-	-
Aquíferos Granulares	Coberturas cenozóicas e quaternárias	Um poço com entrada d'água nas formações de cobertura	0,57 m ³ /h/m. Vazão Específica para teste de bombeamento de 24h	Aquífero granular de baixa produtividade

Com base no balanço hídrico realizado na área e nos dados obtidos por DE PAULA & VELÁSQUEZ (2019) na área

vizinha, obteve-se os valores para o Escoamento subterrâneo, recarga e descarga da área do trabalho (Tabela 2).

Tabela 2. Extrato do balanço hídrico da área de estudo para o ano hidrológico de 2019/2020.

	(mm/ano)	% da Pluviometria
Pluviometria	1333,2	100,00%
Escoamento Subterrâneo	228,4	17,13%
Escoamento Total	251	18,83%
Recarga	178,8	13,41%

Destaca-se que o valor de recarga obtida foi de 13,4% da pluviometria total, valor próximo ao calculado por outros autores na região cárstica do Bambuí. Os valores de descarga mostram a forte influência da água subterrânea para o sistema superficial, fato atestado pelo

17,13% de escoamento subterrâneo obtido.

De posse do balanço hídrico, a segunda etapa consiste na realização do mapa da superfície potenciométrica do aquífero fissural e cárstico-fissural (Figura 3). Percebe-se que existem dois sentidos

principais de fluxo subterrâneo: um fluxo regional para leste, na região sul do mapa em direção ao rio das Velhas, e um fluxo local, com sentido para N-NE, na porção centro-norte do mapa, em direção ao ribeirão Jequitibá. O fluxo principal flui em direção ao rio das Velhas (nível de base da região), e se conecta com a APA

Carste de Lagoa Santa. Ainda nessa porção, observa-se uma inflexão das curvas potenciométricas em direção ao córrego Palmeira (Figura 3) que pode indicar a existência de estruturas que concentram e direcionam a água, e uma relação com falhas regionais de direção E-NE (Figura 2).

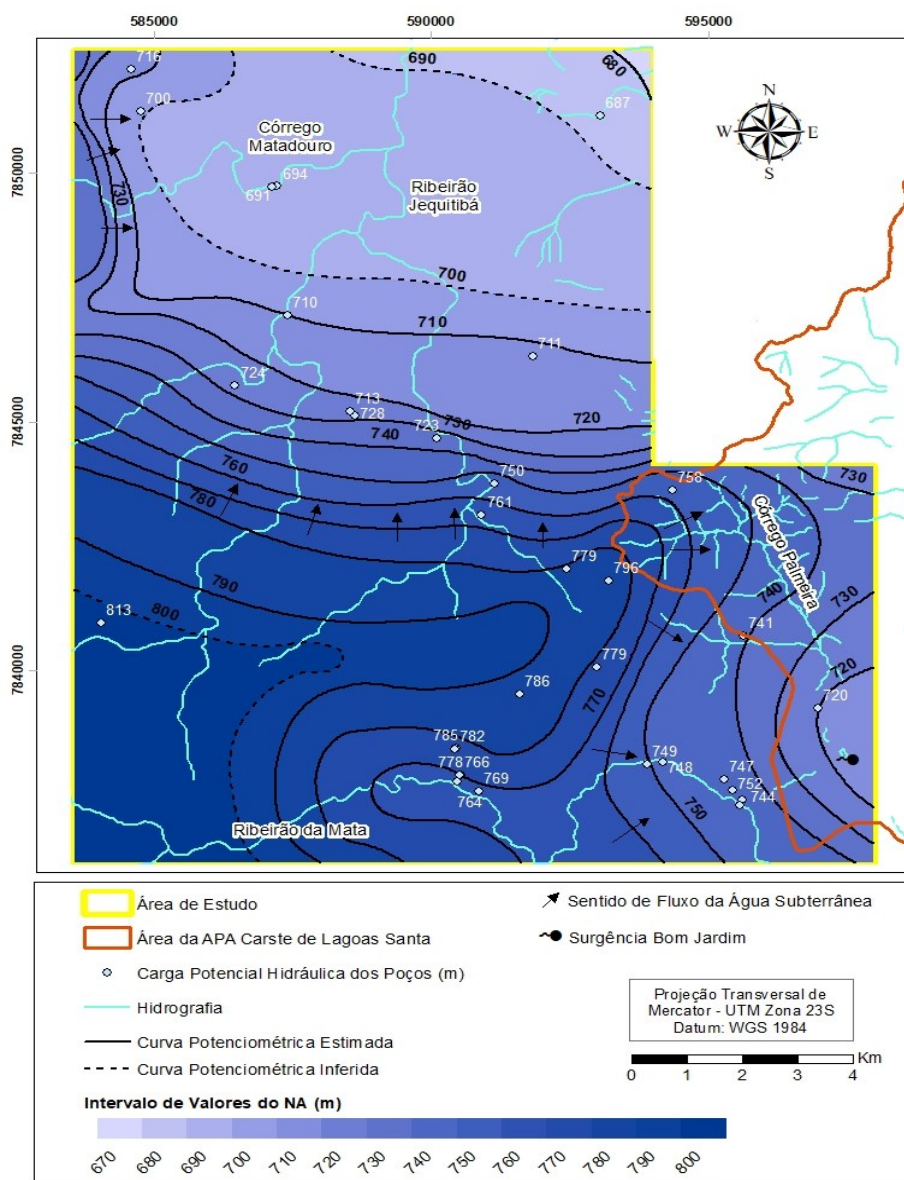


Figura 3. Mapa potenciométrico da área de estudo.

Na região sul, destaca-se a convergência das equipotenciais em direção à surgência Bom Jardim e acredita-se que ela esteja sendo alimentada por parte desse fluxo. Além disso, a convergência das curvas próxima ao ribeirão da Mata aponta o

comportamento efluente do ribeirão nessa porção. O fluxo na região a norte, por sua vez, tem relação direta com o ribeirão Jequitibá, e a direção de inflexão das curvas potenciométricas indica que o ribeirão é efluente, porém há baixa drenança entre a água superficial e a

subterrânea. Isso porque a inflexão das curvas nessa porção é muito suave. Por último, percebe-se que existe uma região de inflexão das curvas potenciométricas, a norte, entre o córrego do Matadouro e ribeirão Jequitibá.

A partir dos dados expostos anteriormente, foi definida os compartimentos hidrogeológicos da área de estudo e conseqüentemente a sua conexão com a região da APA.

Com base na potenciomетria, foram definidas dois compartimentações laterais no Aquífero Cárstico-Fissural: o Compartimento Cárstico-Fissural

Jequitibá posicionado ao norte da área e o Compartimento Cárstico-Fissural Bom Jardim posicionado a sudeste. Além destes, com intuito de delimitar a região externa ao sistema carbonático, foram delimitados os compartimentos referentes às condições de contorno do aquífero cárstico; como Compartimento Fissural Cristalino, Compartimento Aquitardo Metapelítico e Compartimento Fissural Externo Ribeirão da Mata. Em seguida, baseado no balanço hídrico, foram calculadas as entradas e saídas hidrológicas dos compartimentos cársticos-fissurais (Tabela 3).

Tabela 3. Entradas e saídas hidrológicas para o compartimento cárstico-fissural.

Compartimentos hidrogeológicos	Área (km ²)	*Vazão precipitada na bacia (m ³ /h)	Vazão de contribuição no escoamento Total m ³ /h)
Compartimento Cárstico-Fissural Jequitibá	85,72	13045,88	2456,13
Cárstico-Fissural Bom Jardim	33,67	5124,3	964,75
Total	119,39	18170,18	3420,88

O Compartimento Cárstico-Fissural Bom Jardim se destaca por possuir a surgência homônima (Figura 4), vale ressaltar que a bacia, denominada Bom Jardim, de fluxo para leste, descarrega na surgência Bom Jardim, sendo a conexão comprovada pela relação de escoamento total produzida na bacia (Tabela 3) e vazão da surgência. Recentemente, a surgência foi alvo de estudos de conexão hidráulica e recarga feitos por DE PAULA (2019) e por VELÁSQUEZ et al. (2019). Tais autores definiram a surgência como uma feição de recarga importante do aquífero cárstico-fissural da APA. Diante disso e do trabalho até aqui apresentado, foi possível caracterizar esse compartimento com fluxo subterrâneo predominante para ESE em direção a APA, sentido à surgência Bom Jardim. O que é observado neste trabalho também é que a surgência Bom Jardim é uma descarga da bacia de mesmo nome.

Chama a atenção as avaliações de cota de entrada d'água e parâmetros hidrodinâmicos dos poços nessa área. As cotas de entrada d'água apresentaram grandes variações (entre 764 m e 691 m) e a capacidade específicas dos poços ordens de grandeza diversas (entre 0,21 m³/h/m e 35 m³/h/m). Além disso, fortes gradientes hidráulicos obtidos pelo mapa potenciométrico são posicionados nessa região. Tais fatores sugerem que o Compartimento Cárstico-Fissural Bom Jardim é uma área afetada estruturalmente por falhas (Figura 2) e, portanto, uma zona de maior permeabilidade. Essa estrutura condicionou uma zona preferencial de percolação das águas subterrâneas que, associado ao processo de dissolução das rochas carbonáticas, desenvolveu condutos e cavernas. A produtividade dos poços e a alta vazão da Surgência Bom Jardim reforçam carstificação desenvolvida nesse local.

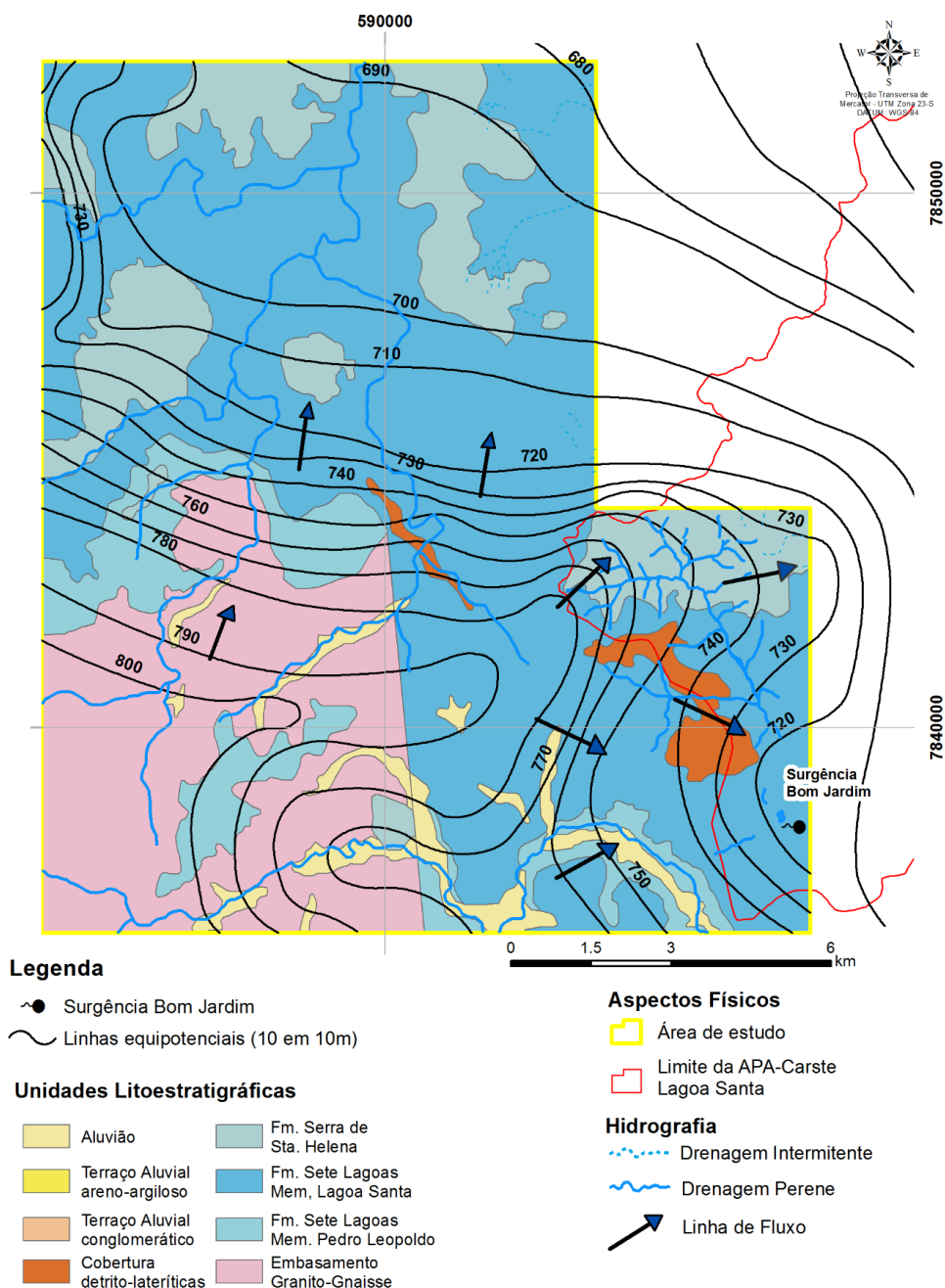


Figura 4. Mapa de compartimentos hidrogeológicos, com base no sentido do fluxo, com destaque para a surgência Bom Jardim (extremo leste da área) localizada na região da APA Carste de Lagoa Santa.

A partir da área, do escoamento total (Tabela 3) e do balanço hídrico (Tabela 2), foi possível estimar a vazão produzida para recarga deste compartimento e comparar com a vazão da nascente homônima. Ao comparar os valores de vazão recarregada nesse compartimento (687,24 m³/h, vide Tabela 3) à vazão obtido por Auler (1994), de 600 m³/h, tem-se que 89% da água

subterrânea recarregada no compartimento descarrega na Surgência Bom Jardim, assim como essas águas contribuem como recarga alóctone para região da APA a oeste, o que, alinhada com as condições de fluxo e contextos geológicos, ressalta a conexão hidráulica entre esse compartimento e as bacias hidrogeológicas definidas por DE PAULA (2019) e VELÁSQUEZ (2019).

Os perfis hidrogeológicos, foram confeccionados sobre a potenciometria e contatos geológicos da área de estudo e área a oeste, denominada APA Carste de Lagoa Santa, com o objetivo de mostrar a conexão entre as áreas (Figura 5). Assim como delimitar a bacia Bom Jardim e sua conexão com a surgência de Bom Jardim (presente na APA).

O mapa de isóbatas do embasamento indica que há continuidade do Complexo Belo Horizonte para o sentido leste, em direção à APA. Percebe-se que há um alto topográfico de direção E-NE ao sul das duas áreas e que o embasamento se aprofunda para leste e também para norte. A ausência de poços com perfis geológicos que alcançasse o embasamento, e também ausência de afloramentos nas regiões ao norte, dificultaram a análise nessa porção do mapa.

O mapa de isóbatas dos calcários também apresenta continuidade lateral para a região adjacente do trabalho, e observa-se uma anisotropia na porção centro sul, fronteira entre as duas áreas, relacionada à cota de 740 m. Além disso, nota-se que as rochas carbonáticas aprofundam para leste e para norte, acompanhando a morfologia do embasamento e mostrando um basculamento para norte. Ao comparar as linhas de isóbatas, percebe-se que existe uma tendência de aumento de espessura das camadas metassedimentares para leste, conforme descrito por outros autores como RIBEIRO (2003), GALVÃO (2016) e DE PAULA (2019), porém, o basculamento para norte ainda não tinha sido avaliado.

A distribuição do fluxo entre as áreas aponta um controle vinculado à morfologia da bacia, direcionando o fluxo para parte leste e norte da área, bem como anisotropias pontuais na região centro sul compatíveis às anisotropias do mapa de isóbatas dos calcários. Nota-se que a maior parte do fluxo é condicionada no sentido oeste-leste, sobretudo à medida que se adentra à região da APA.

Perfis hidrogeológicos foram utilizados como ferramentas para melhor avaliar as relações estruturais e hidrogeológicas (Figura 6). Esses perfis ilustram o modelo de altos estruturais que controlam o embasamento e estabelecem as regiões de contato dessa litologia com as rochas carbonáticas como limites do aquífero cárstico-fissural. Apesar de funcionar como condição de contorno, localmente, o aquífero fissural pode contribuir com aquífero cárstico fissural por meio das estruturas rúpteis motivado pelo gradiente hidráulico.

A análise do Perfil A indica que, mais a sul, onde predominam as rochas cristalinas, o contato entre unidades hidrogeológicas fissural e cárstico fissural ocorre próximo a cota de 760 m, marcando a condição de contorno entre essas unidades e com o fluxo hídrico acompanhando o gradiente hidráulico (entre as cotas de 730 e 720 m) até a descarga na surgência Bom Jardim. Esse perfil é importante, pois permite a visualização das condições de contorno hidrogeológicas que alimentam a surgência Bom Jardim. Dessa forma, o alto estrutural do embasamento se impõe como limite do aquífero cárstico-fissural (condição Contorno Neumann).

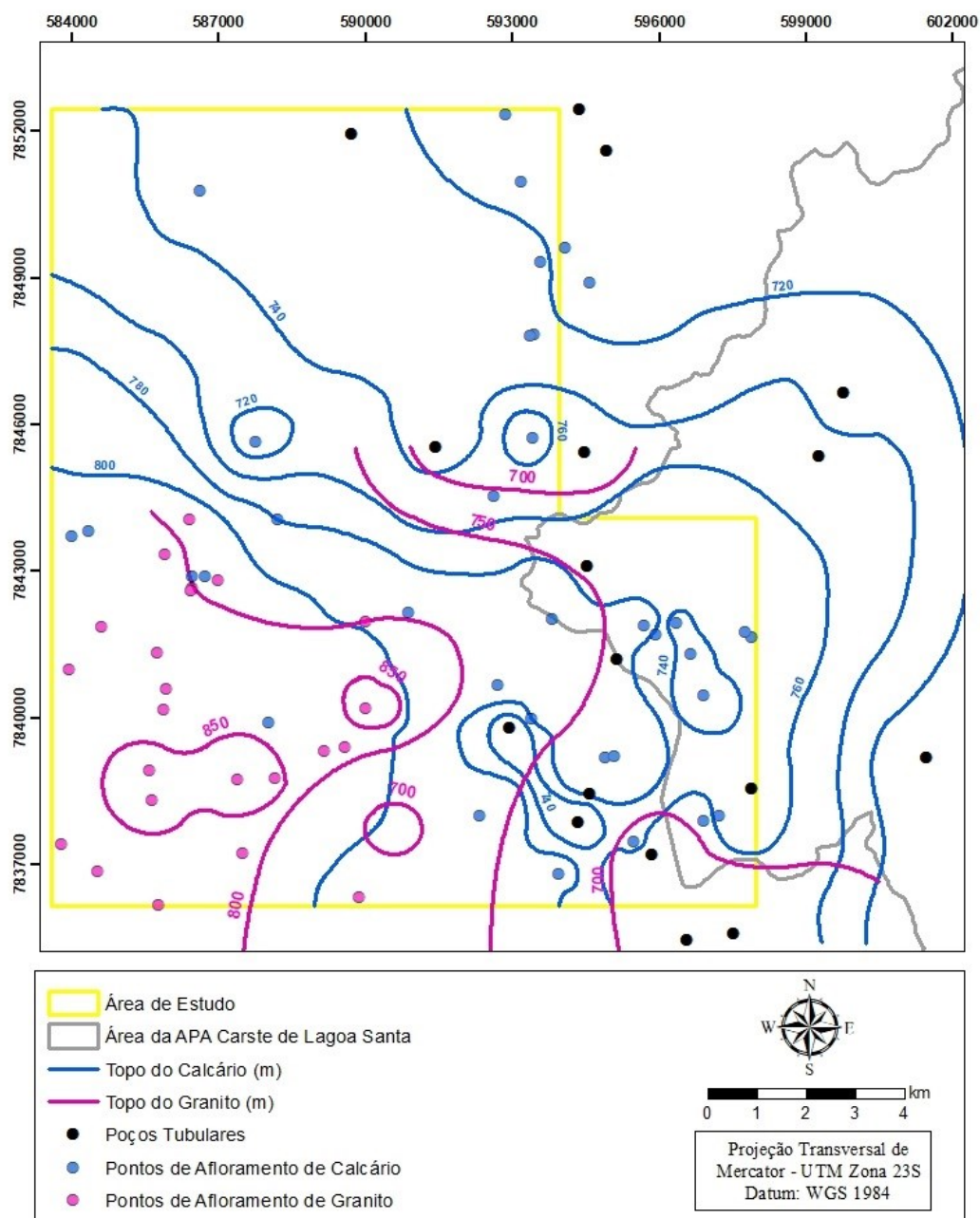


Figura 5. Mapa de isóbatas referente ao topo do embasamento (rosa), e ao topo do calcário (azul), que englobam a área de estudo e da APA.

A porção próxima ao centro da área (Perfil B) revelou um gradiente hidráulico mais acentuado e entradas d'água posicionadas em cotas mais altas, as quais, quando analisadas em conjunto ao mapa potenciométrico integrado (Figura 6), revelaram que a região apresenta valores de carga hidráulica superiores e mudanças de direção no fluxo subterrâneo entre os sentidos NNE e ESE.

Já o Perfil C, ao norte, representa a porção de influência do ribeirão Jequitibá, onde o embasamento é mais profundo e a bacia carbonática mais espessa. Em função disso, o fluxo apresentado é contínuo entre as duas regiões, tendo o ribeirão Jequitibá como expressão da descarga local do aquífero cárstico-fissural.

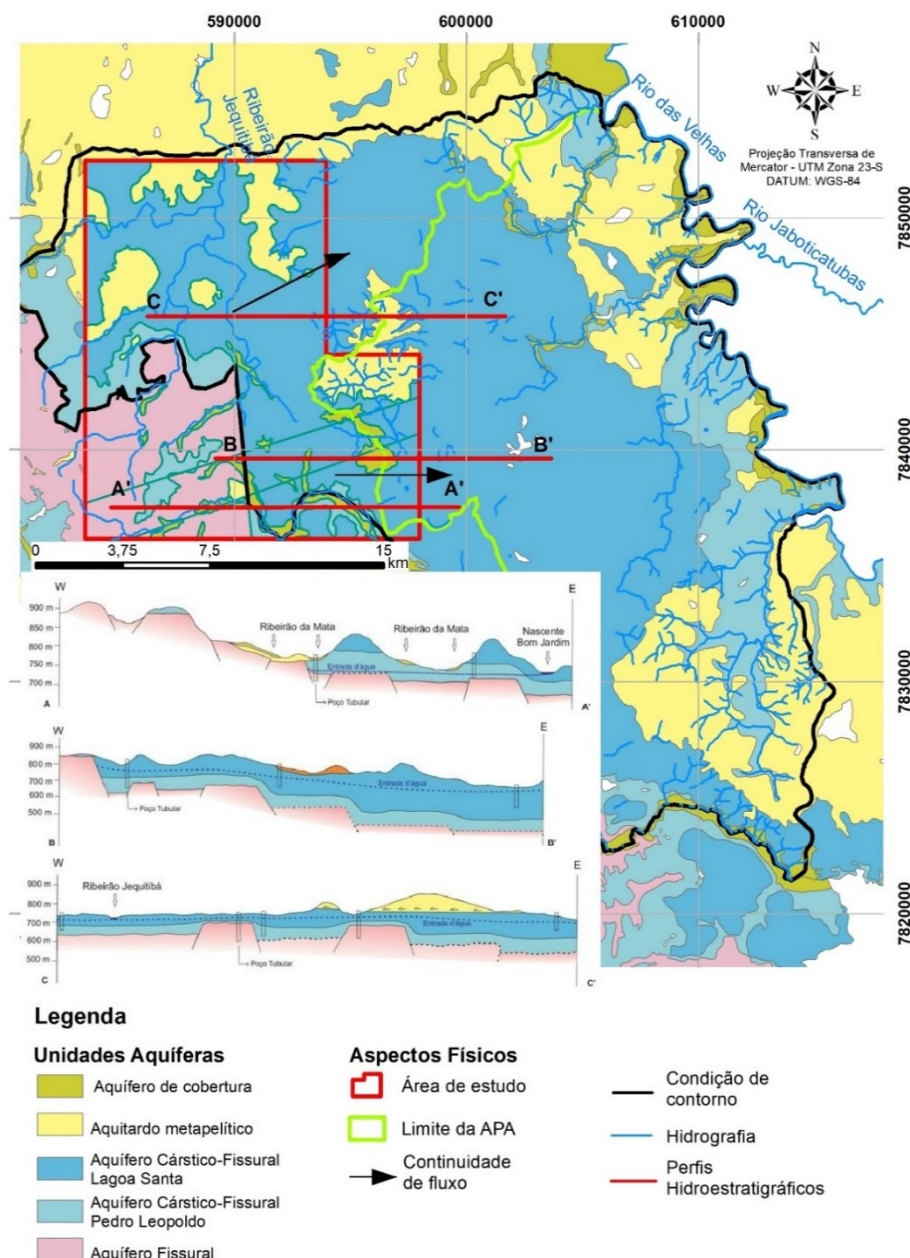


Figura 6. Mapa hidrogeológico e respectivos perfis que conectam a área de estudo e a APA Carste de Lagoa Santa. O nível d'água nos perfis foram traçados a partir das entradas d'água dos poços tubulares.

A conexão entre as duas áreas é demonstrada pelos valores de recarga e descarga apontados anteriormente, levando a um entendimento de um sistema único de fluxo entre as duas áreas. A continuidade de fluxo advindo da área do Compartimento Cárstico-Fissural Bom Jardim é o fator determinante desta conexão, tendo a surgência Bom Jardim como principal ponto de descarga na região deste estudo e de recarga da região da APA Carste de Lagoa Santa.

Para gestão de recursos hídricos de uma Área de Proteção Ambiental, suas conexões são extremamente importantes, pois os impactos oriundos em regiões fora da APA, podem migrar por meio do sistema aquífero para dentro de suas imediações.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A similaridade dos dados geológicos, hidrogeológicos encontrados entre área de estudo e a APA indica a

conexão entre os sistemas estudados. Os mapas de isóbatas, os perfis hidrogeológicos e a continuidade das unidades aquíferas corroboram a conexão hidrogeológica entre as áreas, com o controle estrutural do embasamento por toda a região, que estabelece um modelo de bacia assimétrica do tipo host-graben com aprofundamento para leste e basculado para norte, em que o gradiente hidráulico acompanha essa evolução e direciona os fluxos nesse sentido.

A conexão hidrogeológica entre a área de estudo e a APA pode ser comprovada diante da continuidade de fluxo advindo da área do Compartimento Cárstico-Fissural Bom Jardim. A surgência de Bom Jardim, com vazão de 600 m³/h (AULER, 1994), é o principal ponto de descarga da área estudada e de recarga alóctone da APA, e a sua conectividade foi atestada pela análise das cotas de entradas d'água dos poços que evidenciaram a maior carstificação desse compartimento, assim como a vazão produzida no Compartimento Cárstico-Fissural Bom Jardim que se assemelha à vazão monitorada na nascente nos anos 90.

O estudo aqui apresentado, mostra a necessidade de ampliar o conhecimento científico quanto aos limites da área de proteção ambiental em campos da geologia, geomorfologia e hidrogeologia, visando a criação de uma área de proteção maior, possibilitando abarcar a continuidade hidrolitoestrutural entre as regiões foi demonstrada. Estudos aprofundados sobre recarga na região serão de grande avanço científico, pois a vazão da surgência Bom Jardim, representa uma recarga alóctone ao sistema cárstico da área de preservação ambiental. Recomenda-se em estudos futuros uma análise estrutural detalhada da área unida ao uso de traçadores corantes e isotópicos na região, de modo a quantificar as contribuições dessa bacia para a APA, assim como possíveis trocas entre o embasamento e os carbonatos.

REFERÊNCIAS

- ALKMIM, F. F. O que faz de um cráton um cráton? O cráton do São Francisco e as revelações Almeidianas ao delimitá-lo. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C. D. R.; Neves, B. B. B. (Eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, São Paulo, 2004. pp. 17-34.
- ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7: 349- 364, 1977. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1977349364>.
- AULER, A. Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of The Matozinhos - Pedro Leopoldo Karst, Brazil. Bowling Green: Faculty of the Department of Geography and Geology / Western Kentucky. 1994.
- COMPANHIA BRASILEIRA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Meio Físico APA Carste Lagoa Santa, Estudos hidrológicos e qualidade das águas de superfície. Volume I, GERIDE, Belo Horizonte. 1998.
- COOPER, H. H., BREDEHOEF, J. D., PAPADOPULOS, S.S. Response of Finite-Diameter Well to an Instantaneous Charge of Water. *Water Resources Research*, v. 3, n. 1, pp. 263-269, 1967. <https://doi.org/10.1029/WR003i001p00263>.
- DA-GLORIA, P., NEVES, W.A., HUBBE, M. (Eds). *Archaeological and Paleontological Research in Lagoa Santa: The Quest for the First Americans*. Springer: New York, 2017, 420p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57466-0>.
- DARDENNE, M. A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Anais, v. 2, 1978. p.597-610.

- DE PAULA, R. S. Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticocarbonáticos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Doutorado em hidrogeologia – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2019.
- DE PAULA, R. S., TEIXEIRA, G. M., RIBEIRO, C. G., DA SILVA, P. H. P., SILVA, T. G. A., VIEIRA, L. C. M., VELÁSQUEZ, L. N. M. Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero Cárstico-Fissural da Região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, 34(2), 221-235. 2020. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29812>.
- DE PAULA, R. S., VELÁSQUEZ, L. N. M. Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, 33(2), 119-133. 2019. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i2.29252>.
- FEATHERS, J., KIPNIS, R., PILÓP, L., ARROYO-KALIN, M., COBLENTZ, D. How old is Luzia? Luminescence dating and stratigraphic integrity at Lapa Vermelha, Lagoa Santa, Brazil. *Geoarchaeology*, 25(4), 395-436. 2010. <https://doi.org/10.1002/gea.20316>.
- FORD, D.C., WILLIAMS, P.W. Karst hydrogeology and geomorphology. Rev. ed. John Wiley & Sons Ltd: Chichester, 2007, 576p. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>.
- GALVÃO, P., HIRATA, R., CORDEIRO, A., BARBATI, D., PENARANDA, J. Geologic conceptual model of the municipality of Sete Lagoas (MG, Brazil) and the surroundings. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 88, 35-53. 2016. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520140400>.
- HVORSLEV, M.J. Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations, Bull. Waterways Exper. Sta. Corps of Engrs, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, n. 36 pp. 1-50, 1951.
- JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). Earth Observation Research AND Application Center. ALOS Data Users Handbook. Revision C. 2008. Disponível em: JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). Earth Observation Research AND Application Center. ALOS Data Users Handbook. Revision C. 2008: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/ALOS_HB_RevC_EN.pdf.
- KOHLER, H. C. Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. 1989.
- MANOEL FILHO, J. Ocorrência das águas subterrâneas. In: Feitosa, F. A. C. e Filho, J. M. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 3ed. Rio de Janeiro, CPRM: LABHID, p.53-75. 2008.
- MILLER, J. A. Introduction and National Sumary. In: USGS – U. S. Geological Survey. Ground Water Atlas of the United States, USGS, 1999.
- RIBEIRO, J. H., TULLER, M. P., FILHO, A. D., PADILHA, A V., CÓRDOBA, C. V. Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Campim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais – relatório final, escala 1:50.000, 2ª ed.; Belo Horizonte: CPRM, 54p., 2003.
- RIBEIRO, V. B., MANTOVANI, M. S. M., LOURO, V. H. A. Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. *Revista Terrae Didatica*, v. 10, n. 1, p. 29-51, 2013. <https://doi.org/10.20396/td.v10i1.8637386>.

- ROLIM, G. de S., SENTELHAS, P. C., BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL TM para os cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.
- THORNTHWAITE, C.W., MATHER, J.R. The water balance. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p, 1955.
- VELÁSQUEZ, L.N.M., ANDRADE, I.B., RIBEIRO, C.G., AMARAL, D.G.P., VIEIRA, L.C.M., CARDOSO, F.A., PAULA, R.S., SILVA, P.H.P., SOUZA, R.T., ALMEIRA, S.B.S. 2019. Projeto de adequação e implantação de uma rede de monitoramento de águas subterrâneas em áreas com cavidades cársticas da Bacia do rio São Francisco aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais. Relatório parcial, PROCESSO FUNDEP/GERDAU/UFMG n22.317 / Plano de ação. 2019.
- UHLEIN, A., CAXITO, F. A., SANGLARD, J. C. D., UHLEIN, G. J., SUCKAU, G. L. Estratigrafia e tectônica das faixas neoproterozoicas da porção norte do Cráton do São Francisco. *GEONOMOS*, 19(2): 8-31 nacional para a conservação do patrimônio espeleológico nas áreas cársticas da bacia do São Francisco. Pan Cavernas do São Francisco. 2018.
- VIANA, H.S., KOHLER, H.C., TAVARES, V.P. (Org.). APA Carste de Lagoa Santa - Meio Físico. Volume I. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, 1998.
- WORTHINGTON, S. R. H., FORD, D. C. Self-Organized Permeability in Carbonate Aquifers. *Ground Water*, 47: 326-336. 2009.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00551.x>