

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia

Júlia Cotta Maciel Dantas

**COMPARTIMENTAÇÃO E MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA DO SISTEMA
AQUÍFERO CÁRSTICO-FISSURAL DA REGIÃO CÁRSTICA DE LAGOA SANTA**

Júlia Cotta Maciel Dantas

**COMPARTIMENTAÇÃO E MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA DO SISTEMA
AQUÍFERO CÁRSTICO-FISSURAL DA REGIÃO CÁRSTICA DE LAGOA SANTA**

Versão final

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

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula

Coorientadora: Profa. Dra. Leila Nunes Menegasse Velásquez

Belo Horizonte
2023

D192c
2023

Dantas, Júlia Cotta Maciel.

Compartimentação e modelagem hidrogeológica do sistema aquífero cárstico-fissural da região cárstica de Lagoa Santa [manuscrito] / Júlia Cotta Maciel Dantas. – 2023.

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

Orientador: Rodrigo Sérgio de Paula.

Coorientadora: Leila Nunes Menegasse Velásquez.

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

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Inclui bibliografias.

1. Hidrogeologia – Teses. 2. Carste – Minas Gerais – Teses. 3. Aquíferos – Minas Gerais – Teses. I. Paula, Rodrigo Sérgio de. II. Velásquez, Leila Nunes Menegasse. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 556.3(815.1)




FOLHA DE APROVAÇÃO

Compartimentação e Modelagem Hidrogeológica do Sistema Aquífero
Cárstico-Fissural da Região Cárstica de Lagoa Santa

JÚLIA COTTA MACIEL DANTAS

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

Aprovada em 27 de fevereiro de 2023, pela banca constituída pelos membros:



Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula – Orientador
UFMG



Prof. Dr. Paulo Henrique Ferreira Galvão
UFMG



Profa. Dra. Stela Dalva Santos Cota
CDTN

Belo Horizonte, 27 de fevereiro de 2023.

À minha mãe Zulmira que,
antes mesmo do início,
já tinha certeza que daria certo.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu marido Roberto pelo incentivo diário e paciência e ao Tannat pela companhia sempre certa.

A minha família pelo suporte, sempre. Em especial ao meu pai Fernando e às mães que a vida me deu: Elizete e Sônia.

Ao meu orientador Rodrigo pela disponibilidade e ricas discussões e à minha coorientadora Leila pela confiança.

À Comissão Avaliadora agradeço por aceitarem o convite para a defesa e, em especial, à Stela e Paulo pelas importantes contribuições.

À Kênia e a AGA pelo apoio para que fosse possível conciliar mestrado e trabalho.

Ao Breno por todo o conhecimento compartilhado em modelagem.

Aos meus amigos pelo carinho, em especial ao Gabriel, Simone e André que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao ICMBio e Centro Nacional de Pesquisas e Conservação de Cavernas (CECAV) pelo financiamento do “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” (Processo FUNDEP/GERDAU/UFMG N° 22.317), ao qual tive a honra de fazer parte.

À UFMG, em especial a Pró-Reitoria de Pós-graduação (PRPg) ao Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências (IGC), pela oportunidade de integrar este programa.

E, por fim, a todos os que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

RESUMO

Modelos hidrogeológicos conceituais e numéricos são a melhor forma de representação das condições de fluxo subterrâneo e, especificamente no carste, que é um ambiente hidrogeologicamente complexo, constituem um desafio. Nesse contexto, o presente trabalho foi desenvolvido no carste mais estudado do Brasil, na região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais, abrangendo integralmente a APA Carste de Lagoa Santa. Em uma área de 600 km², foi proposto o refinamento do modelo hidrogeológico conceitual (MHC), com subcompartimentações horizontais e verticais do sistema aquífero cárstico-fissural local e, em um segundo momento, desenvolvido um modelo hidrogeológico numérico (MHN) no software Feflow. O MHC serviu como base para o MHN, que teve como objetivo a simulação de rotas de fluxo obtidas em ensaios anteriores com traçadores corantes e a avaliação do comportamento de fluxo subterrâneo com foco no aquífero cárstico. Na metodologia aplicada a compartimentação horizontal se deu a partir do geoprocessamento de dados que corroboram a existência de processos de carstificação (cavernas, nascentes de alta vazão, rotas de traçadores, etc.) culminando com a delimitação de três subcompartimentos (Escrivânia-Gordura, Palmeiras-Jaguara e Palmeiras-Jaguara-Samambaia) dentro das bacias hidrogeológicas cársticas locais. A compartimentação vertical foi feita por meio da análise de entradas de água descritas em perfis de poços, dados de capacidade específica dos poços e análises da espessura de coberturas. Foi proposto que nos carbonatos os primeiros 30 m de rocha são correspondem a área mais carstificada que compõe o aquífero cárstico propriamente dito, que se sobrepõe ao aquífero cárstico-fissural. No embasamento cristalino, definiu-se que o aquífero-fissural seria produtivo nos primeiros 60 m de profundidade da rocha são, onde estão localizadas a maior parte entradas de água. Em maior profundidade, passa-se a ter um aquífugo que funciona como uma base impermeável do sistema. Chegou-se então à proposição de seis unidades hidrogeológicas: aquífero granular das coberturas, aquícludes dos pelitos da Formação Serra de Santa Helena, aquífero cárstico e aquífero cárstico-fissural dos carbonatos da Formação Sete Lagoas e aquífero fissural e aquífugo nos granito-gnaisses migmatíticos do embasamento cristalino do Complexo Belo Horizonte. A modelagem hidrogeológica numérica foi realizada em regime permanente após a definição das condições de contorno na área de estudo e da modelagem geológica

3D no software Leapfrog. O modelo de fluxo subterrâneo apresentou parâmetros de calibração satisfatórios, sendo capaz de representar as cargas hidráulicas observadas e as vazões monitoradas nas nascentes. Como resultados, foram sugeridas possíveis rotas de fluxo para nascentes que ainda têm parte de sua vazão com origem desconhecida e feita uma avaliação das trocas de água no aquífero cárstico calculadas pelo modelo numérico. As principais conclusões do trabalho mostraram que o comportamento hidrogeológico não é restrito às unidades litoestratigráficas, podendo variar dentro de uma mesma unidade ou desenvolver características devido a combinação de duas unidades. Além disso, a discretização dos condutos cársticos por meio de discrete features, possibilitou a representação das condições de fluxo subterrâneo locais, principalmente em relação a importância de entradas externas de água para explicar as altas vazões observadas em surgências cársticas.

Palavras-chave: Modelagem Hidrogeológica. Sistema Cárstico. Compartimentação Aquífera.

ABSTRACT

Hydrogeological conceptual and numeric models are the best way to represent the knowledge of groundwater regime and, specially in karstic systems, that constitute a very complex environment this kind of modelling is a challenge. In this context, this work was developed in the most studied karst in Brazil, in the metropolitan region of Belo Horizonte, Minas Gerais, including the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area. In an area of 600 Km², a refinement of the conceptual hydrogeological model (CHM), in vertical and horizontal compartments, in the fissured-karstic aquifer system was proposed and, in a second moment, a numerical hydrogeological model (NHM) was developed using the software Feflow. The CHM worked as a basis for the NHM, that had as an objective the simulation of flow routes obtained in tracer studies of previous studies and the underground flow behavior focusing on the karstic aquifer. In the methodology applied the horizontal compartmentalization was based on geoprocessing data that ratify the existence of karstification processes (caves, high flowing springs, tracer routes, etc.), being delimited three subcompartments (Escrivânia-Gordura, Palmeiras-Jaguara and Palmeiras-Jaguara-Samambaia) within the karstic hydrogeological basins in the study area. The vertical compartmentalization was based on water inlets described in wells in the area, specific capacity data and cover thickness evaluation. It was proposed that the first 30 m depth in carbonates correspond to the most karstified zone that composes the karstic aquifer itself, overlapped to the fissured-karstic aquifer. In the crystalline basement it was defined that the fissure aquifer would be productive until the depth of 60m below the fresh basement, where most water intakes are located. With increase depth, the basement become an aquifuge that acts as an impermeable base of the system. Six hydrogeologic units were proposed: granular aquifer (covers), aquiclude (pelites of Serra de Santa Helena Formation), karstic and fissured-karstic aquifer (carbonates of Sete Lagoas Formation) and fissure aquifer and aquifuge (Belo Horizonte migmatitic-granite gneiss complex). On the other hand, the hydrogeological modeling was done in steady state after the boundary conditions definition and the 3D geological modelling in the software Leapfrog. The numerical hydrogeological model achieved satisfactory parameters, being able to represent the study area hydraulic heads and the discharges monitored in springs. As results, possible flow routes to springs that have unknown flow components were suggested and the calculated water exchanges in the karstic

aquifer were evaluated. The main work conclusions showed that the hydrogeological behavior it is not bonded to the lithostratigraphic units, but it can vary within a same unit or has characteristics that reflect the combination of two different units. Moreover, the karstic conduits representation using the discrete features tool allowed the representation of the local groundwater flow, mainly related to the importance of external water entrances to explain the high flow rates observed in karstic springs.

Keywords: Hydrogeological Modelling. Karstic System. Aquifer Compartmentalization.

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	10
2	HORIZONTAL AND VERTICAL COMPARTMENTALIZATION IN THE FISSURE AND KARSTIC AQUIFERS OF THE LAGOA SANTA KARST ENVIRONMENTAL PROTECTION AREA AND SURROUNDINGS, MINAS GERAIS, BRAZIL.....	12
3	MODELAGEM DE FLUXO SUBTERRÂNEO EM CARSTE NEOPROTEROZÓICO COM BASE EM ROTAS DE TRAÇADORES CORANTES	25
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
5	REFERÊNCIAS	65

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Essa dissertação é um dos produtos derivados do “Projeto de Implantação e Adequação 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” (Processo FUNDEP/GERDAU/UFMG N° 22.317) que conta com o apoio financeiro do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV) e é executado pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG) e pelo Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN), com as parcerias do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e do Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM). Trata-se de um grande projeto desenvolvido na importante região cárstica da região metropolitana de Belo Horizonte, abrangendo, inteiramente, a Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa.

A motivação para este trabalho veio da oportunidade de consolidar estudos multidisciplinares realizados anteriormente em um produto único: um modelo hidrogeológico numérico que fosse capaz de representar, de maneira satisfatória, o comportamento de fluxo subterrâneo conhecido. Como objetivo específico, o modelo hidrogeológico deveria ser capaz de simular as rotas de fluxo subterrâneo, em direção às surgências cársticas, observadas em estudos anteriores com traçadores corantes. A área de estudo, que será aqui apresentada, tem aproximadamente 600 Km² e vai além dos limites da APA Carste, tendo sido definida com base em condições de contorno definidas no modelo hidrogeológico conceitual (MHC) e aplicadas no modelo hidrogeológico numérico (MHN).

Sabe-se que a modelagem hidrogeológica numérica, sendo uma representação da realidade física, constitui-se em uma importante ferramenta para compreensão das condições de fluxos subterrâneos e realização de análises preditivas que podem auxiliar na gestão hídrica local. No entanto, a construção de um modelo que seja, de fato, representativo, é totalmente dependente da quantidade e qualidade das informações que são utilizadas para sua construção e calibração.

Nesse sentido, antes do desenvolvimento do modelo numérico, além da revisão dos trabalhos existentes, foram feitos refinamentos do modelo hidrogeológico conceitual com a proposição de subcompartimentos horizontais e verticais no sistema aquífero local, definição de condições de contorno da área de estudo e a construção de um modelo geológico 3D. A dissertação encontra-se, portanto, dividida em dois capítulos principais compostos por artigos científicos.

O primeiro artigo “HORIZONTAL AND VERTICAL COMPARTMENTALIZATION IN THE FISSURE AND KARSTIC AQUIFERS OF THE LAGOA SANTA KARST ENVIRONMENTAL PROTECTION AREA AND SURROUNDINGS, MINAS GERAIS, BRAZIL” tem o objetivo de mostrar que o comportamento hidrogeológico local não se restringe às unidades litoestratigráficas, mas pode ser variável dentro de uma mesma unidade e ter características de fluxo subterrâneo influenciadas pela combinação de dois litotipos diferentes. Assim, foram propostas compartimentações hidrogeológicas horizontais e verticais dentro dos domínios dos carbonatos da Formação Sete Lagoas e dos granito-gnaisses do embasamento cristalino. O artigo foi submetido à revista “Journal of South American Earth Sciences” em outubro/2022, aceito em janeiro/2023. A publicação do artigo ocorreu em março/2023 e a versão original é aqui apresentada na íntegra.

O segundo capítulo contém o artigo “MODELAGEM DE FLUXO SUBTERRÂNEO EM CARSTE NEOPROTEROZÓICO COM BASE EM ROTAS DE TRAÇADORES CORANTES” cujo objetivo é apresentar as bases e premissas adotadas para a construção do modelo hidrogeológico numérico e os resultados obtidos, passando pelos critérios de calibração do modelo, até as simulações das rotas de fluxo subterrâneos observadas em ensaios de traçadores.

O capítulo final expõe discussões e conclusões em relação ao trabalho desenvolvido e apresenta recomendações para estudos futuros.

**2 HORIZONTAL AND VERTICAL COMPARTMENTALIZATION IN THE
FISSURE AND KARSTIC AQUIFERS OF THE LAGOA SANTA KARST
ENVIRONMENTAL PROTECTION AREA AND SURROUNDINGS, MINAS
GERAIS, BRAZIL**



Horizontal and vertical compartmentalization in the fissure and karstic aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area and surroundings, Minas Gerais, Brazil

Júlia Cotta Maciel Dantas^{*}, Leila Nunes Menegasse Velásquez, Rodrigo Sérgio de Paula

Geosciences Institute, CPMTCC-JGC, Federal University of Minas Gerais, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:

Karst hydrogeology
Karstic compartmentalization

ABSTRACT

The study area comprises the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area (EPA) and its surroundings in the metropolitan region of Belo Horizonte. The complex and fragile karstic system of the Sete Lagoas Formation is the main local aquifer and an important reservoir of groundwater for human supply. Based on multidisciplinary studies, a refinement of the Hydrogeological Model of Paula (2019) was made. The study area was expanded to northwest and vertical and horizontal compartmentalization of the aquifers were proposed. The horizontal compartmentalization of the karstic aquifer was based on hydrogeological, hydrodynamic and hydrochemical aspects, where three more karstified compartments were defined. In vertical compartmentalization of the karstic and fissure aquifers, fractures (water inflows), lithological descriptions, cover width and hydraulic conductivity of wells were considered. In the limestones, the more karstified portion extends down to 30 m deep and the crystalline basement acts as an aquifuge at depths greater than 60 m. Six hydrogeologic units were proposed: Granular Aquifer (covers), Aquiclude (pelites of Serra de Santa Helena Formation), Karstic and Fissured-Karstic Aquifer (carbonates of Sete Lagoas Formation), and Fissure Aquifer and Aquifuge (crystalline basement of Belo Horizonte complex).

1. Introduction

In the central region of Minas Gerais State (Brazil), about 30 km North of Belo Horizonte, sits the Environmental Protection Area Lagoa Santa Karst (EPA Lagoa Santa Karst), created in 1990 to protect part of the fragile local karstic system. This area has been the target of scientific studies since the nineteenth century, with emphasis on the areas of paleontology, archeology, and geomorphology (Pessoa, 2005). Besides being a speleological, historical, and cultural heritage site, this carbonate karstic environment constitutes an important groundwater reservoir for supplying the local urban population (Ribeiro et al., 2003), as well as agro-pastoral and industrial activities.

The local water resources, however, have been impacted by the regional socioeconomic development, marked by agricultural and livestock farming, mining, large infrastructure works, and urban sprawling. Considering the importance, complexity, and natural vulnerability of karst aquifers, the evolution of knowledge in hydrodynamic, hydrogeological, and hydrological aspects allows the development of a

Conceptual Hydrogeological Model (CHM) that shows itself as a key tool for a better management of the region. Thus, this work presents the refinement of the Conceptual Hydrogeological Model proposed by Paula (2019). In this context, the spatial expansion of the initial model was proposed and a new compartmentalization of the local aquifers was made, thereby generating a new division of aquifer units.

1.1. Location of the study area

The study site has a total area of 599 km² and it is located in the metropolitan region of Belo Horizonte (MG), covering the entire EPA Lagoa Santa Karst (356 km²) and its surroundings in the municipalities of Lagoa Santa, Confins, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Capim Branco, Prudente de Morais, Sete Lagoas and Funilândia. The main local drainages are the Das Velhas River to the east and Da Mata Creek to the west (Fig. 1). The study area is expanded to the northwest from the Conceptual Hydrogeological Model (CHM) of Paula (2019), to encompass the carbonates of Prudente de Morais and Sete Lagoas. The study

Abbreviations: EPA, Environmental Protection Area; CHM, Conceptual Hydrogeological Model; m.a.s.l., meters above sea level.

^{*} Corresponding author.

E-mail addresses: cmd.julia@gmail.com (J.C.M. Dantas), menegase@yahoo.com.br (L.N.M. Velásquez), rodrigo.spdm@yahoo.com.br (R.S. de Paula).

<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104219>

Received 21 October 2022; Received in revised form 12 January 2023; Accepted 23 January 2023

Available online 26 January 2023

0895-9811/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.

area extension was based on boundary conditions defined in a CHM, being limited by important drainages and by lithological contacts that act as a flow barrier. In the northwest portion the area was limited by the city Sete Lagoas, which was not included in the work because of its complexity, especially when considering well pumping.

1.2. Hydrographic characteristics

In the regional context, the hydrographic network of the study area is inserted in the middle portion of the Das Velhas River basin, which despite being of state jurisdiction, is in turn, part of the São Francisco River basin, of federal relevance, present in six Brazilian states (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2021).

At the local level, the Das Velhas River is the main base level where most of the drainages flow into (Paula, 2019), such as Da Mata Creek, located to the west of the area. Twelve sub-basins are identified in the study area (Fig. 2), whose main drainages are: Flor, Gordura, Jaguara,

Palmeiras, Samambaia, Jaque and Retiro streams, Jequitibá Creek, Da Mata Creek and Das Velhas River.

Except for the upstream Jequitibá sub-basin and the upstream Da Mata Creek sub-basin, that were delimited in this work aiming at covering the northwestern portion added to the CHM, the other sub-basins correspond to hydrogeological compartments defined and rectified from previous studies within the context of the EPA Lagoa Santa Karst (Velásquez et al., 2018; Paula, 2019; Teodoro et al., 2019; Ribeiro, 2020 and Vieira et al., 2020).

The hydrography in the study area is mixed, with fluvial and karst components (Berbert-Born, 2002). A sparser surface drainage network is noted in the limestone outcrop areas due to the existence of features such as sinkholes, karst depressions, and caves, that commonly drain water to the underground environment (Ribeiro et al., 2016; Teodoro, 2020). There are many perennial and intermittent karstic lagoons present in the region, due to the presence of emergences and resurgences of high flows. In karst terrains the surface drainages do not always

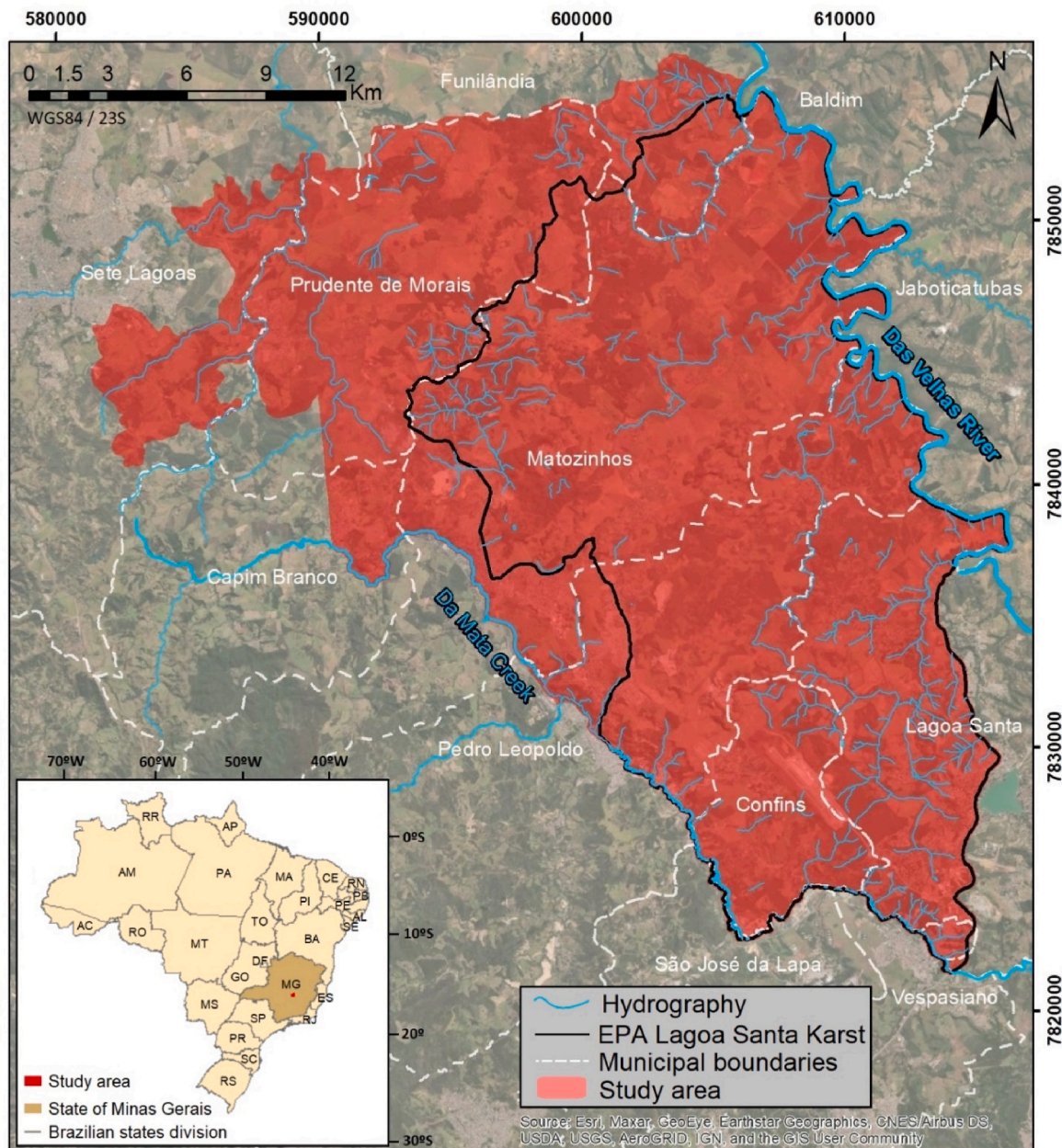


Fig. 1. Location of the study area and boundary of the EPA Lagoa Santa Karst.

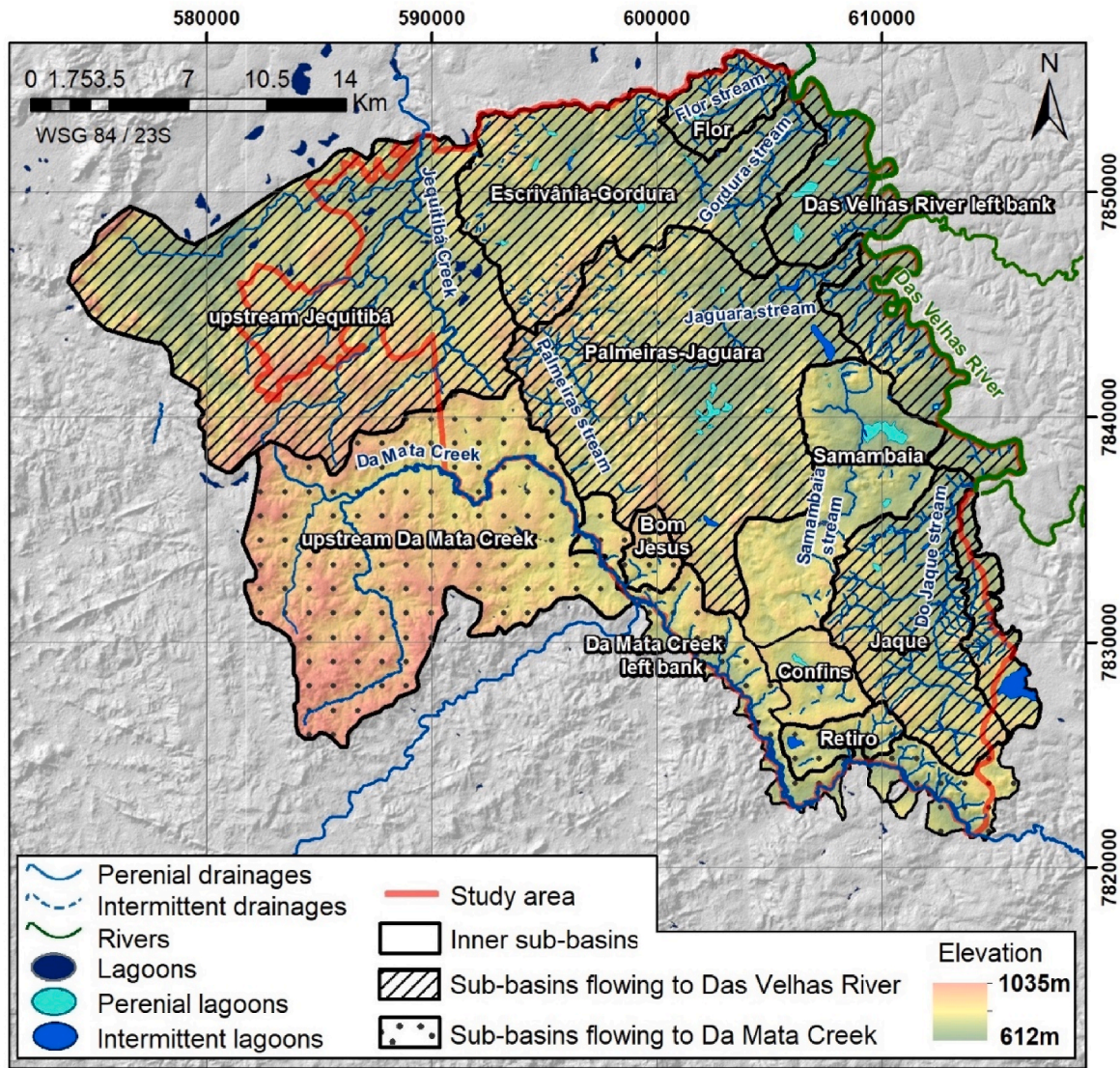


Fig. 2. Watersheds and hydrogeological compartments in the study region.

correspond to the underground drainage systems (Palmer, 1991).

The streams Jaque, Gordura, Flor and Jaguara, and the creeks Jequitibá and Da Mata flow directly into Das Velhas River. The streams Palmeiras and Samambaia, on the other hand, constitute currents that flow into sinkholes, namely: the Cimento Mauá Minerações limestone massif and the Sumidouro lagoon, respectively (Vieira, 2018). In turn, the Confins sub-basin is bordered by geographic boundaries that act as water divides and, therefore, constitutes a closed basin. Thus, Samambaia and Confins basins are endorheic, being classified as inner-sub-basins. The Retiro and Bom Jesus sub-basins drain waters from the karst through emergences into the Da Mata Creek (Teodoro et al., 2019).

Based on Berbert-Born (2002) classification, Flor, Das Velhas river left bank, upstream Da Mata creek, Jaque and upstream Jequitibá sub-basins are characterized by fluvial components, which means that the main flow occurs at surface. On the contrary, the Bom Jesus, Palmeiras-Jaguara and Escrivânia-Gordura sub-basins have a predominance of karst components where the underground flow is the most important, whereas the Ribeirão da Mata, Confins, Retiro and Samambaia sub-basins constitute mixed systems with fluvial and karst components.

Results of tracer tests indicated underground connections between the sub-basins: Escrivânia and Gordura, Palmeiras and Mocambo/

Jaguara, Mocambo/Jaguara and Samambaia, and Confins and Samambaia (Teodoro et al., 2019).

1.3. Geological context

Regionally, the study area is in the southern portion of the São Francisco Craton, under the domains of the Neoproterozoic sedimentary cover of the Bambuí Group (Alkmim and Martins-Neto, 2001).

At local scale, the crystalline basement is composed of Archean metamorphic rocks of the Belo Horizonte migmatitic-granite-gneiss complex, overlain in discordant tectonic contact by the Neoproterozoic Sete Lagoas and Serra de Santa Helena formations (basal portion of the Bambuí group), nearly sub-horizontal with a gentle eastward dip (Ribeiro et al. 2003, 2016, 2019). From base to top, the Sete Lagoas formation was subdivided, by Schöll (1976) into the Pedro Leopoldo (impure and siliceous limestones) and Lagoa Santa (pure and homogeneous calcarenites) members, both overlain by the metapelitic siliciclastic rocks of the Serra de Santa Helena formation. The recent top cover, dating from the Tertiary and Quaternary, blankets most of the study area and is divided into two types: detrital-lateritic covers and alluvial deposits.

The area (including the Sete Lagoas formation) is mostly covered by a thick layer of soil (40 m depth in average) that is hard to differ from the

Serra de Santa Helena formation that is weathered at the surface and appears in the northeast and southeast of the study area. There are some areas with fresh carbonate outcrops that were considered in the horizontal compartmentalization proposed in this work.

In structural terms, the Bambuí Group in the region presents medium to high deformation intensity, and the portions where the textures and sedimentary structures preserved are rare. Thrust faults, fractures, sub-horizontal foliations, intrafolial folds and intra and inter-stratal shear zones occur (Ribeiro et al., 2003) in the study area.

According to Ribeiro et al., (2016), the fractures of metacalcites from

Sete Lagoas formation and metapelites from Serra de Santa Helena formation have E-W direction and NE and NW dispersions, whereas the fractures of migmatitic-granite-gneiss complex have a NE direction. The cover units, in turn, show the same behavior pattern as the basement fractures, indicating a strong structural control by the migmatitic-granite-gneiss complex (Velásquez et al., 2018). Geotectonic processes have generated structural features such as ramps in the crystalline floor and establishment of fractures and regional faults of NNW-SSE and ENE-WSW directions (Ribeiro et al., 2003). Such features can also be observed in the local drainages in the NNW direction of the

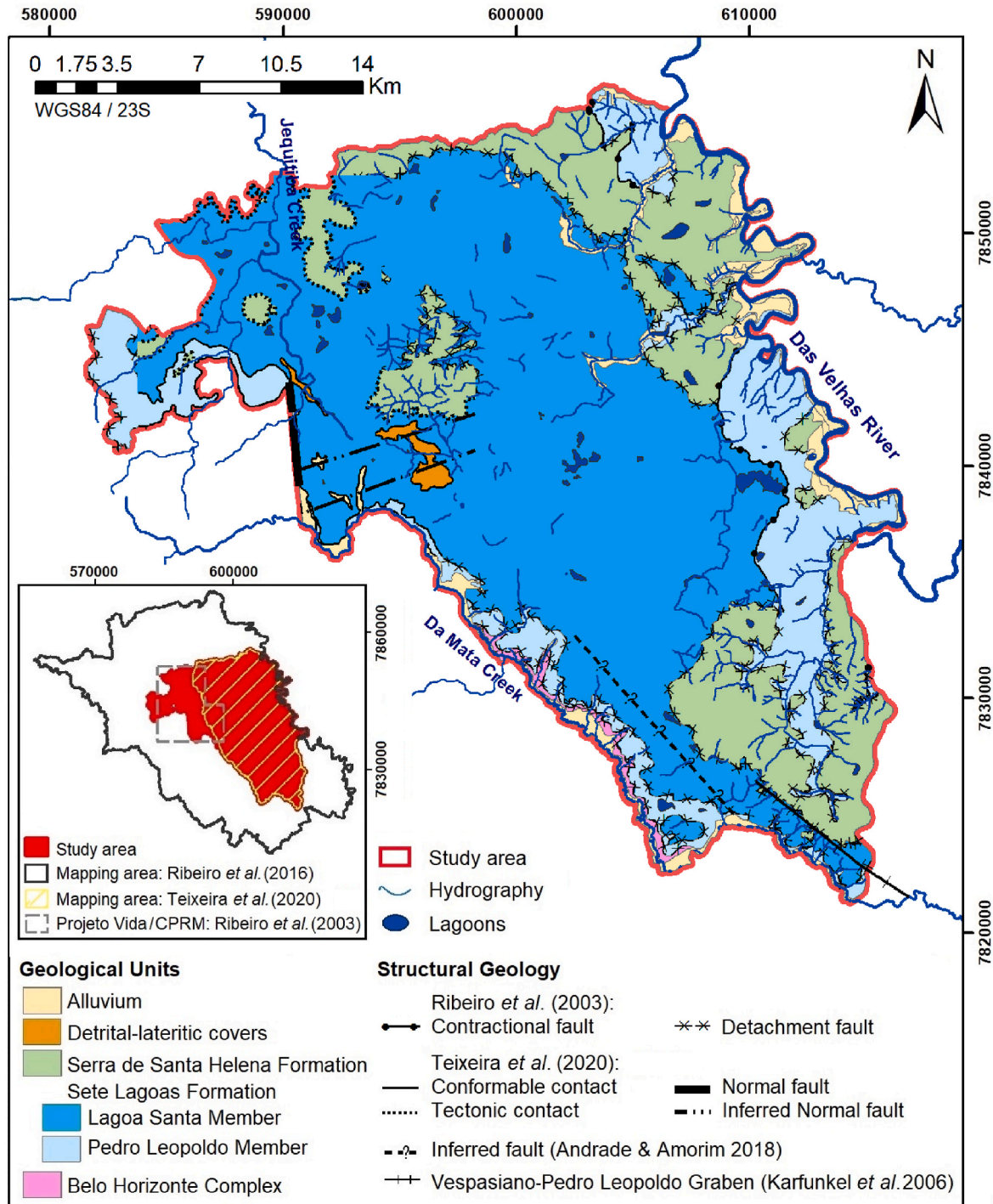


Fig. 3. Geological map of the study region. Data source Ribeiro et al., (2003), Karfunkel et al. (2006), Ribeiro et al., (2016), Andrade and Amorim (2018), Ribeiro (2020) and Teixeira et al., 2020.

Das Velhas River and Da Mata Creek, following the N60W direction (Pessoa, 2005).

The structural control reflects in the hydrogeological context, most of the drainages flow from W-E and the main karstic conduits direction is W-E (Ribeiro et al., 2016). Moreover Vieira (2018) cites the structural control in the shallow water circulation and Galvão (2015) talks about bedding planes enlarged by karstic dissolution as preferential path to underground water flow.

The map in Fig. 3 presents the geological units according to the mapping on a scale of 1:50,000 by Ribeiro et al., (2003) in Projeto Vida/CPRM, plus refinements made by Ribeiro et al., (2016) in EPA Lagoa Santa Karst and surroundings, and contributions from Teixeira et al., (2020) in the region of the Jequitibá Creek sub-basin.

1.4. Hydrogeological units

Based mainly on the local geological units and also using the information of production of water by wells or springs, aquifer units can be defined (Miller, 1999). Thus, in the study area, there are:

Granular Aquifer of the covers: granular aquifer (when saturated) formed by recent unconsolidated deposits, which have high permeability (Shinzato, 1998) and can act as recharge zone for the lower units (Pessoa, 2005); **Pelitic Aquifer:** poor aquifer developed in clay soils and in the pelites of Serra de Santa Helena formation, with low permeability and poorly developed fissure porosity. It has a relatively high storage capacity and works, locally, as a recharge for the underlying carbonate aquifers (Pessoa, 2005);

Fissure-Karstic Aquifer: fissure-karstic aquifer is the main hydrogeological unit of the region, where the Lagoa Santa member presents a greater hydric potential in relation to the Pedro Leopoldo member (Pessoa and Mourão, 1998). Transport and storage occur mainly through fractures and conduits. The widened and opened fractures compose the karst system and when these fractures are enlarged by karst processes there is a predominance of conduits;

Fissure Aquifer: low potential aquifer (Paula, 2019) in the crystalline basement, with reduced or non-existent primary productivity, and secondary porosity related to the existence of discontinuities.

Such aquifer units, however, when analyzed under aspects such as

hydrochemistry, isotopes, water balance, structural control, karst geomorphology and hydrodynamic parameters, reveal the complexity of the local hydrogeological system and the possibility of subdivision (compartmentalization) or grouping of these “classic” units.

Thus, as an example of association of the mentioned units, Pessoa (2005) argues that karstic underground flow should be characterized “from the coupling between the carbonate rock package and the structuring of the crystalline basal complex”.

Paula (2019), on the other hand, based on data of water inputs in wells and topographic coordinates of springs, defined two aquifer compartments for the Fissure-Karstic Aquifer (geological unit of the Sete Lagoas Formation). The upper compartment called “Karstic” presents greater karstification, has a median specific capacity of 5.9 m³/h/m, hydraulic conductivity of 10⁻³ m/s, and an estimated thickness of 78 m, and is delimited between altitudes 638 m.a.s.l. and 716 m.a.s.l. The lower “fissure-karstic” compartment was characterized with a specific capacity of 2.6 m³/h/m, hydraulic conductivity of 10⁻⁷ m/s, and an estimated thickness of 122 m, delimited at 638 m elevation (Fig. 4).

2. Methods

The refinement of the CHM in the region of EPA Lagoa Santa Karst and surroundings was carried out in two sequential steps: i) Literature review and ii) Treatment of the compiled data.

The first step consisted of an extensive review of published data, focusing on works developed in the study region and its surroundings. Studies involving the disciplines of geological mapping, karst geomorphology, hydrochemistry and isotopes, dye tracers and hydrogeological modeling were consulted. The objective of this stage was to understand the evolution of theoretical knowledge in the region and to compile data to support subsequent analyses.

In the second step, a qualitative-quantitative analysis of the compiled data was performed. This analysis involved the interpretation and correlation of results obtained by several authors, besides the treatment of raw data such as location and constructive characteristics of pumping wells, analysis of hydrodynamic parameters, data treatment, display and assessment in spreadsheets and graphs, and map drawing.

As a final outcome, the horizontal compartmentalization of the karst

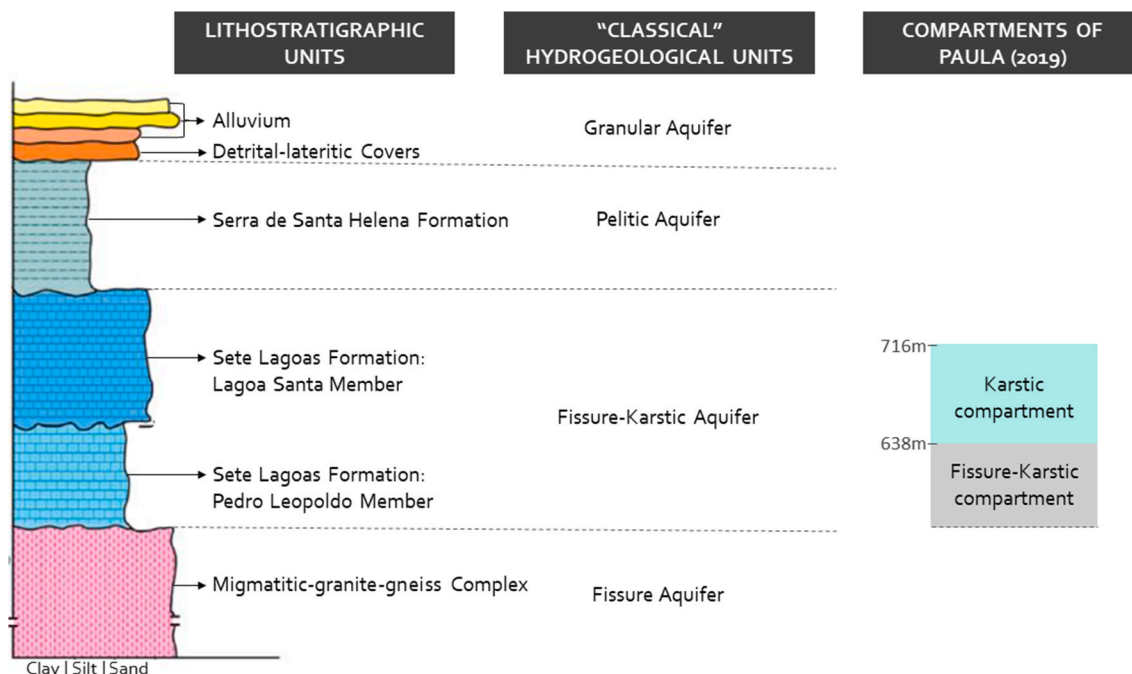


Fig. 4. Comparison between the lithostratigraphic units, the classical hydrogeological units and the compartments proposed by Paula (2019).

aquifer and the vertical compartmentalization of the fissure-karstic and fissure aquifers were proposed, the methodology for which is detailed below. The main idea was to show that in real life the hydrogeological behavior is not restricted to the lithostratigraphic units, but it can vary within a same lithological unit or develop features that are dependent of a combination of two distinct lithologies.

2.1. Horizontal compartmentalization of the Karstic aquifer

As presented previously, the physical hydrogeological compartmentalization in the study area (Fig. 2) was made and refined in previous studies (Paula, 2019; Teodoro, 2020; Ribeiro, 2020) based on the following criteria: sub-basins limits, potentiometry, water balance of the watersheds, results of hydrological connection tests between sinks and springs, and isotope analyses.

Similarly, considering the evolution of studies in the area and the three thematic approaches for the study of karstic aquifers discussed by White (2002) and Pessoa (2005), **hydrogeological** (lithostructural conditioning for underground circulation processes), **hydrodynamic** (hydrologic parameters in the aquifer environment) and **hydrochemical** (processes between water circulation dynamics, lithologies and constituent structures of karst aquifers) aspects were used to identify more karstified sub-compartments within the main compartmentalization of already established hydrogeological basins.

The horizontal compartmentalization was performed just in the same region as the CHM of Paula (2019), because this is the area where more studies were developed and, thus, where more data is available.

Sub-compartments were then defined using map comparisons and identifying where karstification processes are believed to be more intense from the crossing of the following information: (i) lithological domain of the Sete Lagoas formation, especially the Lagoa Santa member (Ribeiro et al., 2003; Teixeira et al., 2020); (ii) areas of carbonate massif outcrop (Paula, 2019); (iii) areas of karstic depressions (Amaral, 2018; Amaral et al., 2019); (iv) cavities mapped in the region (Berbert-Born et al., 1998; Ribeiro et al., 2003); (v) surface drainage patterns and presence of perennial ponds (Berbert-Born, 2002; Paula, 2019); (vi) lineament map interpreted (Velásquez et al., 2018); (vii) measured and inferred spring flows (Paula, 2019); (viii) results of hydraulic interconnections by tracer studies (Auler, 1994; Teodoro et al., 2019; Teodoro, 2020); (ix) results of Ca^{2+} and HCO_3^- concentrations in springs (carbonate dissolution products) (Vieira, 2018; Vieira et al., 2020) and; (x) areas of more recent waters detected from the dating of springs and wells by isotope studies (Ribeiro, 2020).

Thus, to delimit the areas of more intense karstification, the ten aforementioned data were plotted in a map and the locations where these information appeared more frequently and representatively were delimited, ending up in three sub-compartments. In general, there was no hierarchization of the analysis criteria, but a geographical analysis of where features such as the presence of caves, tracer routes and carbonate massifs appeared together and associated with other elements, such as high flowing springs and high Ca^{2+} concentrations.

2.2. Vertical compartmentalization of the fissure-Karstic aquifer and fissure aquifer

The vertical sub-compartmentalization of the assemblage, which includes the fissure-karstic carbonate aquifer and the fissure migmatitic-granite-gneiss complex (crystalline basement) aquifer, was performed to refine the stratifications previously defined by other authors, such as Paula (2019), Ribeiro (2020) and Vieira et al. (2020). The objective was to characterize vertically (and somewhat quantify) the hydrogeological flow conditions in the layered stratigraphic sequence that composes the main local aquifers.

For the delimitations of the sub-compartments, data from deep wells in the study area were mainly used. Unlike Paula (2019), a vertical division based on depths rather than on elevations was chosen,

considering the hypsometric variation of the study area and the great thickness of soil and transported material.

The compartmentalization within the fissure-karstic system was not tied to the division between the Pedro Leopoldo and Lagoa Santa members because it is believed that, in hydrogeological terms, the flow conditions are managed in a more complex way, where the interaction between the two members together with the karstification processes form a single hydrogeological system. In the case of the crystalline basement aquifer unit, the compartmentalization sought to reflect the different hydrogeological characteristics of this unit which behaves sometimes as fissure aquifer and sometimes as aquifuge.

The process of sub-compartmentalization occurred in three distinct phases, the second and third steps being a refinement of the first. In the first one, the fissure-karstic aquifer (carbonates) was analyzed and compared to the fissure aquifer (migmatitic-granite-gneiss complex). In the second, the karstic aquifer was evaluated in relation to its cover and water intakes. In the third, it was sought to understand the functioning of the crystalline basement as a fissure aquifer.

As previously mentioned, for the definition of the vertical sub-compartmentalization of the aquifers, data from wells drilled in the study region were analyzed, which were selected based on the availability of information regarding lithological description, water input data and specific capacity.

Initially, only the wells that had water intakes located solely in the Sete Lagoas formation or in the crystalline basement were used, excluding those with water intakes in more than one lithotype. This resulted in a total of 100 wells, of which 84 were from the Sete Lagoas formation and 16 were representative of the crystalline basement. For the analysis, graphs were made correlating the wells with their number of water inlets described in drilling and their specific capacity obtained from pumping tests.

The second analysis considered the thickness of cover overlying the fissure karstic aquifer described in the lithological profiles of the wells, including the unconsolidated sediments and saprolites, and the presence of the Serra de Santa Helena Formation over the Sete Lagoas formation. For the graphical evaluation, a refinement was made and only the wells with up to 2 (two) water intakes were adopted since they correspond to 73% of the cases. A graph was made in order to show the correlation between the cover depth, the depth of the two first described water inlets and the specific capacity of each well.

Finally, a third analysis was done using only the wells in the crystalline basement, with the objective of differentiating the most fractured portion (fissure aquifer) from the portion without significant fracturing and very low permeability which we consider the "impermeable" base of the system (acting as an aquifuge). In this evaluation, besides the 16 wells with water intakes described only in the basement, other 7 wells with water intakes in Sete Lagoas formation and reaching the basement were considered, totaling 23 wells. The graphical analysis was presented as a basement "profile" where the top of the fresh rock is marked, in order to show if the water inlets are located in the weathered basement or in the fresh rock.

3. Results and discussions

The refinement of the CHM of the EPA Lagoa Santa Karst and surroundings had as outputs the horizontal compartmentalization of the karstic aquifer, and the vertical compartmentalization of the fissure-karstic and fissure aquifers composed of the carbonates of the Sete Lagoas formation and of the migmatitic-granite-gneiss units of the crystalline basement. Note that the local aquifer system is a 3D reality, however, the horizontal and vertical compartmentalization was made in order to simplify the comprehension by focusing on key parts. Thus, the horizontal compartments represent the areas where it is possible to see many karstic features in surface, but it does not mean that the karstifications is restricted or limited only to these areas. The vertical compartments, in turn, represent different hydrogeological behaviors

within the stratified geological layers showing the hydrogeological conditions can vary in the same lithological unit.

3.1. Horizontal compartmentalization of the Karstic aquifer

As a result of the horizontal compartmentalization of the areas with more intense karstification, three sub-compartments were delimited in a

map (Fig. 5) and named according to the hydrogeological basins in which they are located: Escrivânia Gordura sub-compartment; Palmeiras-Jaguara sub-compartment and Palmeiras-Jaguara-Samambaia sub-compartment.

The Escrivânia-Gordura sub-compartment reiterates the connection between the Escrivânia and Gordura sub-basins, as evidenced by the tracer study by Teodoro et al. (2019), occurrence of springs with flow

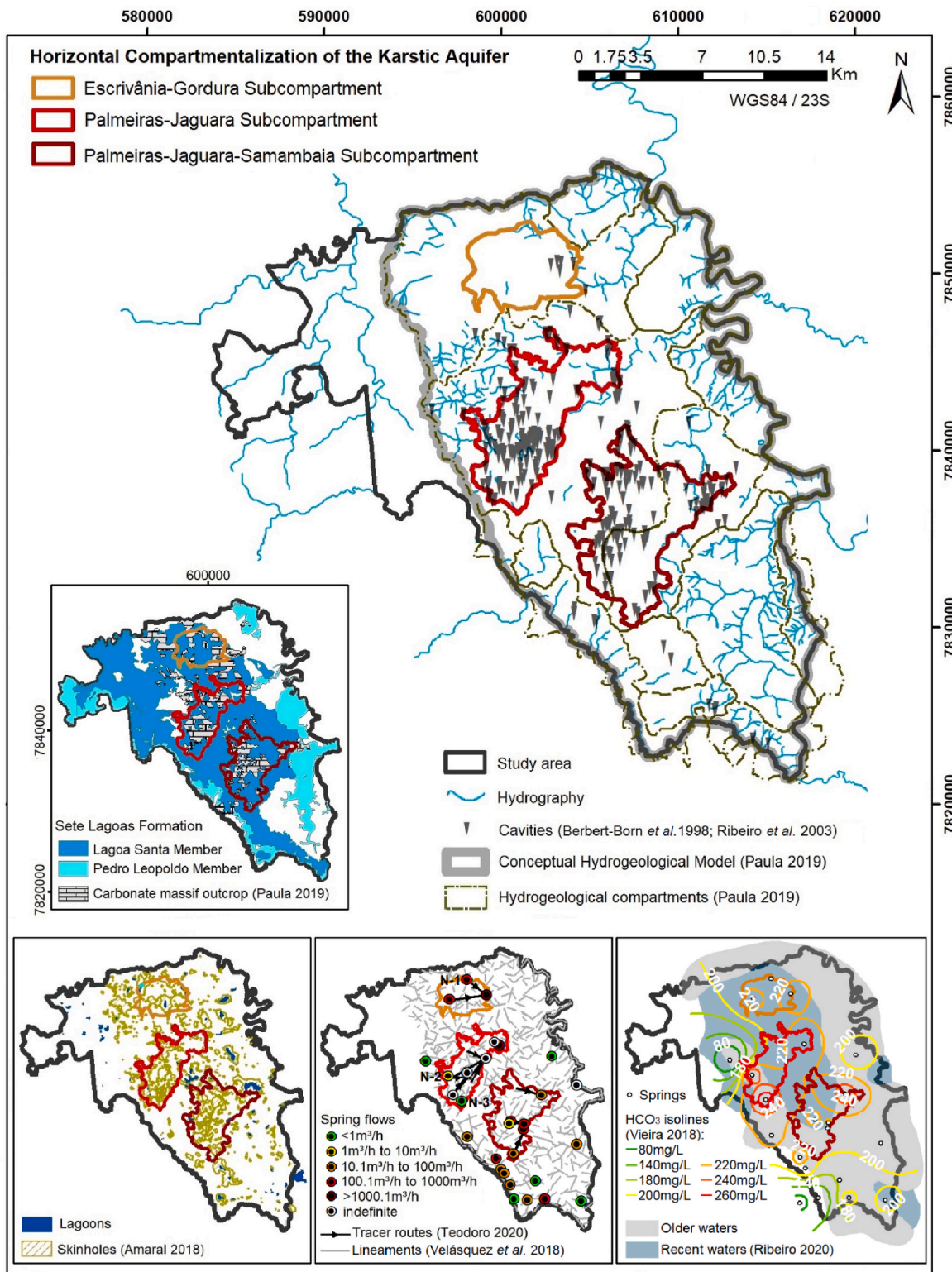


Fig. 5. Proposed horizontal sub-compartmentalization within the karstic hydrogeologic compartments.

rates greater than 500 m³/h (reaching values of up to 2000 m³/h), recent waters according to the isotopic analysis of Ribeiro (2020) and high HCO₃⁻ concentrations in springs (Vieira, 2018). The presence of the perennial Lagoa Bonita lagoon and the Leonardo spring (N-1) is significant as the associated discharge represents an external water input for the karstic system (Paula, 2019).

The central sub-compartment, called Palmeiras-Jaguara, presents the most developed karstification, which is evidenced by a combination of factors such as the expressive number of cavities, exposed carbonate massifs, high flow rate springs and an intricate network of conduits identified by tracer studies of Auler (1994) and Teodoro et al. (2019). In this sub-compartment, the concentrations of HCO₃⁻ and Ca²⁺ ions studied by Vieira (2018) in springs N-2 and N-3 were higher than in other springs in the area, suggesting dissolution of the purer metacalcite of the Lagoa Santa member.

Finally, the Palmeiras-Jaguara-Samambaia sub-compartment presents a significant number of cavities, karstic depressions, dolines, sinkholes, limestone massifs, springs with flow rates higher than 100 m³/h. It also has high concentrations of HCO₃⁻ in springs (Vieira, 2018) and it is an area with a predominance of more recent water according to the isotopic studies of Ribeiro (2020). There is a connection between the Palmeiras-Jaguara and Samambaia sub-basins, which was also evidenced by the studies of Auler (1994) and Teodoro et al. (2019).

3.2. Vertical compartmentalization of fissure-Karstic and fissure aquifers

The focus of the vertical compartmentalization was the karstic carbonate aquifer (main local aquifer unit) and the fissure aquifer of the migmatitic-granite-gneiss basement that has mixed hydrogeological characteristics.

The delimitations of the sub-compartments were based on data from wells drilled in the region: water inputs, lithological profiles, cover thicknesses and specific capacity of the wells. Fig. 6 shows the location of the analyzed wells, their specific capacity and the number of water intakes identified in each of them. Note that we have wells with water inlets just in the Sete Lagoas formation, just in crystalline basement or with water intakes in more lithologies (mixed).

The map information shows that, in general, the wells with the highest specific capacities and more water intakes are associated with the proximity to the drainages, as can be observed along the Da Mata Creek in the southwestern portion of the study area.

In the first analysis, charts were made using data of the specific capacity and the number (and depth) of water intakes in wells located in the migmatitic-granite-gneissic complex (Fig. 7) and in Sete Lagoas formation (Fig. 8). To facilitate visualization, in both cases, groups were divided according to the number of water inlets identified in the geological description. Thus, group "A" corresponds to wells with one

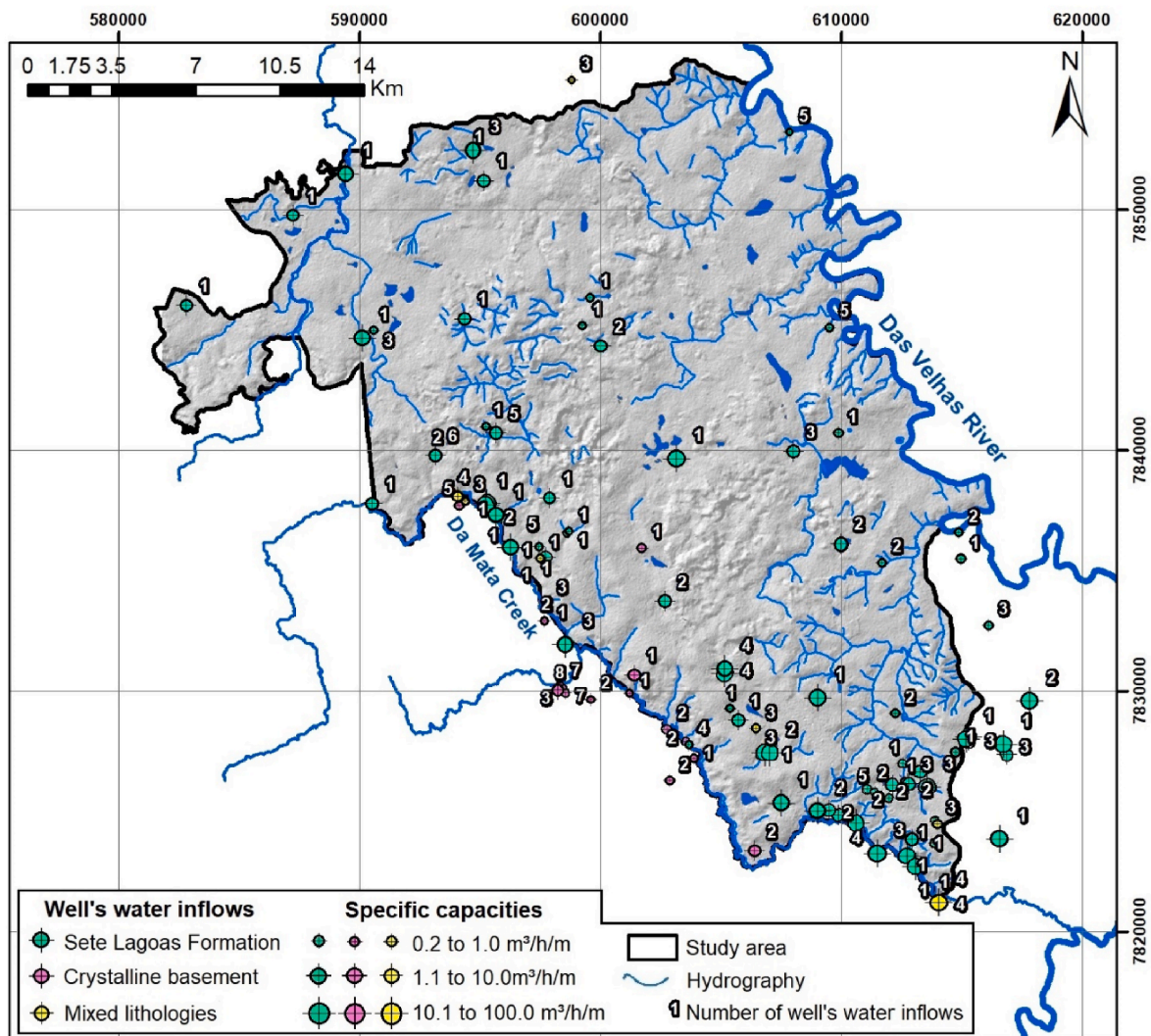


Fig. 6. Wells used in the definition of the vertical sub-compartmentalization of the aquifer system, with the number of water intakes described in each and the specific capacity.

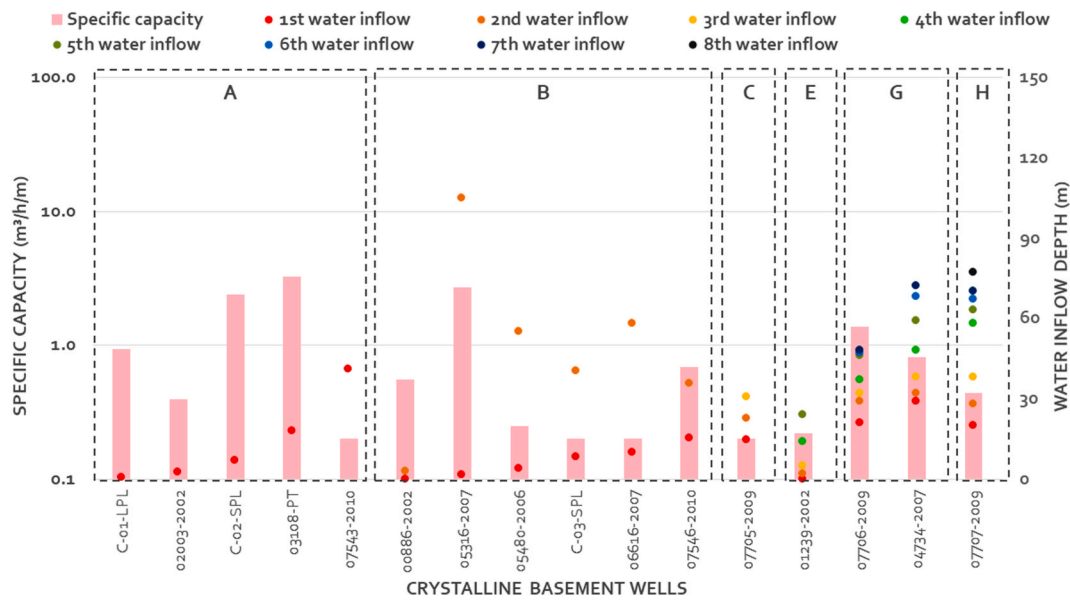


Fig. 7. Charts of the specific capacities and water inputs in the crystalline basement wells.

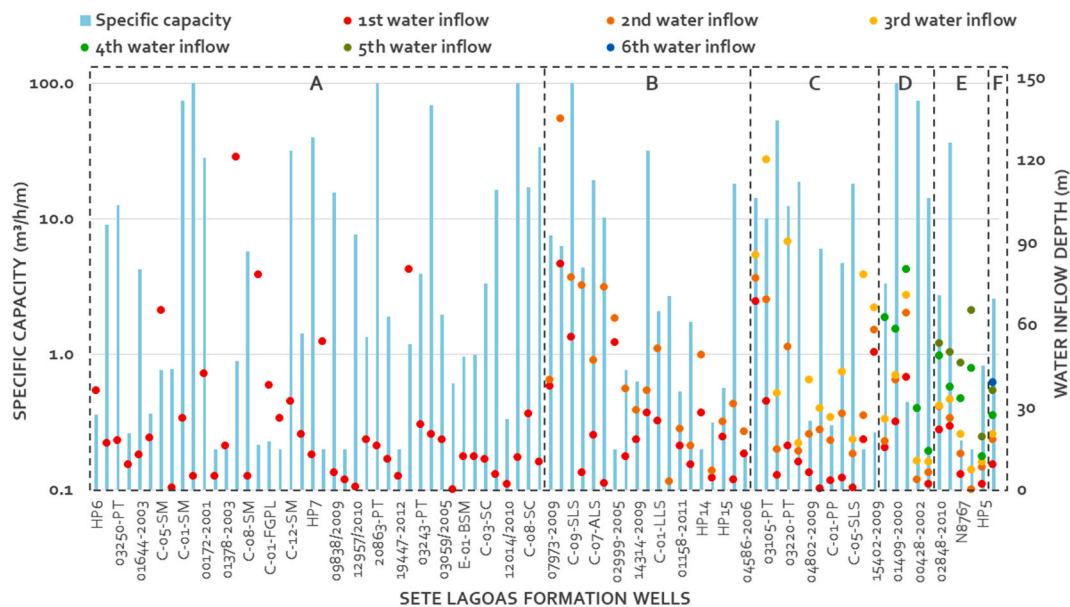


Fig. 8. Charts of specific capacities and water inputs in wells of the Sete Lagoas formation.

water entry, “B” wells with two water entries, “C” wells with three entries and so on, up to group “H” with eight water entries.

The analysis of the charts shows that the wells housed in the crystalline basement tend to present a higher number of water intakes per well than the Sete Lagoas formation. However, the specific capacities in the fissure-karstic aquifer unit of the Sete Lagoas formation (values between 0.2 and 100 m³/h/m) are, in general, much higher than in the fissure aquifer unit of the crystalline basement (0.2–3.3 m³/h/m). Thus, it was noted that, in both aquifers, the specific capacity is independent of the number of water intakes, that is, the wells with a larger number of intakes do not necessarily have the largest specific capacities.

It is also observed that the majority of the wells have up to 2 (two) water intakes described (groups A and B) and it seems that these first water entrances are really the most productive. Furthermore, the highest specific capacities seem to be associated with water intakes of up to 30 m deep in the Sete Lagoas formation and basement aquifer unit (Figs. 7 and 8). It is noteworthy that for this analysis the relative depth within the

units of interest was considered, disregarding the cover and any other surface units (including sediments, soils and pelites of the Serra de Santa Helena formation).

In a second analysis, only the wells of the karstic aquifer were evaluated regarding the thickness of the cover (sediments + soils + Serra de Santa Helena Formation) over the Sete Lagoas formation and the first two water intakes in each well. The chart in Fig. 9 shows the wells organized with increasing cover thickness.

Regardless of the thickness of the overlying material, the first water intakes both productive (associated with high specific capacities) and “unproductive” (with low specific capacities) are up to 30 m deep, suggesting that this would be the area with more fractures and conduits, constituting the most karstified zone. Below this depth, the number of water entries decreases and also does the specific capacity of wells that have water entries just in this deep interval.

Finally, in the third analysis, the water entries described in wells crossing the migmatitic-granite-gneiss basement were evaluated to

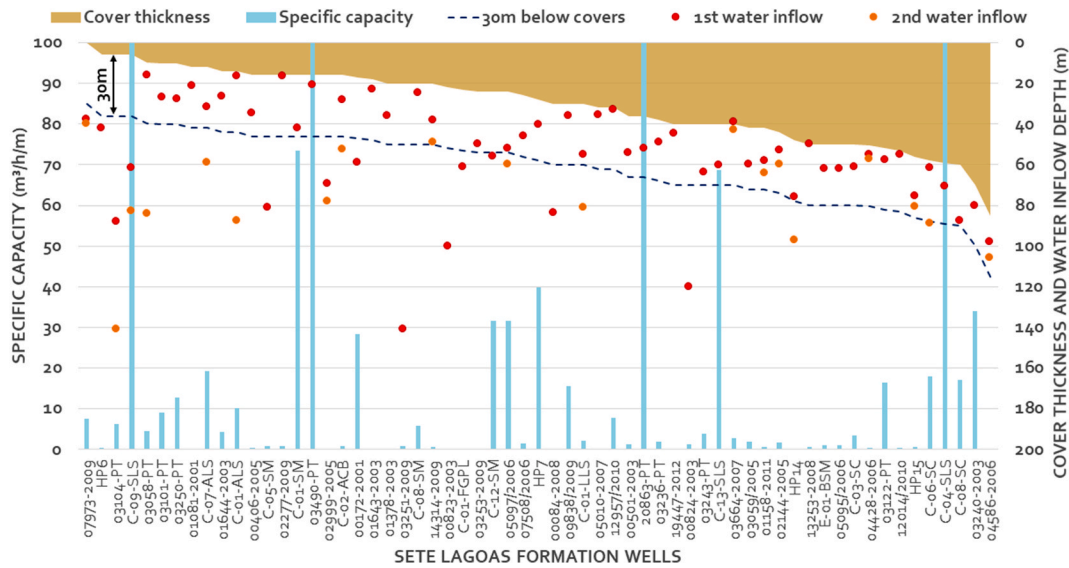


Fig. 9. Wells in the Sete Lagoas formation with up to two water intakes organized in increasing order of the thickness of the cover (sediments + soil + Serra de Santa Helena formation) and with the specific capacity indicated. From the contact between the cover and Sete Lagoas formation a line with a depth of 30 m was projected.

understand the different hydrogeological behaviors in this aquifer unit. In the graph (Fig. 10), the water inlets are represented by dots, so the pink dots represent water inlets in basement and the blue ones are in the Sete Lagoas formation. The beginning of the fresh rock regarding the crystalline basement is marked by the continuous pink line and the dotted line below represents a depth of 60 m in the fresh rock. Water intakes located in the units overlying the basement include only the weathered basement and Sete Lagoas formation. In the chart, it is possible to observe in some wells (01238–2002, 01409–2000, 01378–2003, 00823–2003, 03534–2003) the existence of water intakes along the contact region between the fresh crystalline basement and Sete Lagoas formation, indicating a water circulation zone between the two aquifers.

Within the domain of the migmatitic-granite-gneiss basement, the water intakes are located mainly in the weathered zone (above the fresh rock) and in the first 20 m depth of the fresh rock. With increasing depth,

the water intakes become scarcer, so that the depth of 60 m below the fresh basement (dotted line in the graph) was defined as the “impermeable base” of the system, a zone of very low permeability and where there are practically no more water intakes in the wells.

3.3. Proposed Hydrogeological units

After the definition of the horizontal and vertical sub-compartments, we were able to put together the schematic profile, which illustrates the different hydrogeological units proposed for the study area (Fig. 11): Granular aquifer in the unconsolidated cover, Aquiclude in the Serra de Santa Helena formation pelites, Karstic and Fissure-Karstic Aquifers in the carbonates of the Sete Lagoas formation and Fissure Aquifer and Aquifuge in the Belo Horizonte migmatitic-granite-gneiss complex. In addition to the classic aquifer units (correspondent to the lithostratigraphic units) we proposed a different approach for the

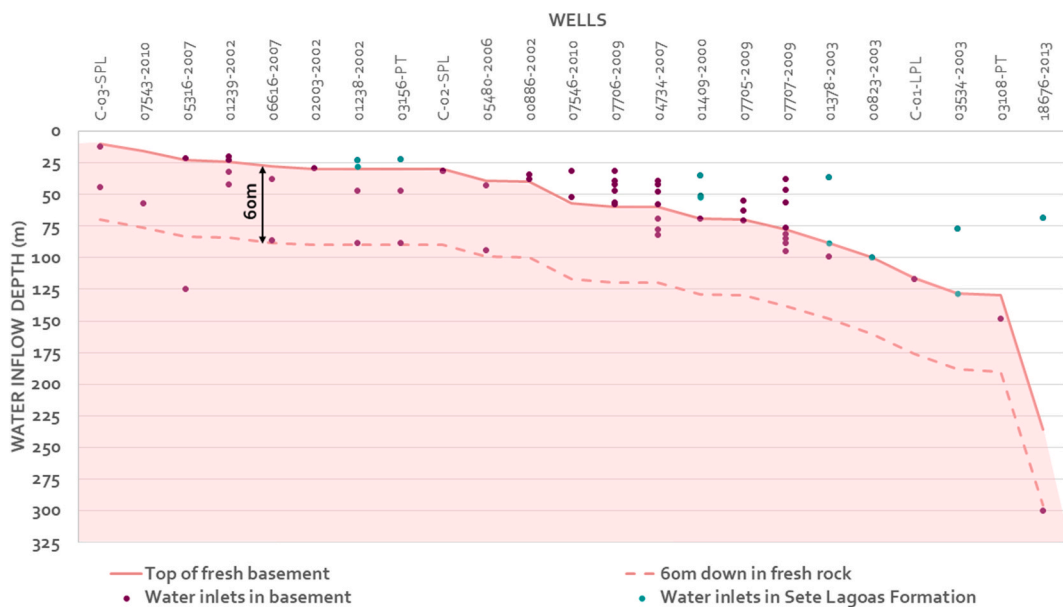


Fig. 10. Top of crystalline basement represented and weathered part projected until 60 m below by the dotted line. The water intakes in the 24 wells are represented by the dots.

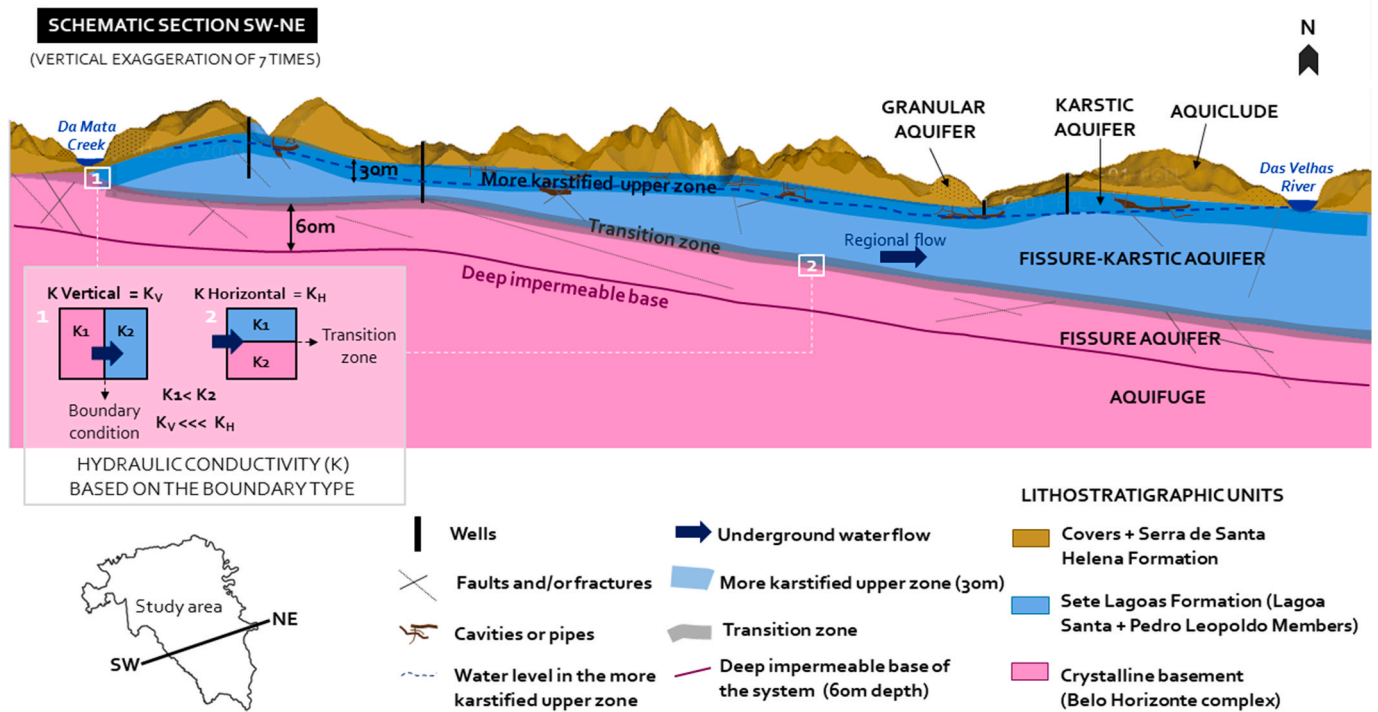


Fig. 11. Schematic profile with the hydrogeological units in the study area.

compartmentalization of the Fissure-Karstic Aquifer based on depths and a delimitation of where the fissure aquifer of the basement became an aquifuge that would not have a significant flow.

The top cover functions as granular aquifers in the coarser portions of the unconsolidated sediments, alluvial deposits and the pelites of the Serra de Santa Helena formation as aquicludes.

The karstic aquifer of the carbonates, in turn, has a more karstified zone in the first 30 m of depth, where the karst aquifer itself is and where most of the cavities, conduits and the most productive wells are believed to be. Below this depth is the fissure-karstic aquifer, with smaller and less frequent cavities and fewer and less productive discontinuities.

Finally, the migmatite granite-gneiss domain has distinct hydrogeological behaviors, consisting in a transitional zone in the areas of deep contact with the Sete Lagoas formation, and a fissure aquifer in the first 60 m depth, where the water inflows and well productivity are associated with the presence of discontinuities. Below this depth, there is the “impermeable base” of the system where an aquifuge behavior and deep boundary conditions are admitted.

Considering the 3D system, the contact between the crystalline basement and the Sete Lagoas Formation presents two distinct hydrogeological contexts. In the lateral contact (represented by situation “1” in Fig. 11), the arrangement of layers is vertical and, considering that the hydraulic conductivity of the fissure aquifer (basement) is much lower than that of the fissure-karstic aquifer (Sete Lagoas formation) and that the main flow is lateral, a negligible flow between the two units is admitted, so that one can consider this lateral contact as a boundary condition. In the contact between Sete Lagoas formation and the deep basement, there is a vertical arrangement between the layers (situation “2” in Fig. 11). Adopting the same premise that the hydraulic conductivity of the fissure-karstic aquifer (Sete Lagoas formation) is higher than that of the fissure aquifer (migmatitic-granite-gneiss complex) and that the main flow is horizontal, there is a transition zone between these two units. This transition zone constitutes a sub-horizontal shear zone (Ribeiro et al., 2003), where Vieira (2018), through hydrogeochemical survey observed that faults and detachment zones in the lithological contacts impact the productivity and flow rate of the wells. Furthermore,

water inlets in the contact help to confirm this transition zone as a water productive area.

4. Conclusions

The study area comprises the EPA Lagoa Santa Karst and surroundings where there is a complex and fragile karstic system of the Sete Lagoas formation, an important groundwater reservoir. The total area of 599 km² presents an expansion to the northwest in relation to Paula’s CHM developed in 2019.

Hydrogeological behavior is not restricted to the lithostratigraphic units, but it can vary within a same lithological unit or develop flow features that are related to a combination of two distinct lithologies. As a final outcome, the horizontal compartmentalization of the karst aquifer and the vertical compartmentalization of the fissure-karstic and fissure aquifers are proposed.

From data crossing and visual spatial analysis, it was proposed the lateral sub-compartmentalization in the karstic aquifer of the Sete Lagoas formation carbonates. The sub-division generated three portions of better developed karstification (Escrivânia Gordura sub-compartment; Palmeiras-Jaguara sub-compartment and Palmeiras-Jaguara-Samambaia sub-compartment) based on presence of caves, karstic depressions, carbonate outcrops, sinkhole drainages, high-flow springs, recent waters dated by isotopes, proven connections by tracer studies and areas with higher calcium and carbonate concentrations.

Subsequently, the vertical sub-compartmentalization of the fissure-karstic aquifer of the Sete Lagoas formation carbonates and the fissure aquifer of the migmatitic-granite-gneiss unit was made using data of specific capacity, depths of water intakes in wells and analyses of the cover overlying the formations of interest. The compartmentalization within the fissure-karstic system was not tied to the division between the Pedro Leopoldo and Lagoa Santa members and was focused on depths rather than altitudes.

Data analysis showed that wells with the highest specific capacities and more water intakes registered are associated with the proximity to the drainages. Moreover, it was noted that the specific capacity is

independent of the number of water intakes. So, wells with a larger number of intakes do not necessarily have the largest specific capacities, on the contrary, the first two water inlets seem to be the most productive.

The vertical compartmentalization in the carbonates proposes that the first 30 m depth correspond to the most karstified zone, composing the karstic aquifer itself, and below that, until the contact with the basement, there is a fissure-karstic aquifer with less occurrence of conduits and discontinuities and less productive wells.

For the crystalline basement, it was seen that the water intakes are located mainly in the weathered zone (above the fresh rock) and in the first 20 m depth of the fresh rock. With increasing depth, the water intakes become scarcer. Thus the depth of 60 m below the fresh basement was defined as the “impermeable base” of the system, where there is a zone of very low permeability and practically no more water intakes in the wells, being classified as an aquifuge.

The existence of water inlets along the contact region between the fresh crystalline basement and Sete Lagoas formation was also remarkable, indicating a water circulation zone between the two aquifers.

Finally, by integrating all analyses, the division of six distinct aquifer units within the main lithostratigraphic units was proposed: Granular Aquifers (covers), Aquiclude (pelites of the Serra de Santa Helena formation), Karstic and Fissure-Karstic Aquifer (carbonates of the Sete Lagoas formation) and Fissure Aquifer and Aquifuge (Belo Horizonte migmatitic-granite-gneiss complex). The compartmentalization proposed constitutes the a knowledge evolution in the study area and it could be helpful for local water resources management.

CRedit authorship contribution statement

Júlia Cotta Maciel Dantas: Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Project administration, Methodology, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Leila Nunes Menegasse Velásquez:** Supervision. **Rodrigo Sérgio de Paula:** Writing – review & editing, Validation, Supervision, Resources.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgements

We gratefully thank the National Center for Research and Conservation of Caves (Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas - CECAV) for supporting studies in the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area.

References

Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A., 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: Pinto, C.P., Martins-Neto, M.A. (Eds.), *Bacia Do São Francisco. Geologia e Recursos Naturais*, Belo Horizonte, SBG, pp. 9–30, 2001.

Amaral, D.G.P., 2018. Análise do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas da região da APA Carste Lagoa Santa (MG). MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 156.

Amaral, D.G.P., Velásquez, L.N.M., Rodrigues, P.C.H., 2019. Comportamento hídrico das depressões cársticas da região de Lagoa Santa, MG. *Águas Subterrâneas* 33, 169–209.

Andrade, I.B., Amorim, J.B., 2018. Mapeamento geológico com ênfase na relação hidráulica entre o Complexo granítico-gnáissico com o grupo Bambuí. Graduation

final work, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 180.

Auler, A.S., 1994. Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst, Brazil. Msc Thesis, Department of Geography and Geology, Western Kentucky University, Bowling Green, p. 110.

Berbert-Born, M., Horta, L.S., Dutra, G.M., 1998. Levantamento espeleológico. In: CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. *APA Carste de Lagoa Santa: Patrimônio Espeleológico, Histórico e Cultural – Volume II*. CPRM/IBAMA, Belo Horizonte, p. 71.

Berbert-Born, M., 2002. Carste de Lagoa Santa, MG - Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In: Schobbenhaus, C., Campos, D.A., Queiroz, E.T., Winge, M., Berbert-Born, M. (Eds.), *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*, 1, Brasília, DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), pp. 415–430.

Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF), 2021. A Bacia viewed 30 August 2021. <https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/>.

Galvão, P.H.F., 2015. Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas. PhD Thesis. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 124.

Karfunkel, J., Aranha, P.R.A., Büchi, A., Pimenta, F., Pagung, R., Silva Pinto, J.A., Hofmann, M., Hoppe, A., 2006. Registros neotectônicos entre Vespasiano e Pedro Leopoldo ao norte de Belo Horizonte, Minas Gerais. In: XLII Congresso Brasileiro de Geologia. Aracaju, Anais, p. 292.

Miller, J.A., 1999. Introduction and national summary. In: USGS – U.S. Geological Survey. *Groundwater Atlas Of the United States*. USGS.

Palmer, A.N., 1991. Origin and morphology of limestone caves. *Bull. Geol. Soc. Am.* 103 (1), 1–21.

Paula, R.S., 2019. Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. PhD Thesis. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 272.

Pessoa, P.F.P., Mourão, M.A.A., 1998. Levantamento hidrogeológico. In: APA Carste de Lagoa Santa - Meio físico. Belo Horizonte, p. 36. IBAMA; CPRM.

Pessoa, P.F.P., 2005. PhD Thesis, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. In: *Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos da Região de Lagoa Santa, MG*. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 335.

Ribeiro, C.G., 2020. *Compartmentação dos fluxos do sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí a partir dos isótopos ²H, ¹⁸O e ³H na região de Lagoa Santa, Minas Gerais*. 2020. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 234.

Ribeiro, C.G., Meireles, C.G., Lopes, N.H.B., Arcos, R.E.C., 2016. Graduation Final Work. In: *Levantamento Geológico estrutural Aplicado aos Fluxos dos Aquíferos Cárstico-Fissurais da Região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais*. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Ribeiro, C.G., Velásquez, L.N.M., Paula, R.S., Meireles, C.G., Lopes, N.H.B., Arcos, R.E.C., Amaral, D.G.P., 2019. Análise dos fluxos nos aquíferos cársticos-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Águas Subterrâneas* 33 (1), 12–21.

Ribeiro, J.H., Tuller, M.P., Filho, A.D., Padilha, A.V., Córdoba, C.V., 2003. Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais – relatório final. In: Horizonte, Belo (Ed.), *Escala 1:50.000*. 2, p. 54. CPRM.

Schöll, W.U., 1976. Sedimentologia e geoquímica do Grupo Bambuí na parte sudeste da Bacia do São Francisco. In: XXIX Congresso Brasileiro de Geologia, Ouro Preto. Anais 29 (2), 207–231.

Shinzato, E., 1998. MS Dissertation, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense. In: *O carste da Área de Proteção Ambiental de Lagoa Santa (MG) e sua influência na formação dos solos*. Campo dos Goytacazes, p. 117.

Teixeira, G.M., Pena, M.A.C., Silva, P.H.P., 2020. Avaliação da conectividade hidrogeológica entre a região a sudeste de Sete Lagoas e a APA Carste de Lagoa Santa, MG. Graduation final work, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 282.

Teodoro, M.I.P., Velásquez, L.N.M., Fleming, P.M., Paula, R.S., Souza, R.T., Doi, B.M., 2019. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas* 33 (4), 392–406.

Teodoro, M.I.P., 2020. Hidrodinâmica das zonas cárstica e cárstica-fissural do sistema aquífero da Formação Sete Lagoas por meio de traçadores corantes e da análise das estruturas rúpteis na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 196.

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., Almeida, S.B.S., 2018. 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 nº22.317., 93–109.

Vieira, L.C.M., 2018. Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. MS Dissertation, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 154.

Vieira, L.C.M., Velásquez, L.N.M., Dussin, T.M., Borba, R.P., 2020. Caracterização Hidrogeoquímica dos aquíferos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Geociências* 39 (4), 1087–1105.

White, W.B., 2002. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Eng. Geol.* 65, 85–105.

3 MODELAGEM DE FLUXO SUBTERRÂNEO EM CARSTE NEOPROTEROZÓICO COM BASE EM ROTAS DE TRAÇADORES CORANTES

Júlia Cotta Maciel Dantas¹, Rodrigo Sérgio de Paula¹, Leila Nunes Menegasse Velásquez ¹, Breno Alexandre Pereira²

¹Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Campus Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais

²IGEO – Hidrogeologia Ltda.

RESUMO: O presente estudo consistiu no desenvolvimento de um modelo hidrogeológico numérico da área da APA Carste de Lagoa Santa e arredores no estado de Minas Gerais, Brasil, com o objetivo de auxiliar no entendimento do regime de fluxo subterrâneo local. A modelagem foi feita em regime permanente e, após a calibração do modelo, foram feitas simulações de rotas de fluxo subterrâneo e uma avaliação das trocas de água calculadas pelo modelo, entre o aquífero cárstico e as demais unidades aquíferas locais. O modelo foi desenvolvido com base em dados de pluviometria, vazões de nascentes e elevações de níveis d'água em poços. Foi adotada a abordagem de Meio Poroso Equivalente (MPE) regida pela Lei de Darcy para a representação da matriz rochosa, combinada com a Lei de Manning-Strickler, em discrete features, para representação condutos cársticos. As calibrações obtidas foram satisfatórias e atenderam as boas práticas de modelagem numérica em relação aos níveis d'água, vazões de nascentes e balanço de massa. Os valores de condutividade hidráulica e as taxas de recarga, obtidas por meio de retroanálises, foram condizentes com valores observados na literatura. Os resultados apresentaram boa aderência em relação ao fluxo subterrâneo regional ao nível de base e indicaram como áreas de entrada de água externas ao domínio de estudo podem ser relevantes para explicar as altas vazões em algumas surgências cársticas. Além disso, a partir da simulação da trajetória de partículas, foi possível simular rotas de traçadores, comprovadas em trabalhos anteriores, e inferir possíveis rotas de fluxos em direção às surgências cársticas principais.

Palavras-chave: Hidrogeologia cárstica; APA Carste de Lagoa Santa; Modelo Hidrogeológico Numérico.

ABSTRACT: The current study consisted in numerical hydrogeological model development in the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area and surroundings, state of Minas Gerais, Brazil, in order to help with the understanding of the local underground water flow regime. The modelling was done in permanent basis and after its calibration, simulations of groundwater flow and an evaluation of the water changes calculated by the model between the karstic aquifer and the others hydrogeological units were done. The model was developed based on pluviometric data, springs discharges and water levels from wells. It was used the approach of the Equivalent Porous Media (EPM) governed by Darcy's Law to represent the rock matrix, combined with the Manning Stricker Law applied in discrete features to represent the karstic conduits. The obtained calibration for water levels, springs discharges and mass balance were satisfactory and aligned with modelling good practices. The hydraulic conductivities and recharge rates obtained by back-analysis were consonant with literature references. The results were aligned with the regional underground water flow to basis level and indicated how external water entrances can be relevant to explain the higher discharge rates observed in some karstic springs. Moreover, it was possible to simulate tracer's routes proven in previous studies and to infer possible flow paths to the main karstic springs from particle's path simulation.

Keywords: Karst hydrogeology; APA Karst of Lagoa Santa; Hydrogeological Numerical Model.

1 - INTRODUÇÃO

Na região central de Minas Gerais encontra-se o carste mais estudado do Brasil para o qual foi desenvolvido um modelo hidrogeológico numérico visando a representação do fluxo subterrâneo desse frágil sistema aquífero. A área de estudo possui aproximadamente 600 Km² e abrange, integralmente, a Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa (APA Carste de Lagoa Santa / Decreto nº 98.881) e suas imediações nos municípios de Lagoa Santa, Confins, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Capim Branco, Prudente de Moraes, Sete Lagoas e Funilândia (Figura 1).

Além de patrimônio paleontológico e arqueológico, a área possui grande importância socioeconômica como parte do polo industrial da capital mineira e como importante reservatório de água subterrânea para o abastecimento da população urbana local (RIBEIRO *et al.* 2003).

A região é, ainda, alvo de estudos desde o século XIX, sendo um importante sítio da ocupação humana pré-histórica no Brasil (BERBERT-BORN 2002). No âmbito das geociências, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos nas últimas décadas, podendo-se citar: o estudo da dinâmica dos recursos hídricos de Silva *et al.* (1987), a geomorfologia cárstica de Kohler na região de Lagoa Santa (1989), a caracterização hidroquímica do Carste de Matozinhos-Pedro Leopoldo de Auler (1994), o estudo do carste encoberto de Pessoa (2005), o Projeto APA Carste Lagoa Santa (PESSOA & MOURÃO 1998) e o mapeamento geológico do Projeto Vida (RIBEIRO *et al.* 2003). Desde 2015, a área ganhou ainda mais relevância a partir de uma série de estudos multidisciplinares que vêm sendo desenvolvidos dentro do “*Projeto de Implantação e Adequação 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*” (UFMG/GERDAU/CECAV), dentre os quais encontra-se o presente trabalho. No mesmo projeto, destacam-se também: o Modelo Hidrogeológico Conceitual de Paula (2019), o mapeamento de detalhe à noroeste da área da APA Carste Lagoa Santa de Teixeira, Pena & Silva (2020), o estudo de traçadores de Teodoro (2020) e o estudo de lagoas do trabalho de Pacheco Neto *et al.* (no prelo).

Em continuidade aos estudos realizados na região, foi construído um modelo hidrogeológico numérico, com o objetivo de consolidar os resultados obtidos nos trabalhos anteriores e auxiliar no entendimento do regime de fluxo subterrâneo local. Embora tenha limitações, a modelagem numérica é uma importante ferramenta, que possibilita o entendimento e conceituação de processos hidrogeológicos existentes através de uma estrutura quantitativa que organiza e sintetiza os dados de campo disponíveis (ANDERSON, WOESSNER & HUNT 2015).

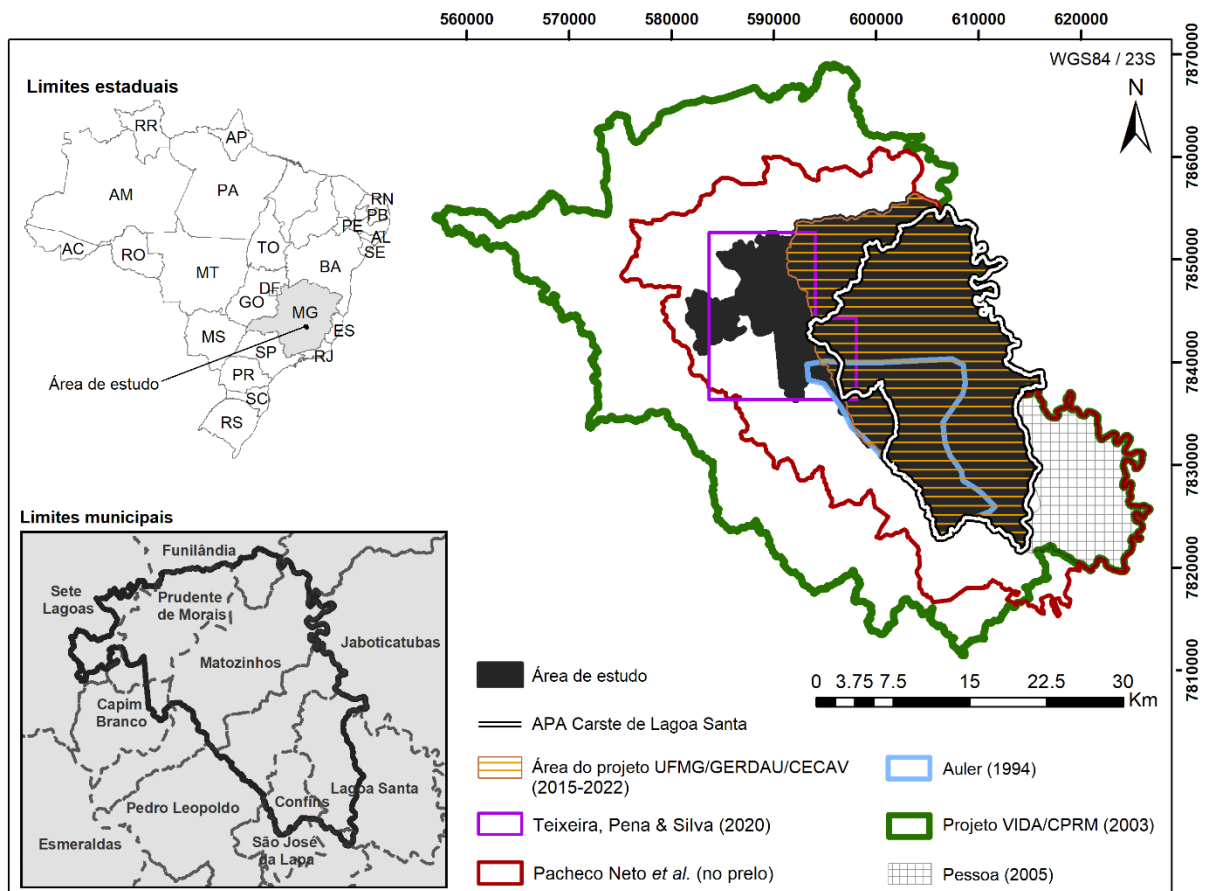


Figura 1 - Localização da área de estudo e limite da APA Carste Lagoa Santa em relação aos limites municipais e estaduais e áreas de alguns dos estudos geológicos e hidrogeológicos realizados.

2 - CLIMA E GEOMORFOLOGIA

A área de estudo está no domínio do Clima Tropical Brasil Central (IBGE 2002) e é classificada, segundo os critérios de Köppen, como tropical úmida com inverno seco e verão chuvoso (HERAS 1972). A média pluviométrica, considerando dados de 4 estações pluviométricas locais entre 1980 e 2019, é de cerca de 1270 mm/ano e

tem-se um regime de chuvas bem definido, no qual os meses de outubro a abril marcam o período chuvoso e, os meses de maio a setembro, definem o período seco.

Em relação aos aspectos geomorfológicos a região é marcada por paisagens cársticas com feições como cavernas, dolinas e sumidouros. Segundo Auler (1994) o relevo é representado por seis feições principais: planaltos cársticos, depressão Mocambeiro, superfícies cársticas encobertas, superfícies filíticas, planos fluviais e domínio ígneo-metamórfico.

3 - GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA LOCAL

No contexto geológico, a área de estudo está inserida, regionalmente, na porção sul do Cráton do São Francisco, sob os domínios da cobertura sedimentar neoproterozóica do Grupo Bambuí (ALKIMIM; MARTINS-NETO, 2001). No contexto geológico local destacam-se o mapeamento geológico do Projeto Vida (Ribeiro *et al.* 2003), o mapeamento geológico na área do Projeto UFMG/GERDAU/CECAV por Ribeiro *et al.* (2016) e o mapeamento de detalhe, à noroeste da área da APA Carste Lagoa Santa, de Teixeira, Pena & Silva (2020).

Localmente (Figura 2), da base para o topo, têm-se as rochas metamórficas arqueanas do embasamento cristalino (Complexo Granito-Gnáissico-Migmatítico Belo Horizonte) sobrepostas em contato tectônico discordante por coberturas neoproterozoicas e sub-horizontais do Grupo Bambuí: a Formação Sete Lagoas e a Formação Serra de Santa Helena (RIBEIRO *et al.*, 2003; RIBEIRO *et al.* 2016, RIBEIRO *et al.* 2019; Teixeira, Pena & Silva 2020).

A Formação Sete Lagoas divide-se nos membros Pedro Leopoldo (inferior, composto por metacalcários calcíticos cristalinos impuros, com granulação fina a média e recristalização parcial a total) e Lagoa Santa (superior, composto por metacalcários calcíticos cristalinos puros, com granulação média a grossa e recristalização parcial a total) (Ribeiro *et al.* 2016). Já a Formação Serra de Santa Helena, sobreposta à Formação Sete Lagoas, constitui-se de metapelitos - comumente denominados ardósias - que, em superfície, geralmente se apresentam

como saprolitos relativamente preservados e com estruturas reliquias (Ribeiro *et al.* 2016). No topo da estratigrafia, dois tipos de coberturas cenozoicas (coberturas detrito-lateríticas e coberturas aluvionares) (RIBEIRO *et al.*, 2003) ocupam, principalmente, as margens de drenagens.

Hidrogeologicamente, a área de estudo é dividida em seis unidades hidrogeológicas (DANTAS, VELÁSQUEZ & PAULA 2023): (1) Aquífero Granular das coberturas inconsolidadas, (2) Aquiclude em saprolitos e pelitos Formação Serra de Santa Helena, (3A) Aquífero Cárstico e (3B) Aquífero Cárstico-Fissural nos carbonatos da Formação Sete Lagoas e (4A) Aquífero Fissural e (4B) Aquífugo no domínio dos granitos gnaisse-migmatíticos (Figura 2).

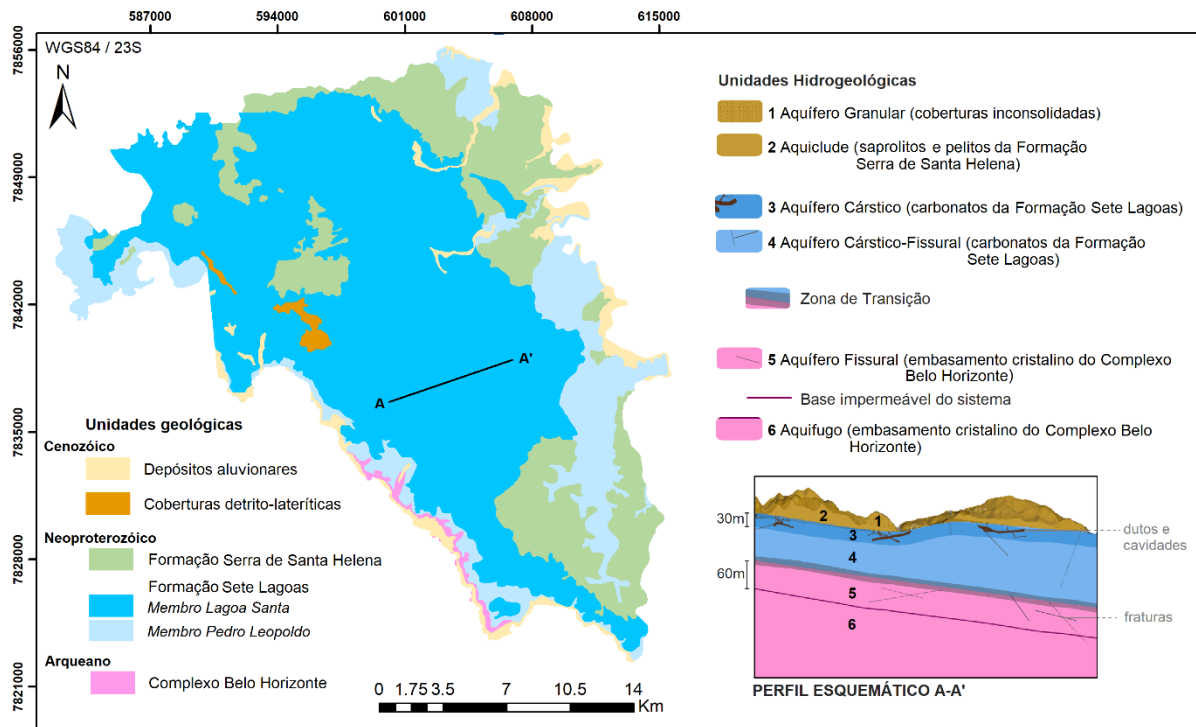


Figura 2 – Mapa geológico compilado com dados de Ribeiro *et al.* 2003, Ribeiro *et al.* (2016) e Teixeira, Pena & Silva (2020) e unidades hidrogeológicas propostas por Dantas, Velásquez & Paula. (2023). O perfil A-A' mostra a correspondência entre as unidades litoestratigráficas e as unidades hidrogeológicas.

Tais unidades hidrogeológicas, contudo, quando analisadas sob aspectos como hidroquímica, isótopos, balanço hídrico, dinâmica de fluxo subterrâneo, controle estrutural e geomorfologia cárstica, revelam a complexidade do sistema hidrogeológico local. Nesse contexto, a condutividade hidráulica que é uma das principais características que definem uma unidade aquífera, pode variar muito dentro

de uma mesma unidade hidrogeológica seja por fatores estruturais (como fraturamento ou carstificação), competência das rochas (rochas sãs ou intemperizadas) e ainda pela escala de análise (regional, escala de poços ou escala de mão). A Figura 3 apresenta um comparativo entre as condutividades hidráulicas obtidas em diferentes trabalhos na área de estudo (DE PAULA 2019) e regiões de Lagoa Santa (SILVA, 2003; PESSOA, 2005) e Sete Lagoas (PESSOA, 1996; BATISTA, 2009; MACHADO, 2011; CASTRO, LOUREIRO & VIANA 2011; GALVÃO, HALIHAN & HIRATA, 2016).

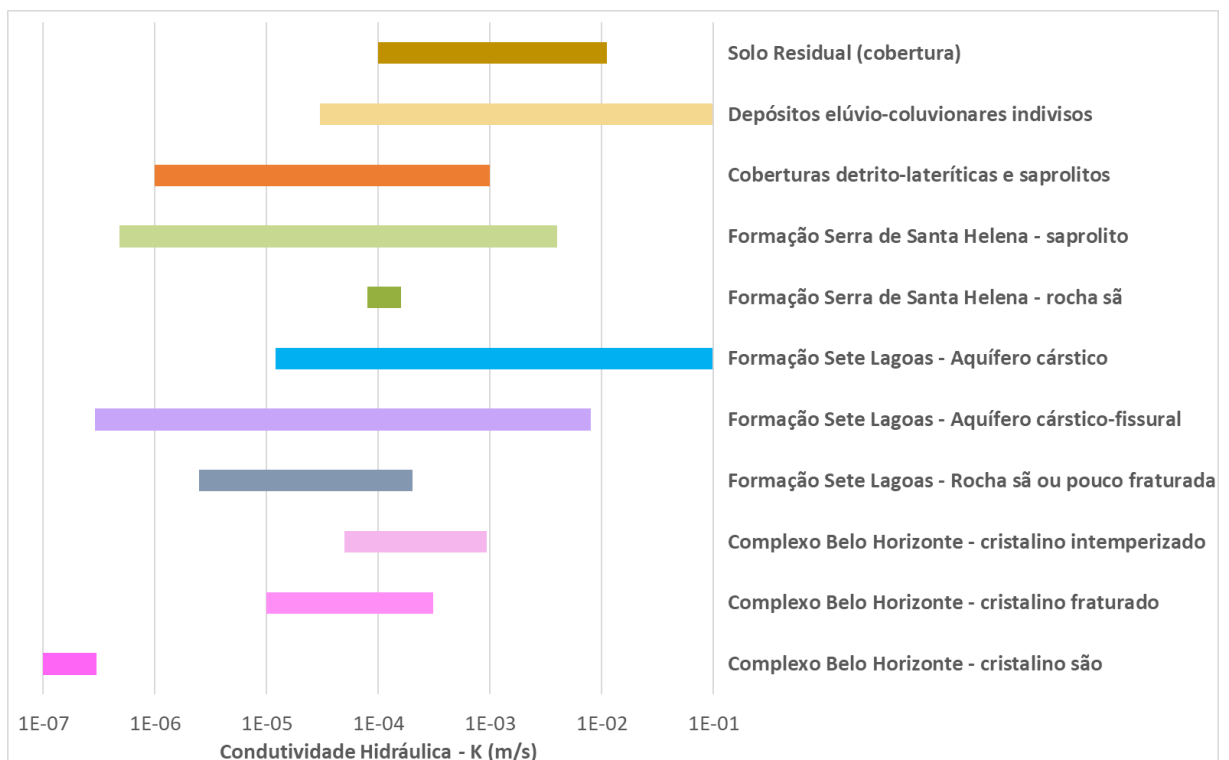


Figura 3 – Gráfico comparativo da variação das condutividades hidráulicas nas diferentes unidades litológicas, obtidas através de estudos variados.

Nota-se que o aquífero Sete Lagoas carstificado possui as maiores condutividades hidráulicas em relação aos demais e que os granitos-gnaisses do embasamento são os que possuem as menores condutividades hidráulicas quando não fraturados.

O sistema cárstico local, foco da modelagem numérica, constitui um aquífero cárstico propriamente dito nos primeiros 30 m de profundidade da porção sã das rochas da Formação Sete Lagoas, onde estão concentradas as porções com maior

carstificação e fraturamento. Na porção inferior da unidade, o aquífero passa a ser classificado como cárstico-fissural, em uma zona com cavidades menos frequentes e menores, e descontinuidades mais esparsas e menos produtivas (DANTAS, VELÁSQUEZ & PAULA 2023).

Já o domínio dos granitos-gnaisses funciona como uma zona transicional nas áreas de contato com a Formação Sete Lagoas e, nos primeiros 60 m de profundidade na rocha sã, constitui um aquífero fissural onde a produtividade está associada a presença de descontinuidades. Abaixo dessa porção, admite-se um comportamento de aquífugo e que pode ser considerado como base impermeável do sistema (DANTAS, VELÁSQUEZ & PAULA 2023).

4 - BACIAS HIDROGEOLÓGICAS: ENTRADAS E SAÍDAS DE ÁGUA NO SISTEMA E DADOS DE MONITORAMENTO

No contexto hidrográfico, o Rio das Velhas delimita a área à leste e é o nível de base regional onde a maior parte das drenagens desagua). A oeste da área, tem-se o Ribeirão da Mata que é tributário do Rio das Velhas e está em uma área de divisor de águas em relação as bacias vizinhas (PAULA 2019). De maneira geral, os fluxos superficiais e subterrâneos locais vão de oeste para leste, em direção ao Rio das Velhas (Figura 4).

As principais entradas de água no sistema se dão através da recarga pluviométrica em superfície, a qual ocorre de maneira diferente nas áreas de maciços carbonáticos aflorantes, dolinas e áreas cobertas por solos. Existem também alguns tipos de lagoas que funcionam localmente como zonas de recarga para os aquíferos subjacentes (AULER 1995). Admite-se que existam ainda entradas externas de água em locais com surgências cársticas de elevadas vazões, conforme sugerido por Paula (2019) nas áreas das nascentes Nas-27 e Nas-16 (Figura 4).

As principais saídas de água do sistema ocorrem por meio das nascentes e surgências cársticas de alta vazão que formam as principais drenagens locais. Há também saídas para porções externas da área de estudo nas porções sudoeste e sul

(Nas-33, Nas-26, Nas-24, Nas-25 e Nas-08), próximo ao Ribeirão da Mata, conforme sugerido por Paula (2019).

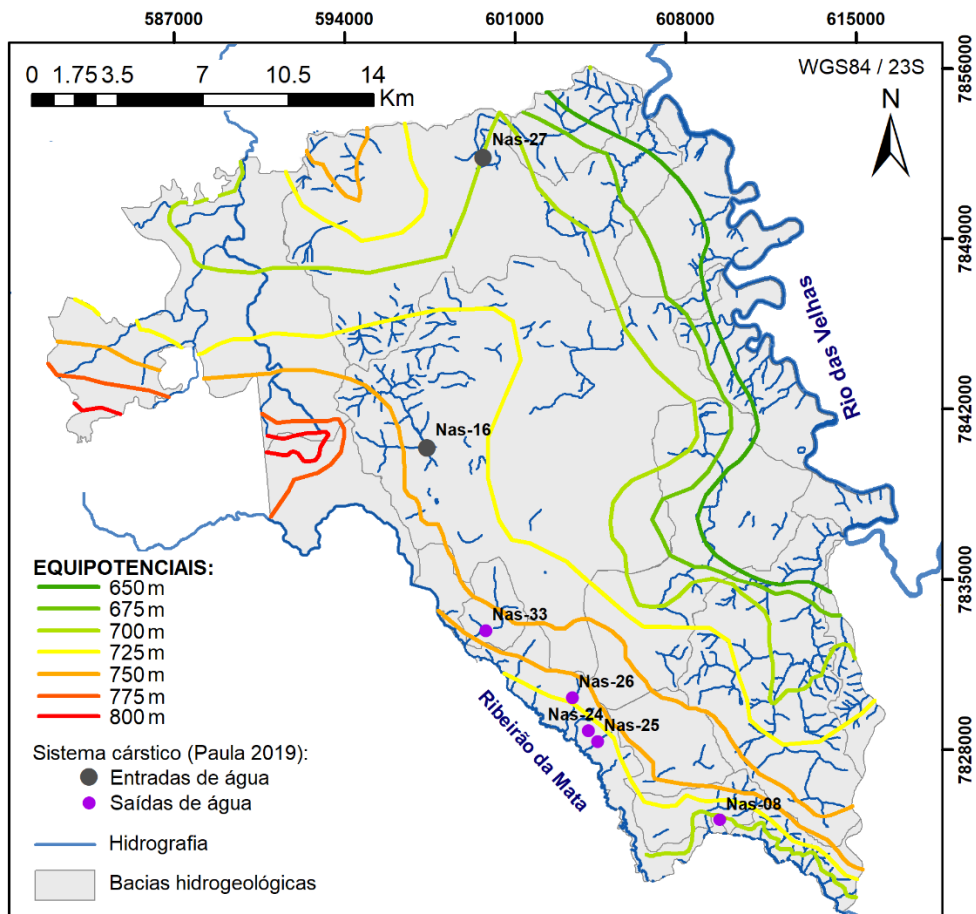


Figura 4 – Linhas equipotenciais de carga hidráulica do calcário e áreas de entrada e saída de água no sistema cárstico definidas por Paula (2019).

São identificadas onze sub-bacias na área de estudo, cujas principais drenagens são: córregos Flor, Gordura, Jaguará, Palmeiras, Samambaia e Jaque, Ribeirão Jequitibá, Ribeirão da Mata e Rio das Velhas. As bacias Escrivânia-Gordura, Palmeiras-Jaguará e Samambaia são preponderantemente cársticas, com predominância de fluxo subterrâneo e a existência de componentes cársticos tais como cavernas, condutos, sumidouros, dolinas e ressurgências. Nesse contexto, Paula (2019) mostrou que as vazões dos córregos nessas bacias correspondem a cerca de 95% das vazões medidas em nascentes cársticas localizadas nas cabeceiras destes cursos d'água.

Além disso, estudos anteriores, como os de traçadores de Auler (1994), Teodoro *et al.* (2019) e Teodoro (2020) evidenciam a conexão entre as sub-bacias

Escrivânia e Gordura, Palmeiras e Jaguará e Jaguará e Samambaia. Essas conexões foram também consideradas por Dantas, Velásquez & Paula (2023) na delimitação de subcompartimentos cársticos horizontais, onde se entende que há um processo de carstificação mais intensa.

Para a montagem e calibração do Modelo Hidrogeológico foram consideradas as divisões por bacias e utilizados os dados de monitoramento da pluviometria média histórica de 4 estações, entre os anos de 1980 e 2019; das medições de nível d'água em 11 poços de monitoramento em outubro/2018 (Tabela 1); dados de vazão de 36 nascentes de setembro/2017 e dados das vazões médias mensais dos córregos Flor e Jaque de setembro/2017 e outubro/2018. Ressalta-se que as vazões dos córregos Gordura, Palmeiras, Jaguará e Samambaia foram representadas a partir das surgências cársticas principais que abastecem essas drenagens (Paula 2019) e que não há dados disponíveis de vazão do ribeirão Jequitibá na área de estudo, o qual encontra-se antropizado e recebe um volume significativo de esgoto da cidade de Sete Lagoas, alterando a sua vazão original.

Tabela 1 – Dados dos poços de monitoramento utilizados como base para a calibração dos níveis d'água.

POÇO	COTA NÍVEL D'ÁGUA (out/2018)	PROFUNDIDADE (m)	LITOLOGIA PRINCIPAL ¹	CÓDIGO
P01	615.06	>60m	-	N63
P02	689.55	148	Calcário	N6162
P03	721.77	150	Gnaiss migmatítico	C03-CP
P04	723.39	120	Calcário	C01-PP
P05	698.32	61	Calcário	P-05
P06	779.19	47	Calcário	E06-ACB
P07	678.48	126.5	Calcário	00681-2004
P08	740.55	50	Calcário	03056-PT
P09	715.47	242	Calcário	HP-1
P10	676.40	47	Calcário	C02-ALS
P11	673.11	95	Calcário	17613-PT

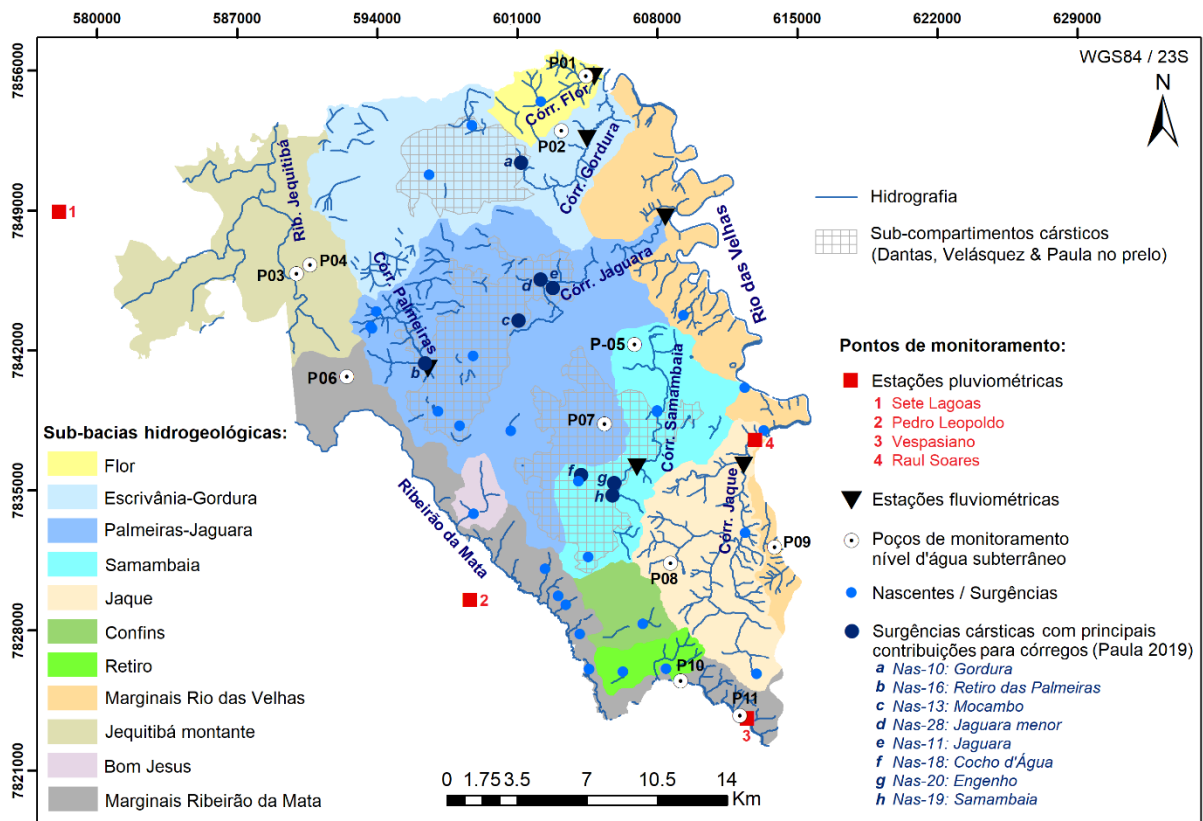


Figura 5 – Sub-bacias hidrogeológicas e pontos de monitoramento utilizados no modelo numérico.

¹ De acordo com a descrição litológica dos poços.

5 - MATERIAIS E MÉTODOS

A execução da modelagem hidrogeológica numérica apresentada neste trabalho se deu a partir de 5 etapas principais: (i) Construção do Modelo Geológico 3D e definição da malha numérica nos *softwares* Leapfrog Geo e Feflow; (ii) Definição de premissas para o desenvolvimento do Modelo Hidrogeológico Numérico no *software* Feflow; (iii) Aplicação das condições de contorno no Modelo Hidrogeológico Numérico; (iv) Calibração do Modelo Hidrogeológico Numérico e (v) Simulações de rotas de partículas.

5.1 MODELO GEOLÓGICO E MALHA NUMÉRICA INICIAL

Considerando que o foco do estudo é o aquífero cárstico, para modelagem geológica, foi adotada a simplificação das litologias da área em três unidades principais: Coberturas indiferenciadas, Formação Sete Lagoas e Embasamento Cristalino. Nessa classificação, as porções de sedimentos inconsolidados, os pelitos da Formação Serra de Santa Helena e os saprolitos de todas as unidades geológicas (principalmente da Formação Sete Lagoas) foram todos agrupados como “coberturas”, consistindo, basicamente, em todo material que recobre as rochas sãs da Formação Sete Lagoas ou do Embasamento Cristalino.

O *software* utilizado para construção do Modelo Geológico foi o LeapFrog Geo, onde é possível criar modelos geológicos 3D a partir do *input* de informações georreferenciadas e bancos de dados geológicos.

Assim, a partir da integração de informações de topografia (Figura 6-A) processadas através de Modelos Digitais de Elevação, *shapefiles* de mapas geológicos de superfície (RIBEIRO *et al.*, 2003/PROJETO VIDA-CPRM; Ribeiro *et al.* 2016 e Teixeira, Pena & Silva 2020) e da descrição litológica de 265 poços de bombeamento cadastrados na área (Figura 6-B), foi feita a modelagem geológica das três unidades principais da área de estudo (Figura 6-C).

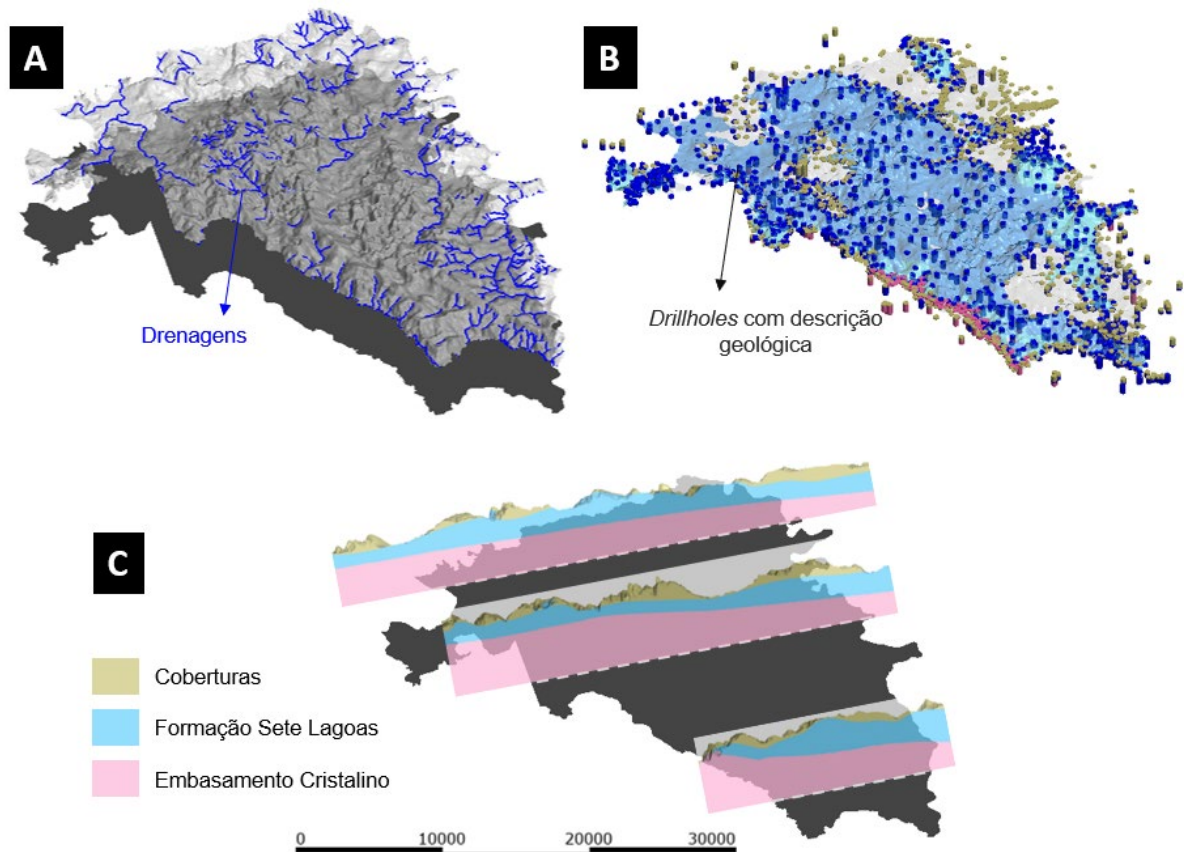


Figura 6 – (A) Topografia gerada através de MDE com drenagens indicadas em azul; (B) Sólido modelado da Formação Sete Lagoas (em azul) gerado a partir da descrição litológica de poços de bombeamento (importados como *drillholes*) e (C) Seções extraídas a partir do Modelo Geológico 3D.

Posteriormente, com o auxílio da extensão Hydro do *software* LeapFrog Geo, foi gerada uma malha triangular inicial a partir do Modelo Geológico, a qual foi, subsequentemente, exportada para o *software* de modelagem hidrogeológica Feflow. Nele foram realizados ajustes nos nós da malha inicial para garantir a qualidade da malha numérica e a representação dos pontos de monitoramento relevantes para calibração do modelo hidrogeológico.

Com o objetivo de melhor representar os aquíferos cárstico e cárstico-fissural, foi realizado um refinamento vertical da malha nas primeiras nove camadas (com um maior detalhamento nas primeiras três), e o refinamento horizontal nos três subcompartimentos (Figura 7A) definidos por DANTAS, VELÁSQUEZ & PAULA (2023). Além disso, foram feitos ajustes nas delimitações das áreas de ocorrência da Formação Sete Lagoas, incorporando as representações mais recentes de maciços carbonáticos aflorantes de Pacheco Neto *et al.* (no prelo) (Figura 7B).

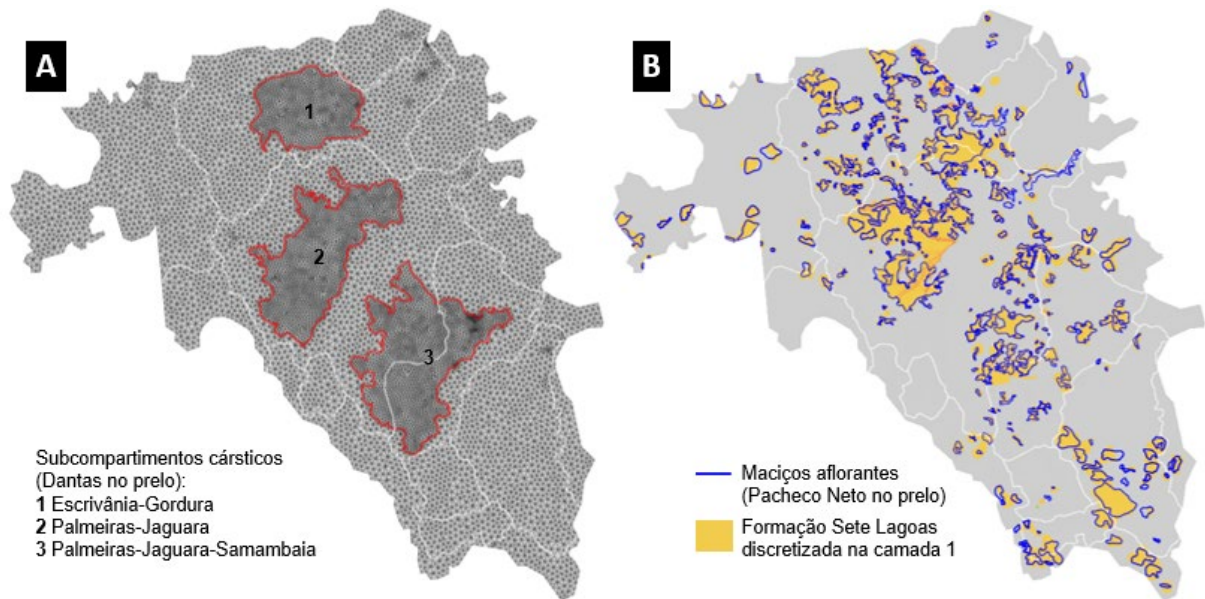


Figura 7 – (A) Refinamento da malha no Feflow dentro dos compartimentos cársticos de Dantas, Velásquez & Paula (2023) e (B) Representação dos maciços carbonáticos aflorantes no modelo numérico, com base na delimitação de Pacheco Neto *et al.* (no prelo).

5.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO

A modelagem do fluxo subterrâneo na área de estudo foi feita com o *software* FEFLOW (*Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System*), uma ferramenta computacional que permite a simulação de problemas de fluxo em ambiente 3D, em sistemas porosos e fraturados (DIERSCH 2014). O *software* utiliza o Método de Elementos Finitos (MEF) para resolver equações que governam o fluxo subterrâneo em meios porosos e fraturados.

Em modelos hidrogeológicos numéricos regionais costuma ser adotada a consideração de que o sistema fraturado se comporta como um meio equivalente poroso. Por outro lado, em modelos cársticos, é comum a aplicação da Lei de Manning-Strickler quando ocorrem canais abertos de fluxo ou no caso de fluxos em condutos parcialmente cheios (NINANYA 2018). Assim, considerando o sucesso em alguns modelos que levaram em consideração a porosidade dupla de matriz e condutos (TAYLOR & GREENE 2008) e a representação simplificada de condutos com aplicação de elementos discretos (AUTERIVES, BINET & ALBÉRIC 2014), na modelagem em questão, foi utilizada a abordagem do Meio Poroso Equivalente (MPE) regida pela Lei de fluxo laminar de Darcy, para a representação da porosidade secundária (maciço rochoso fraturado), combinada com a Lei de Manning-Strickler em

elementos discretos (*discrete features*) para representação da porosidade terciária (condutos cársticos).

A Modelagem Hidrogeológica Numérica de fluxo subterrâneo foi feita em regime permanente representando a data de outubro/2018, período a partir do qual foi iniciado o monitoramento de nível d'água em poços de bombeamento locais.

A configuração do modelo final, em relação a discretização da malha numérica, corresponde a 270.214 elementos prismáticos de base triangular e diâmetro variável entre 35 e 578 m, 148.785 nós e 14 camadas distribuídas verticalmente em 3 unidades hidroestratigráficas. Considerando que, a partir dos 60 m de profundidade, o embasamento cristalino tem um comportamento de aquífugo, as últimas 2 camadas do modelo foram inativadas (Figura 8).

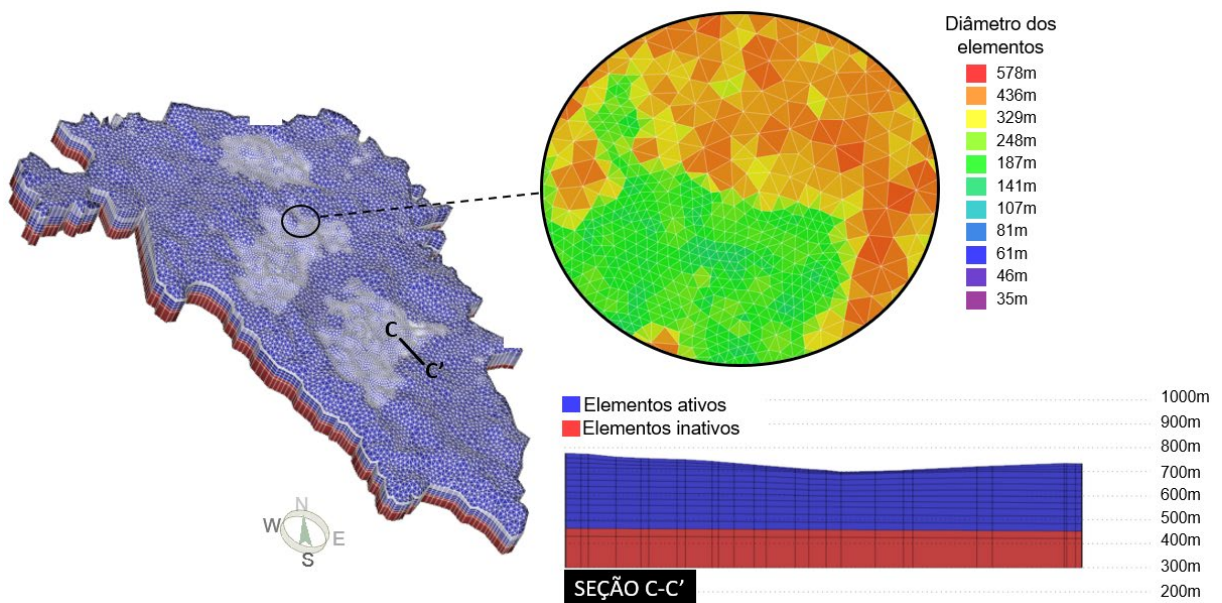


Figura 8 – Detalhamento da malha triangular do modelo numérico.

5.3 APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO NA ÁREA MODELADA

Para a definição de condições de contorno em modelos hidrogeológicos numéricos, é importante o entendimento do comportamento do fluxo superficial e subterrâneo local e das entradas e saídas de água no sistema aquífero (Figura 9).

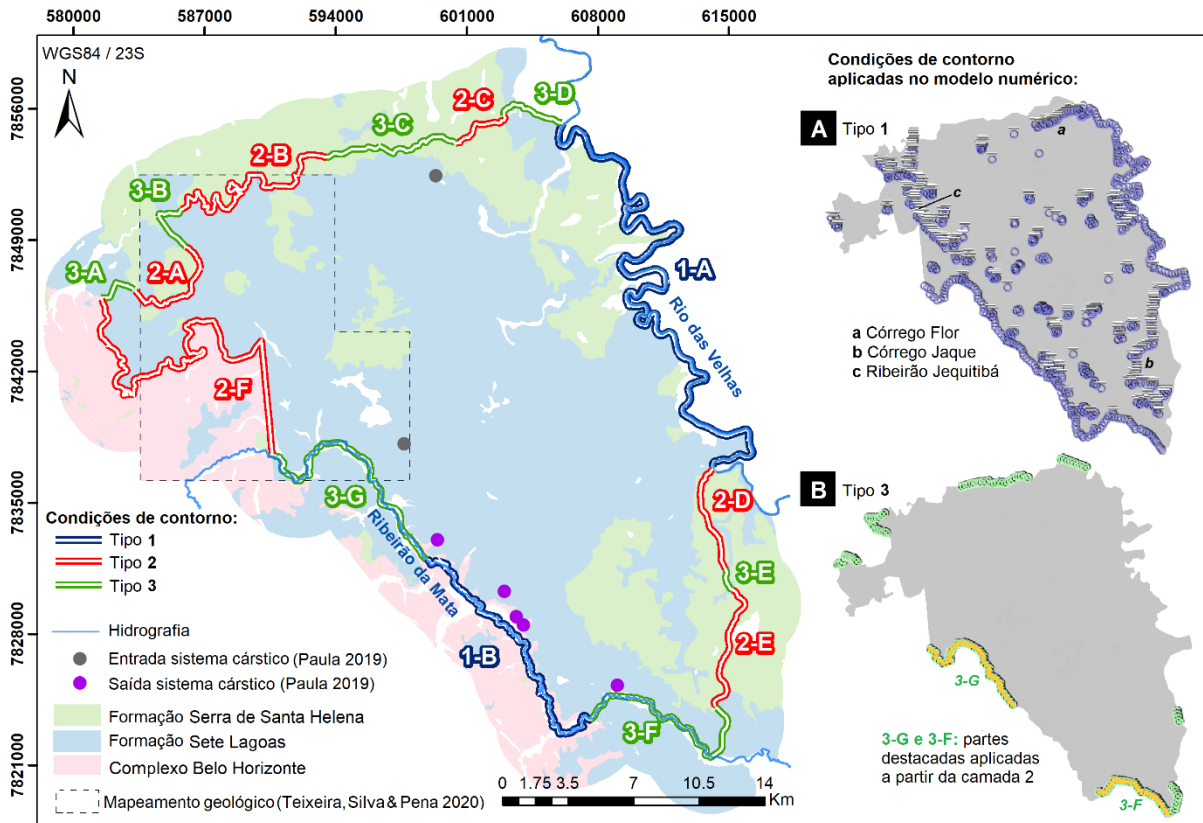


Figura 9 – Condições de contorno definidas no Modelo Hidrogeológico Conceitual e aplicadas no Modelo Numérico: (A) Condições contorno do tipo 1 aplicadas na camada 1 e (B) Condições de contorno do tipo 3 aplicadas nas camadas 2 a 10.

A condição do tipo 1 (Dirichlet), que constitui uma situação de carga hidráulica especificada, foi aplicada no Rio das Velhas (à leste – 1A) por ser o nível de base regional do sistema cárstico e no Ribeirão da Mata (à sudoeste – 1-B) pelo fato de ser um rio de vazão considerável e que, em boa parte de seu percurso, encontra-se na zona de contato entre a Formação Sete Lagoas e o embasamento cristalino. A condição do Tipo 1 foi utilizada também dentro do modelo (Figura 9A) para representação dos córregos que drenam em terrenos não cársticos, das surgências cársticas principais (que representam as vazões dos córregos no domínio cárstico), das demais nascentes monitoradas e de lagoas perenes (PACHECO NETO *et al.* no prelo).

Por sua vez, a condição do tipo 2 (Neumann) de fluxo especificado, usada no modelo em locais onde admite-se que há fluxo nulo, foi aplicada nos contatos com o embasamento cristalino (a noroeste – 2F) e com os pelitos da Formação Serra de Santa Helena (à norte – 2C e 2B, noroeste -2A e sudeste – 2D e 2E) uma vez que essas unidades tendem a se comportar como aquifugos ou aquitardos em relação ao

aquífero dos carbonatos da Formação Sete Lagoas. Além disso, especificamente para os pelitos na porção norte da área (2-C), sabe-se que o fluxo (superficial e subterrâneo) direciona-se majoritariamente para leste, em direção ao Rio das Velhas.

Já a condição do tipo 3 (Cauchy), que corresponde a situações de fluxo dependente da carga hidráulica, foi utilizada em zonas de continuidade lateral da Formação Sete Lagoas para fora da área de estudo onde admite-se que a existência de fluxo subterrâneo (entrada ou saída) entre a área estudada e a porção externa. As cargas hidráulicas foram atribuídas com base no mapa potenciométrico local de Paula (2019).

Entende-se que há entrada de água pela região da cidade de Sete Lagoas (a noroeste - 3A e 3B) pela continuidade lateral dos carbonatos, confirmada por Teixeira, Pena & Silva (2020) e resultados de direções de fluxos subterrâneo de outros trabalhos como o de Galvão (2015) e Pereira (2022).

À oeste da área (3G), em um trecho ao longo do Ribeirão da Mata, tem-se uma extensão carbonática onde há evidências de entrada de água externa para o sistema cárstico até a nascente Bom Jardim (PAULA 2019). Entende-se que o ribeirão direciona o fluxo de água mais próximo a superfície, mas que, em profundidade, pode haver troca de água entre as poções carbonáticas. Assim, no trecho destacado da Figura 9B, foi aplicada a condição tipo 1 na camada 1 e a condição tipo 3, entre as camadas 2 e 9 onde tem-se a Formação Sete Lagoas.

Por outro lado, tem-se a sul (3F) uma área de continuidade dos carbonatos que corresponde a uma saída de água subterrânea do sistema, conforme sugerido por Paula (2019). Nesta área encontra-se, também, o Ribeirão da Mata em uma condição de maior vazão e cujo sentido para sudeste reforça que a direção principal do fluxo subterrâneo segue o mesmo padrão. Analogamente a condição anterior, o Ribeirão da Mata foi representado como tipo 1 na primeira camada e a condição tipo 3 aplicada a partir da segunda camada.

Destaca-se, ainda, a condição de Cauchy delimitada à norte (3C), na zona de contato litológico entre a Formação Sete Lagoas e a Formação Serra de Santa Helena.

Ainda que os pelitos funcionem como condição de contorno em outras áreas e que o direcionamento de fluxo nessa região seja preferencialmente para leste (em direção ao Rio das Velhas), a atribuição de condição do tipo 3 baseou-se na possível entrada de água externa para o sistema cárstico através da nascente do Leonardo, na bacia do Escrivânia-Gordura (Paula 2019).

Por fim, nas porções a leste (3E) e norte-nordeste (3D) há a continuidade lateral do carbonato em meio aos pelitos da Formação Serra de Santa Helena, onde possivelmente há saída de água em direção ao Rio das Velhas, que constitui o nível de base local.

Em profundidade foi definida a base do modelo inativando-se as últimas duas camadas de forma a representar a porção do embasamento que funciona como aquífugo.

5.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO

Na etapa de calibração, as vazões de descarga e cargas hidráulicas calculadas pelo modelo são comparadas com as vazões e cargas reais monitoradas em campo, com o objetivo de minimizar os resíduos do modelo (ANDERSON, WOESSNER & HUNT 2015). O objetivo é que se tenha uma boa aderência entre as cargas observadas e calculadas com erro menor que 10%, o que é aferido através do cálculo dos coeficientes de Nash-Sutcliffe e de determinação (R^2) (MIDDLEMIS, MERRICK & ROSS 2000). Durante a calibração, os valores de condutividade hidráulica (K_x , K_y e K_z), inicialmente adotados por referências bibliográficas e as taxas de recarga por bacia foram calibradas por meio de retroanálises (ou pelo método de “tentativa e erro” de ANDERSON, & WOESSNER 1992) e com o auxílio do FePast. Além disso, foram inseridos *discrete features* para a representação de condutos cársticos e calibração das nascentes cársticas, que correspondem às saídas naturais para as descargas de água das redes de condutos (TAYLOR & GREENE 2008).

A recarga foi aplicada na primeira camada do modelo hidrogeológico. Com dados de Pacheco Neto *et al.* (no prelo), foi feita a distinção entre as áreas de maciços calcários aflorantes e dolinas, dentro de cada uma das bacias hidrogeológicas, e a área “restante” foi considerada como cobertura. A partir dessa classificação, e com

base em estudos em andamento, foi feita a diferenciação das zonas de recarga, com a premissa de que os maciços contribuem com 60% da recarga efetiva, as dolinas com 35% e os solos com 5% (Figura 10).

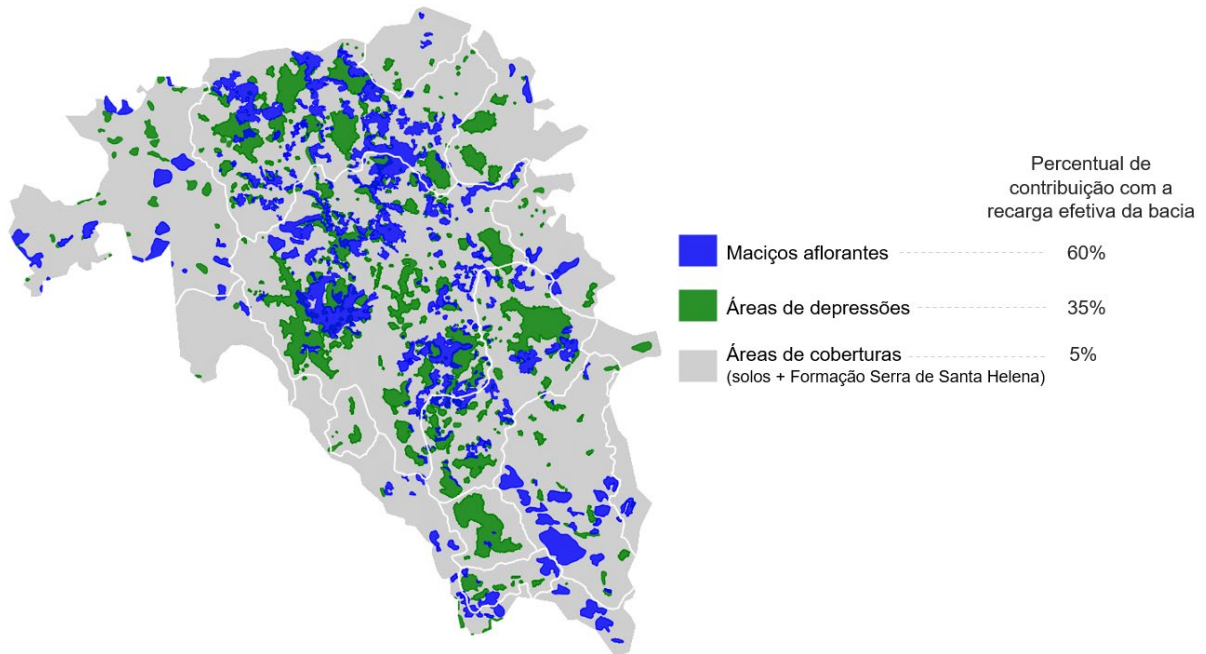


Figura 10 – Distinção das zonas de recarga do modelo a partir da delimitação das áreas de maciços, dolinas e coberturas, em cada uma das bacias hidrográficas.

A incorporação de feições discretas em um modelo poroso equivalente pode ser de grande relevância para fazer com que o modelo fique mais realístico, sendo capaz de representar o fluxo através condutos naturais ou artificiais (Ninanya *et al.* 2018). Assim, os condutos existentes na Formação Sete Lagoas, que constituem importantes meios condutores de água no aquífero cárstico, foram representados no modelo como *discrete features* 1D, regidos pela Lei de Manning-Strickler.

Com base nos pontos de entrada e saída de água obtidos nos ensaios de traçadores corantes realizados por Auler (1994), Teodoro *et al.* (2019) e Teodoro (2020) e, ainda tomando como referência a orientação das direções de lineamentos de Ribeiro *et al.* (2016) e Teodoro (2020) (Figura 11A), foram discretizados 31 condutos no modelo numérico (Figura 11B) entre as camadas 1 e 5.

Inicialmente, foram representados apenas os condutos referentes às rotas de traçadores comprovadas e, em um segundo momento, tomando como base a

premissa de que os condutos tendem a ser desenvolvidos ao longo de descontinuidades, novos condutos foram inseridos, seguindo a direção de lineamentos. A calibração das vazões das nascentes, por meio dos condutos, foi feita a partir de retroanálises, com ajustes nas propriedades de área e rugosidade.

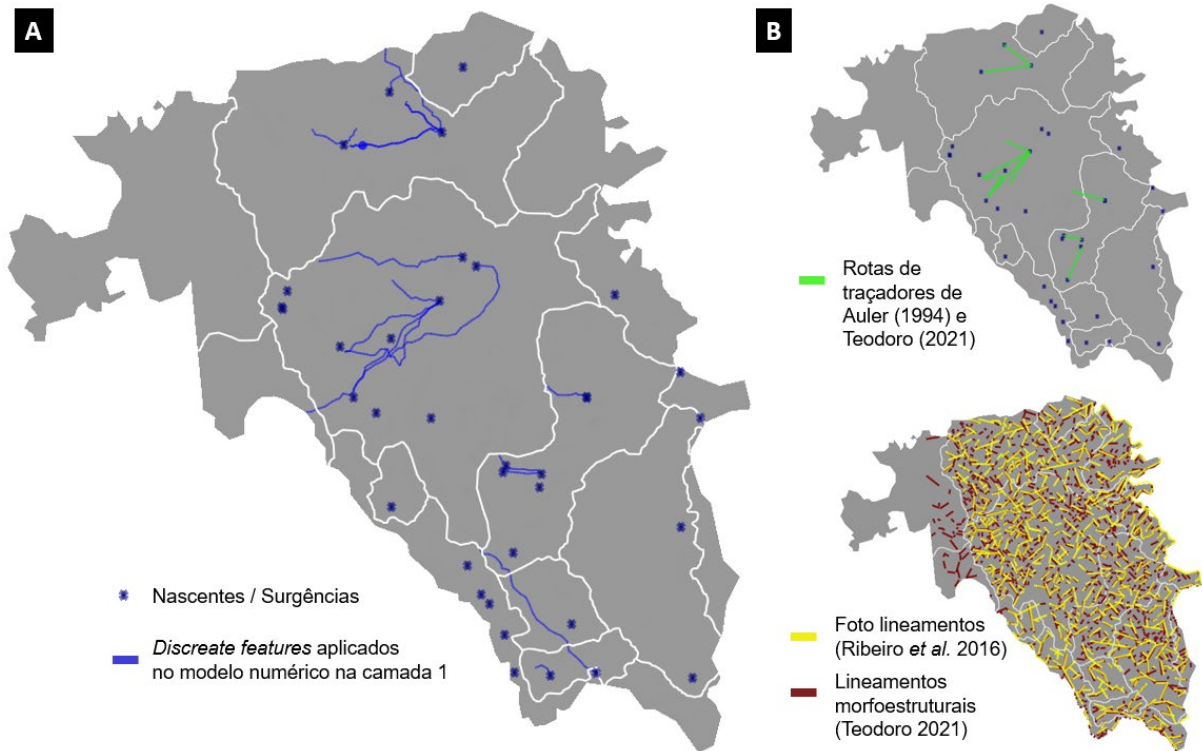


Figura 11 – (A) *Discrete features* inseridas no modelo numérico a partir (B) dos resultados dos ensaios com traçadores de Auler (1994), Teodoro *et al.* (2019) e Teodoro (2020) e norteados pelos lineamentos interpretados de Ribeiro *et al.* (2016) e Teodoro (2020).

Durante todo o processo de calibração os valores de condutividade hidráulica (K_x , K_y e K_z) das unidades geológicas foram ajustados por meio de retroanálises. Inicialmente, havia distinção apenas entre as três unidades principais (coberturas, Formação Sete Lagoas e embasamento cristalino) e, ao longo da calibração, foram feitas diferenciações de condutividade hidráulica para as coberturas ao longo das drenagens, para as 3 primeiras e a quarta camada do aquífero cárstico e entre os condutos discretizados (Figura 12).

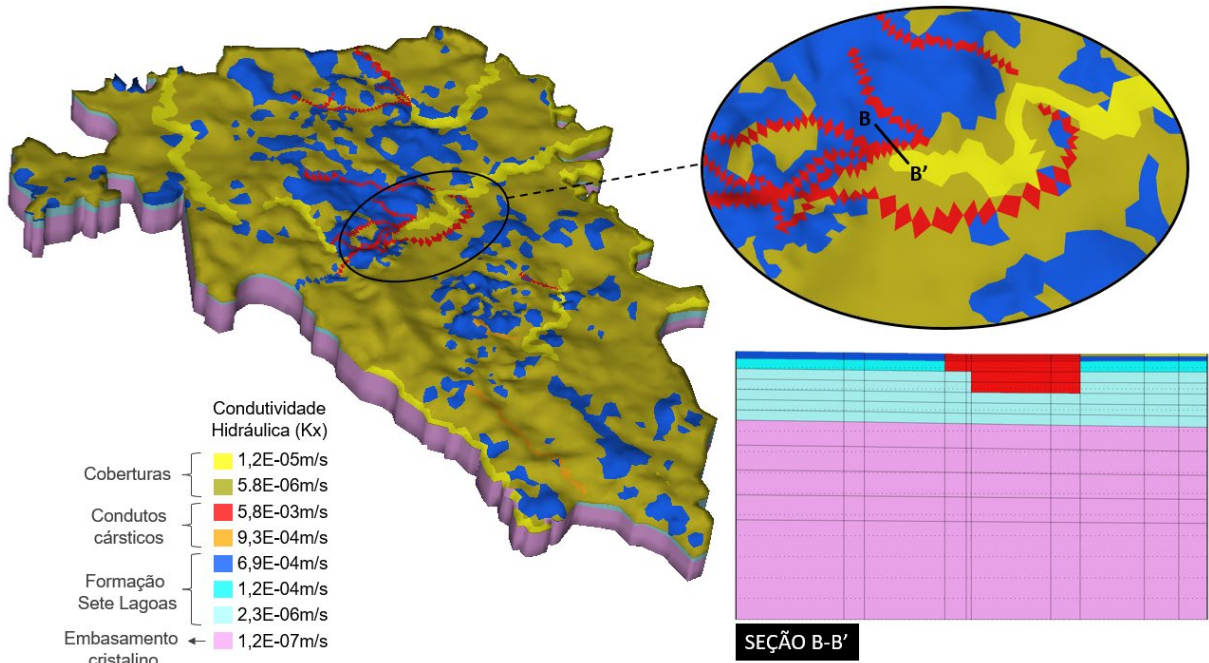


Figura 12 – Valores de condutividade hidráulica (Kx) aplicados no modelo numérico e detalhes mostrando a diferenciação de condutividade ao longo dos condutos (*discrete features*) e a aplicação da condutividade verticalmente (seção B-B').

5.5 SIMULAÇÕES DAS ROTAS DE PARTÍCULAS

Após a calibração do modelo foram realizadas simulações de partículas com as ferramentas de *streamlines* “Forward” e “Backward”, com o intuito de verificar a resposta do modelo em relação ao fluxo subterrâneo por meio dos condutos discretizados. Assim, na primeira simulação foram verificadas as rotas das partículas até as nascentes e, na segunda simulação, foram analisadas as rotas a partir das entradas e saídas de água do modelo.

6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DE FLUXO SUBTERRÂNEO

6.1.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Os valores de condutividade hidráulica obtidos estão de acordo com a amplitude de valores de referência de estudos anteriores compilados por Ribeiro (2020) e estudos de Souza (2020) (Figura 13). Na calibração, para simplificação do

sistema, foram adotados valores iguais para K_x e K_y e aplicada anisotropia apenas em relação a K_z como sendo 10 vezes menor.

Especificamente no domínio do aquífero cárstico, representado nas primeiras 4 camadas do modelo, foram aplicados valores de condutividade entre $6,9E-04$ m/s ($K_x=K_y$) e $6,9E-05$ m/s (K_z) nas primeiras 3 camadas e um valor seis vezes menor na camada 4 entre $1,2E-04$ m/s ($K_x=K_y$) e $1,2E-05$ m/s (K_z). A partir da camada 5, o aquífero cárstico-fissural apresenta condutividades menores, entre $2,3E-06$ m/s ($K_x=K_y$) e $2,3E-07$ m/s (K_z). Para os condutos discretizados dentro dos aquíferos cárstico e cárstico-fissural, tem-se condutividades entre $1,2E-04$ m/s e $5,8E-03$ m/s e, em geral, adotou-se $K_x=K_y=K_z$ para simplificação (Figura 13).

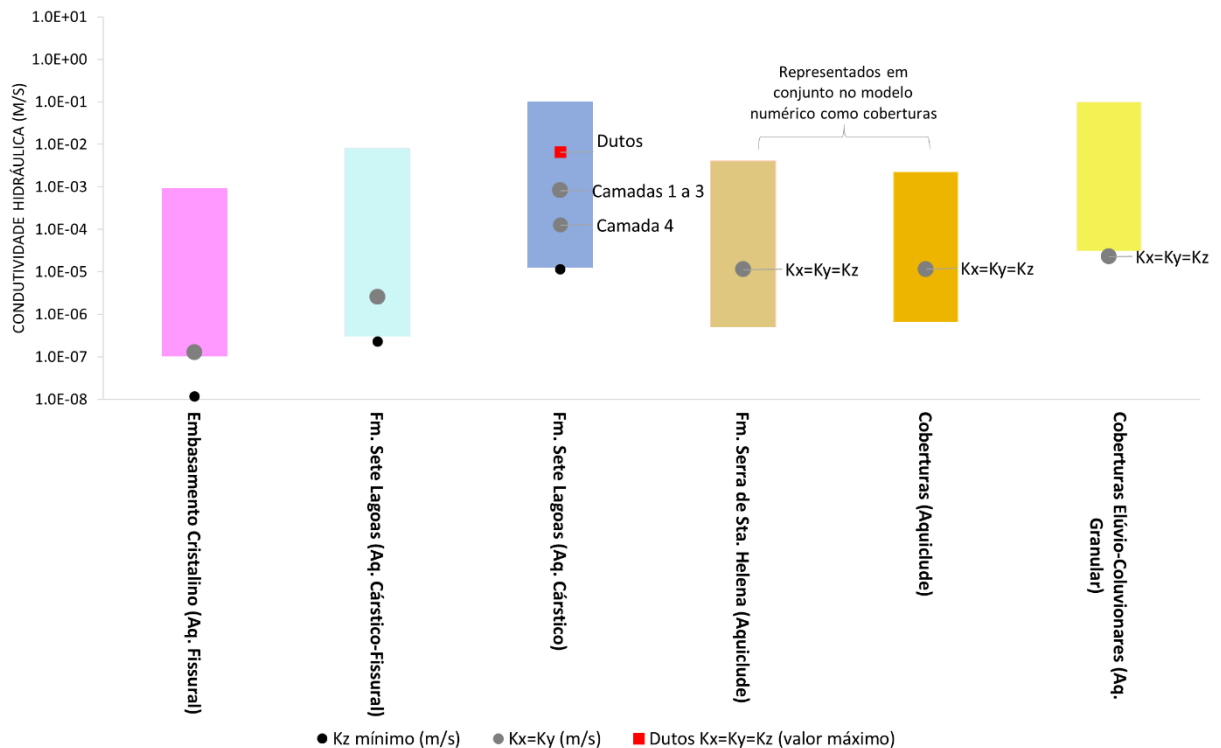


Figura 13 – Valores de condutividade hidráulica obtidos após a calibração no modelo numérico em comparação com valores obtidos em trabalhos anteriores na região de estudo (Pessoa 1996; Silva 2003; Pessoa 2005; Batista 2009; Machado 2011; Castro *et al.* 2011; Galvão *et al.* 2016 e Paula 2019 *in* Ribeiro 2020) e adicionadas referências de Souza (2020).

6.1.2 RECARGA

Valores específicos de recarga foram aplicados nas áreas de maciços carbonáticos, depressões e coberturas em cada uma das bacias hidrogeológicas, nas

quais houve variação de recarga efetiva entre 1 e 19% do volume médio de precipitação adotado de 1.265 mm/ano (Figura 14).

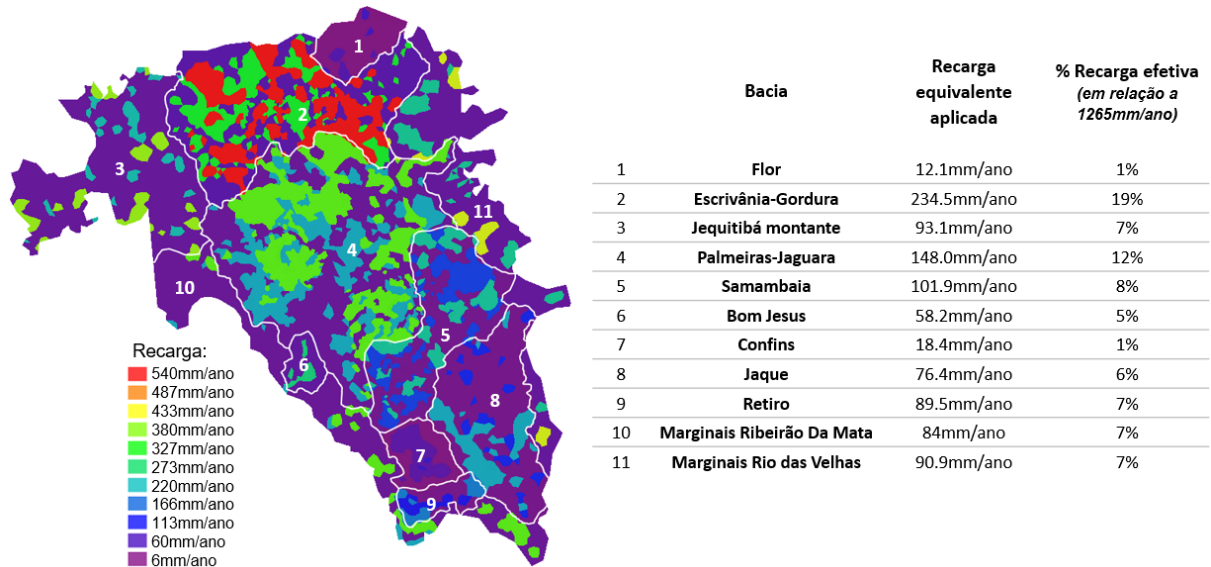


Figura 14 – Valores de recarga aplicados em cada bacia, diferenciados pelas áreas de maciços, dolinas e coberturas.

6.1.3 NÍVEIS D'ÁGUA SUBTERRÂNEOS E VAZÕES DE NASCENTES

Os resultados da calibração de níveis d'água de poços tubulares são mostrados na Figura 15, onde é possível notar uma boa correlação entre os níveis monitorados em campo e os calculados pelo modelo. O erro médio quadrático obtido (RMSE – *Root Mean Squared Error*) foi de 18,4 m, o erro médio absoluto (MAE – *Mean Absolut Error*) ficou em 14,8 m e o coeficiente de Correlação (R^2) em 81%. Quando normalizado em relação ao máximo gradiente hidráulico observado nos poços monitorados da área (164,1m), o NRMSE fica igual a 11%, o que representa uma boa aderência em relação a escala do modelo.

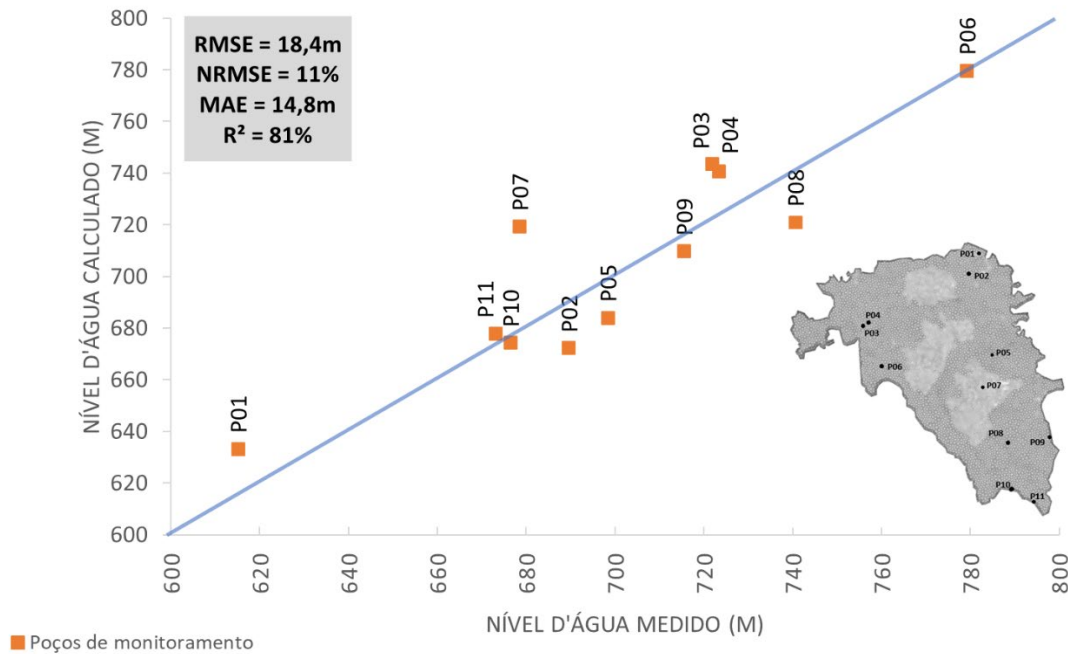


Figura 15 – Resultados da calibração dos níveis d'água subterrâneos dos poços de monitoramento no modelo numérico.

A calibração das vazões das nascentes foi o principal foco deste trabalho, uma vez que as surgências cársticas de alta vazão são o meio de descarga direto do aquífero cárstico e constituem as vazões das principais drenagens locais.

Nas bacias cársticas Escrivânia-Gordura (Figura 16), Palmeiras-Jaguara (Figura 17) e Samambaia (Figura 18) as calibrações apresentaram aderências de 89%, 90% e 96% em relação às vazões monitoradas, respectivamente.

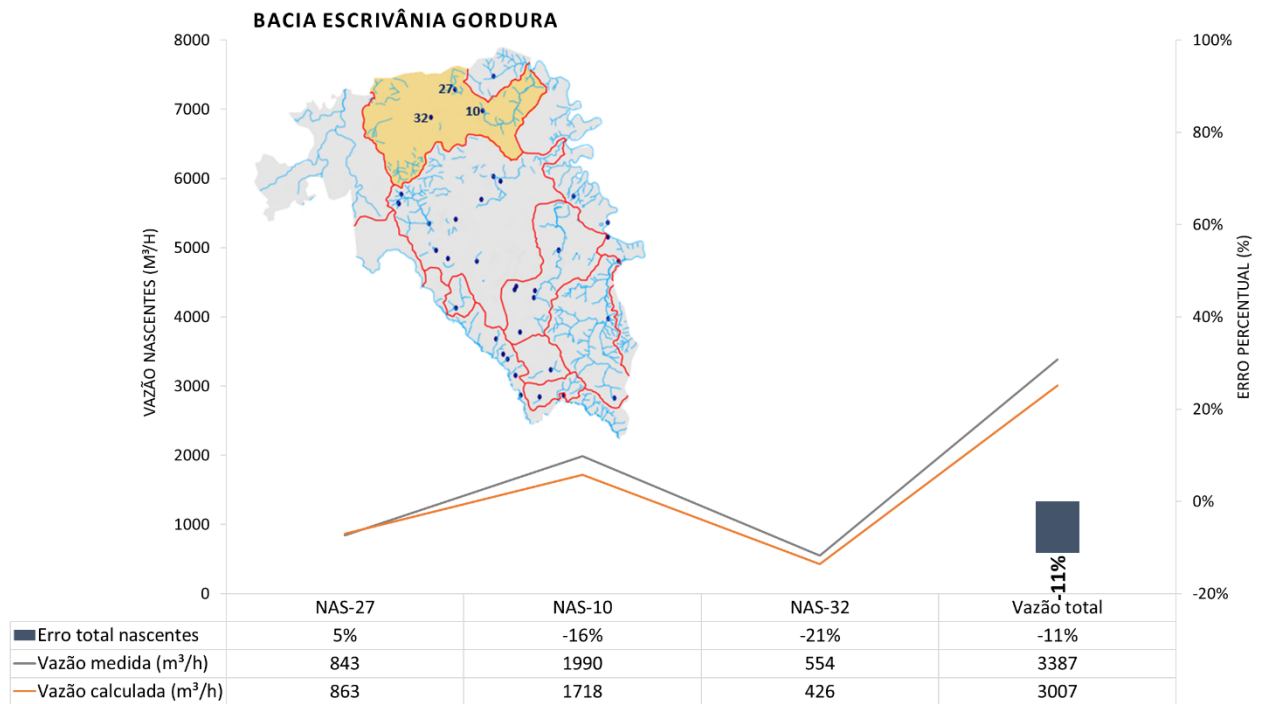


Figura 16 – Calibração das vazões das nascentes na bacia Escrivânia-Gordura.

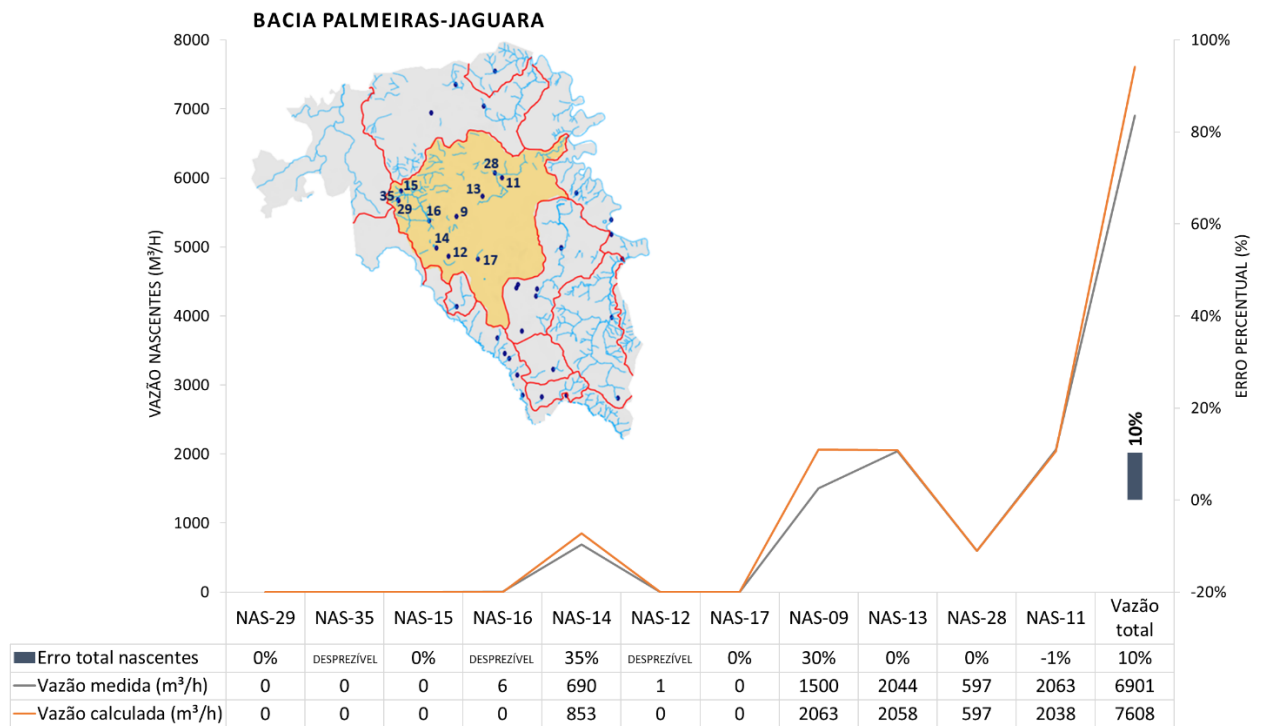


Figura 17 – Calibração das vazões das nascentes na bacia Palmeiras-Jaguara.

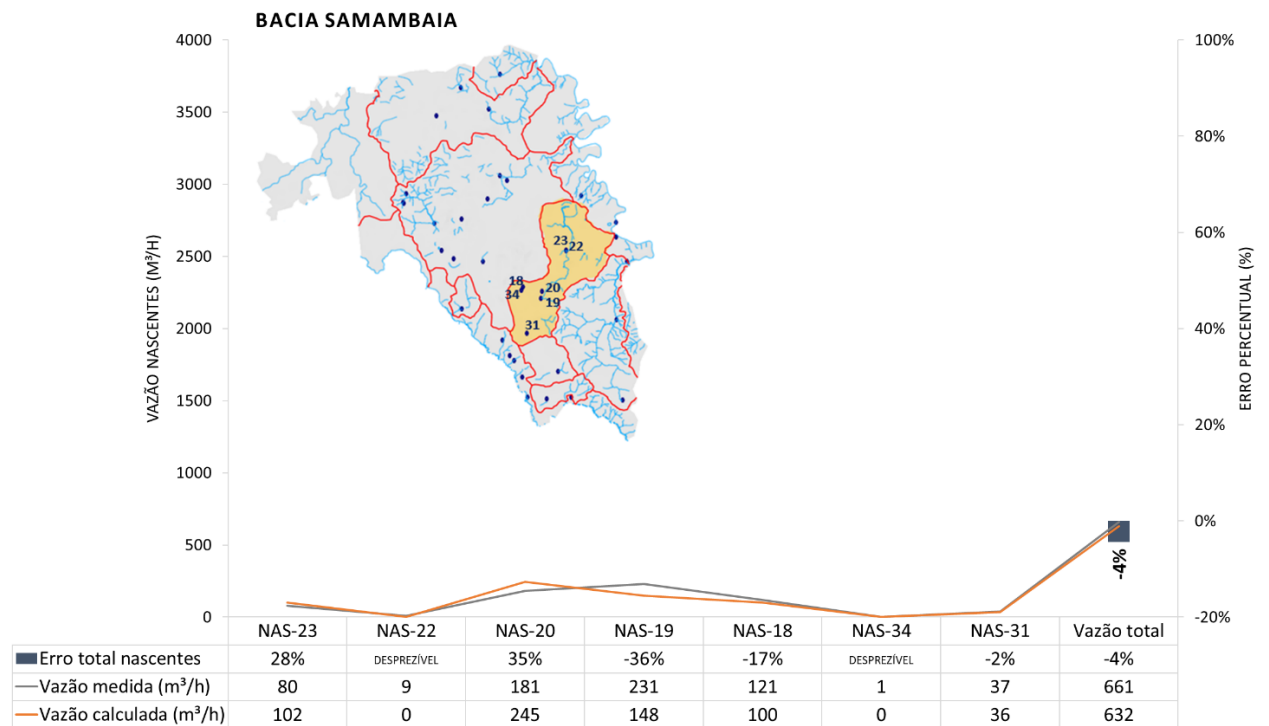


Figura 18 – Calibração das vazões das nascentes na bacia Samambaia.

As bacias a oeste do modelo (Bom Jesus, Marginais Ribeirão da Mata, Confins e Retiro – Figura 19) apresentaram uma aderência de 99% em relação as vazões calibradas das nascentes, enquanto as vazões modeladas para as nascentes das bacias à leste (Flor, Marginais Rio das Velhas e Jaque - Figura 20) apresentaram uma correlação de 77%.

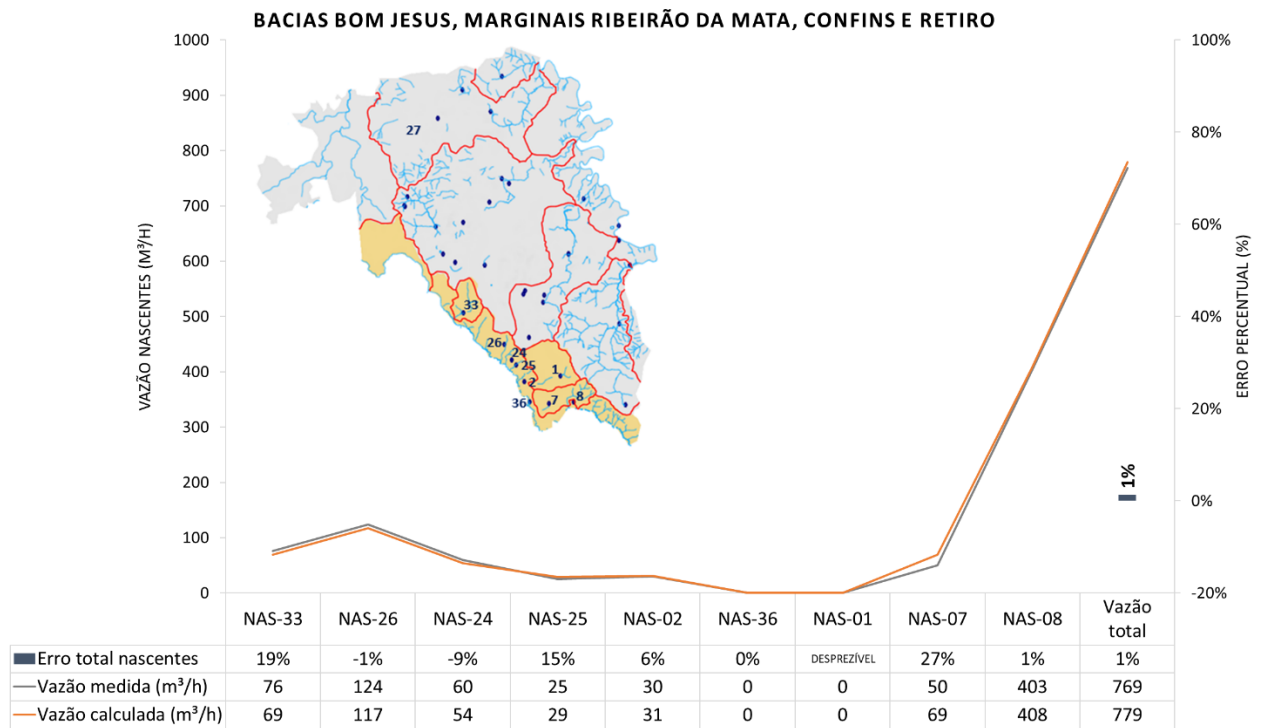


Figura 19 – Calibração das vazões das nascentes das bacias à oeste.

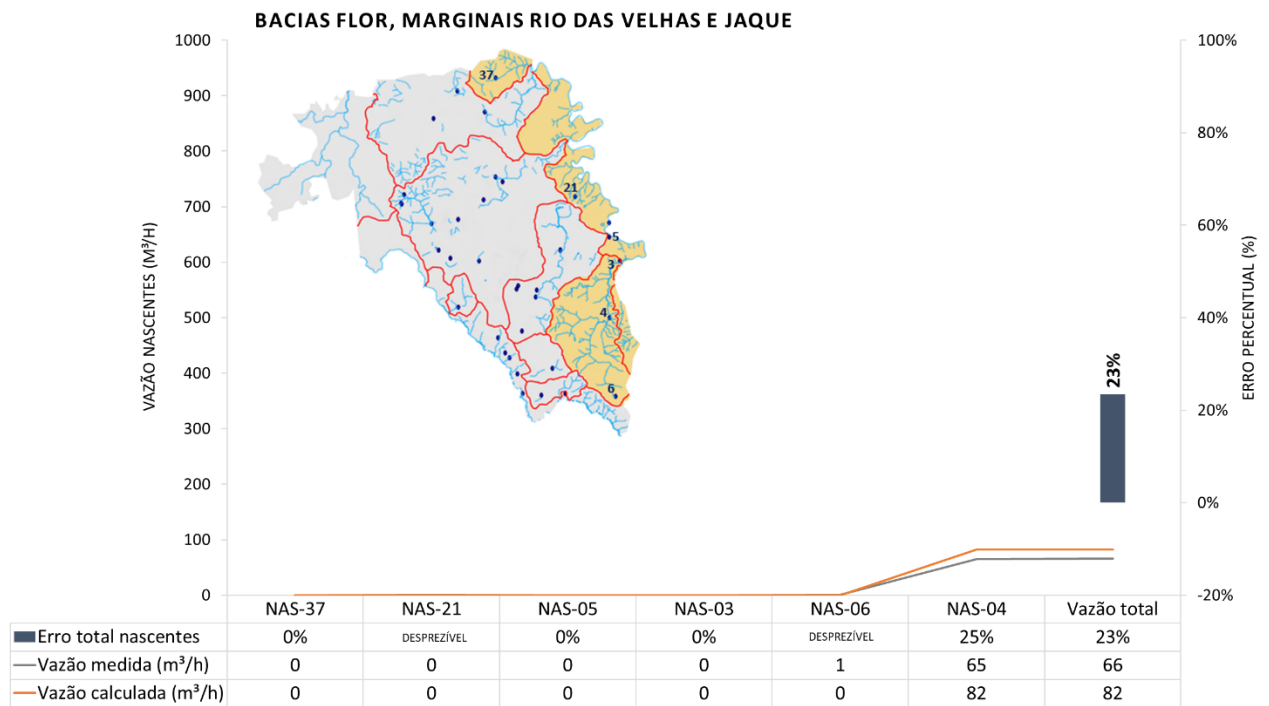


Figura 20 – Calibração das vazões das nascentes das bacias à leste.

Ressalta-se que os maiores erros atribuídos às bacias à leste estão relacionados à menor magnitude das vazões dessas nascentes, as quais são mais difíceis de ajustar em um modelo de escala regional. Nesse sentido, também houve dificuldade na calibração das vazões dos córregos Flor e Jaque. No primeiro caso, a vazão calculada pelo modelo ($40,1 \text{ m}^3/\text{h}$) foi superior as médias mensais observadas em setembro/2017 ($6,7 \text{ m}^3/\text{h}$) e outubro/2018 ($21,2 \text{ m}^3/\text{h}$) e, para o córrego Jaque, obteve-se um valor intermediário ($440,5 \text{ m}^3/\text{h}$) entre as duas médias mensais consideradas ($109,6 \text{ m}^3/\text{h}$ e $900,4 \text{ m}^3/\text{h}$) (Figura 21).

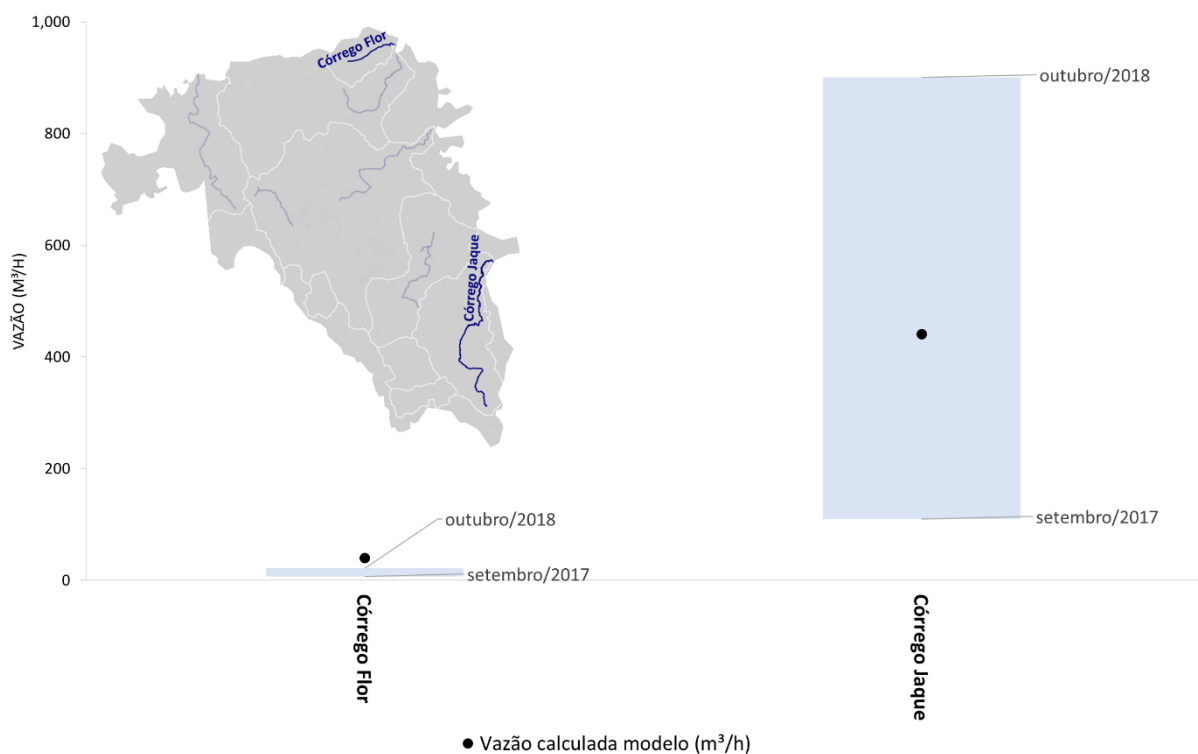


Figura 21 – Calibração das vazões dos córregos Flor e Jaque.

Os erros nos cálculos das descargas das nascentes e drenagens de menor vazão (não cársticas ou mistas) é explicado pela premissa adotada na modelagem numérica para calibração do sistema cárstico que é caracterizado por elevadas vazões. Uma vez que o foco foi a calibração de vazões cársticas e a representação de rotas dos condutos, as grandes vazões e velocidades aparentes obtidas por esse sistema faz com que o modelo adotado como poroso equivalente produza vazões elevadas como um todo, buscando uma permeabilidade de condutos ou vazões nulas quando se aproxima de sistema de matriz. Desta forma, no processo de modelagem matemática, o equacionamento tende ao infinito ou a zero.

Nos gráficos apresentados, as nascentes com vazões inferiores a 10 m³/h que ficaram secas no modelo, tiveram seus erros percentuais considerados como desprezíveis.

O balanço de massa geral, que mostra as discrepâncias entre as diferenças de entradas e saídas de água calculadas pelo modelo, ficou em 1%, atendendo aos padrões de desempenho numérico que devem ser inferiores ou próximos a 2% (MIDDLEMIS, MERRICK & ROSS 2000).

6.1.4 REGIME DE FLUXO SUBTERRÂNEO

As cargas hidráulicas calculadas na área modelada variaram de 613m a 824m e, conforme esperado, a direção preferencial de fluxo subterrâneo no modelo numérico é de oeste para leste, em direção ao Rio das Velhas, fluxo de base regional (Figura 22). Destacam-se, localmente, os fluxos nas áreas de entradas de água de fora do sistema cárstico à noroeste e oeste e a saída de água a sul.

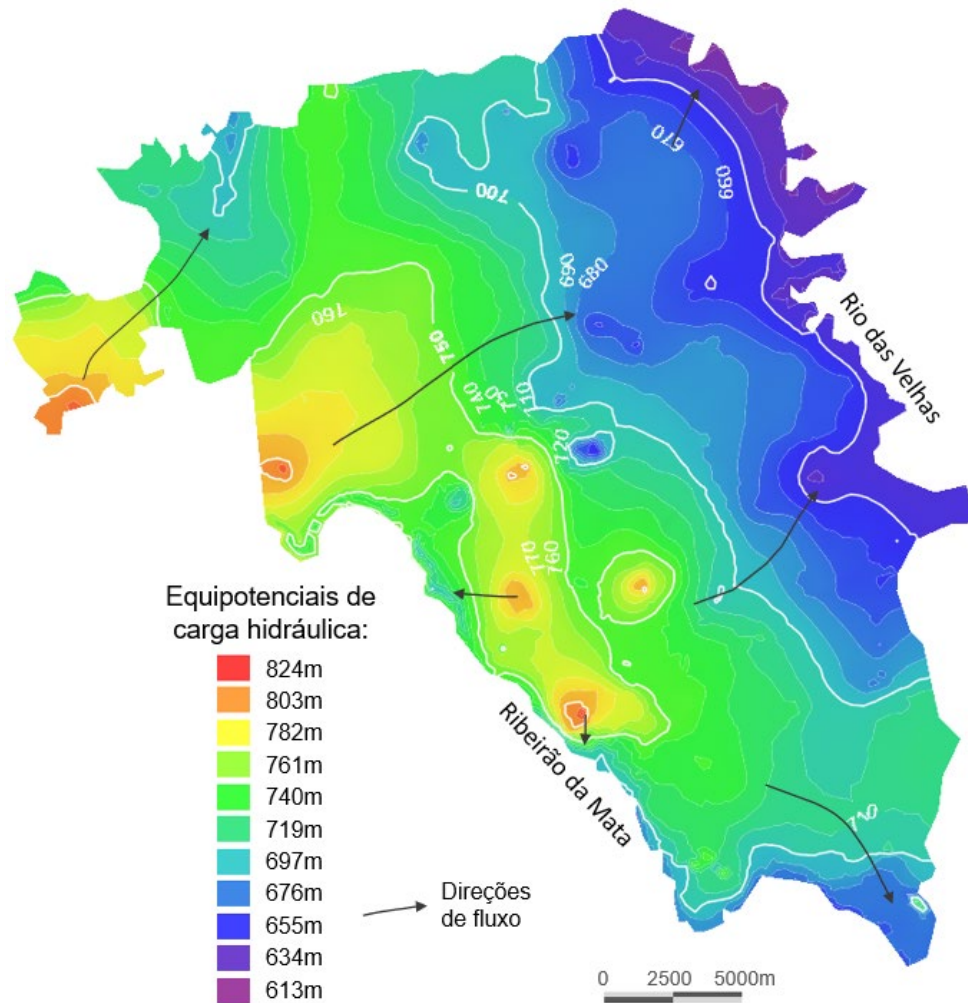


Figura 22 – Superfícies equipotenciais do modelo numérico (camada 1).

6.2 SIMULAÇÃO DOS ENSAIOS DE TRAÇADORES POR MEIO DA SIMULAÇÃO DE PARTÍCULAS

A inserção de *discrete features* no modelo numérico representou, de maneira satisfatória, a ligação entre pontos de entrada e saída de água dos resultados de ensaios com traçadores de Auler (1994), Teodoro *et al.* (2019) e Teodoro (2020). No entanto, além dos condutos inseridos nas rotas de fluxo conhecidas, durante o processo de retroanálise e calibração das vazões das surgências cársticas, foram inseridos possíveis condutos (Figura 23), sendo interessante notar que a maior parte deles ficou dentro dos limites dos três compartimentos horizontais cársticos sugeridos por Dantas, Velásquez & Paula (2023).

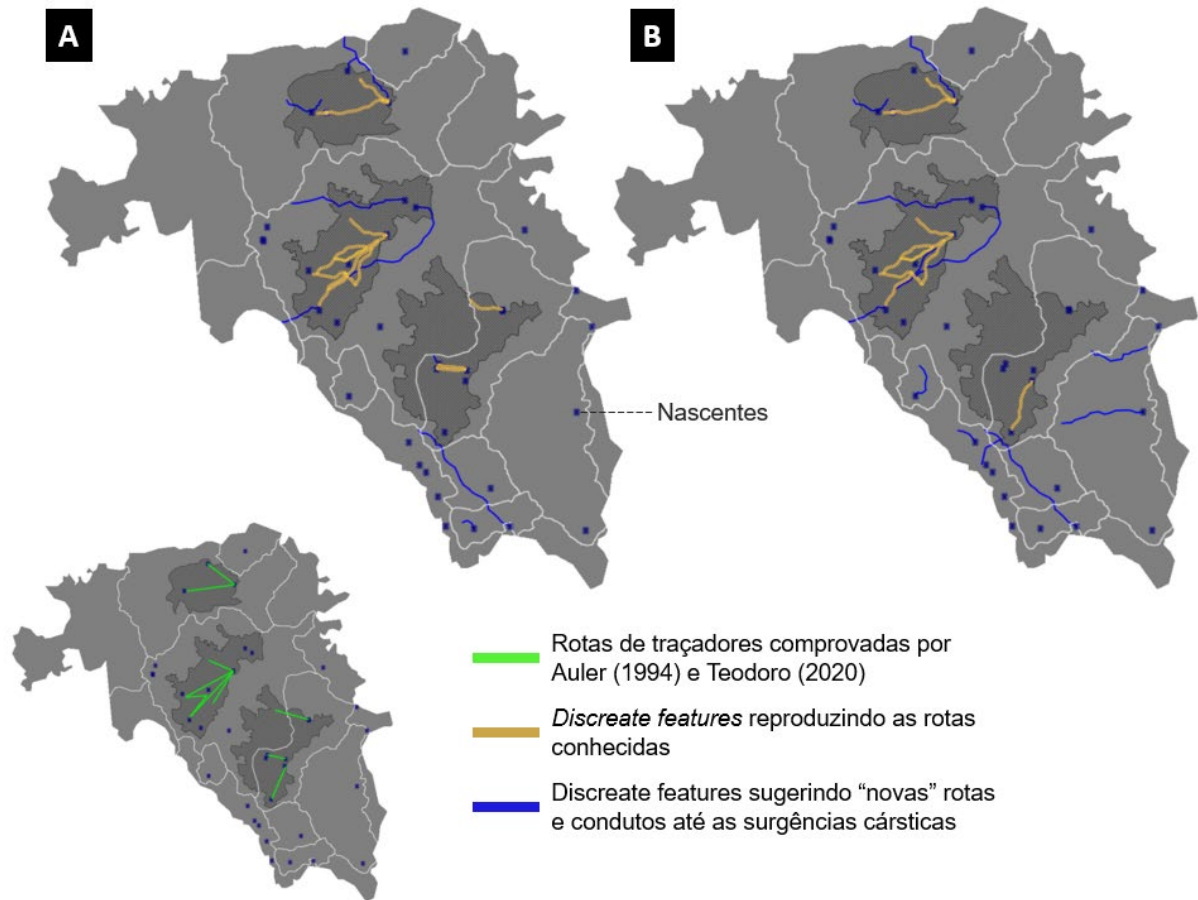


Figura 23 – Condutos modelados através da ferramenta *discrete features*: (A) Camada 1; (B) Camada 2.

Com a discretização dos condutos na Bacia Escrivânia-Gordura (Figura 24) e retroanálises na calibração foi possível representar, de maneira satisfatória, as contribuições comprovadas (Teodoro 2020) do Sumidouro Goiabeiras e Sumidouro Bebidas para a vazão da surgência Gordura (Nas-10). No entanto, conforme destacado pela autora, os resultados dos ensaios de traçadores mostraram que esses dois sumidouros perfazem 68% da vazão observada na surgência Gordura, sendo os demais 32% de origem ainda desconhecida. Nesse sentido, foi representado no modelo um conduto NW-SE com origem na entrada de água externa para o sistema, o qual foi essencial para devida calibração das vazões observadas na surgências cársticas Gordura (Nas-10) e Leonardo (Nas-27). Os resultados obtidos por meio da simulação de partículas, com origem na condição de contorno à norte, mostram a entrada de água no sistema em direção às nascentes supracitadas, estando de acordo com a hipótese de fluxo externo de norte para sul nessa região, aventada nos trabalhos de hidroquímica de Vieira (2018) e isótopos de Ribeiro (2020).

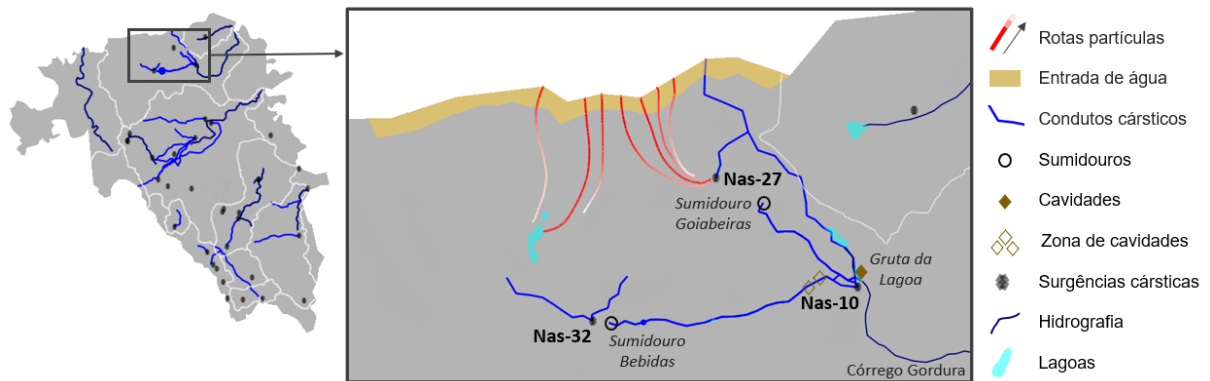


Figura 24 – Condutos modelados na Bacia Escrivânia-Gordura e resultados da simulação de partículas em direção às nascentes (camada 2).

A Bacia Palmeiras-Jaguara é a que apresenta maior complexidade em seu fluxo subterrâneo influenciado pela existência de surgências cársticas de elevadas vazões e feições como sumidouros e ressurgências que são de difícil representação na modelagem numérica. Trata-se da bacia com o maior número de *discrete features* aplicados (Figura 25) e os resultados simularam, satisfatoriamente, o fluxo do Córrego Palmeiras em direção ao Sumidouro Palmeiras e a contribuição de fluxo entre a região da Gruta Morro Redondo e a surgência cárstica Mocambo (Nas-13), comprovada pelos ensaios de Teodoro (2020). Nesta mesma surgência, de forma aderente aos ensaios realizados, puderam ser representadas as contribuições provenientes da Gruta Zé Irene, Sumidouro Palmeiras e Lagoa Bom Jardim. Durante o processo de calibração, contudo, só se chegou à vazão monitorada da surgência Mocambo com o aporte adicional de água pela entrada externa à oeste da Lagoa Bom Jardim (Nas-14).

Nesse contexto, é interessante destacar que, ainda que o ensaio com traçadores de Teodoro *et al.* (2019) e Teodoro (2020) não tenha comprovado a conexão direta entre a Lagoa Bom Jardim e a Gruta do Morro Redondo, pode ser que exista conexão entre a Lagoa Bom Jardim e outras cavidades mais próximas na região da Gruta e sumidouro da Salvação, conforme sugere o resultado dos lançamentos de partículas. Ressalta-se, ainda, a sugestão de novas rotas de fluxo através do duto oeste-leste proposto até a nascente Jaguara menor (Nas-28) passando pela região da Gruta das Vacas.

Um outro ponto que vale ser mencionado é a origem da vazão da surgência Jaguarua (Nas-11), a qual possivelmente recebe água da região da Gruta Morro Redondo e Lagoa Bom Jardim (conforme sugerido por Teodoro 2020) e por onde sugere-se um conduto passando pela região de grutas e cavidades à leste da nascente.

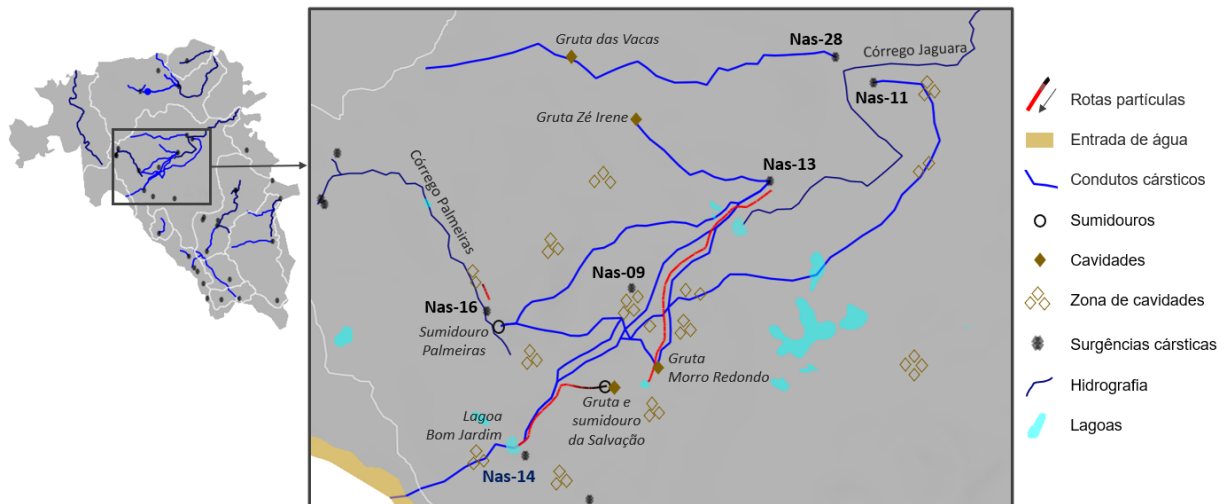


Figura 25 – Condutos modelados na Bacia Palmeiras-Jaguara e resultados da simulação de partículas em direção às nascentes (camada 1).

Na Bacia do Samambaia, analogamente aos casos anteriores, foi possível representar os condutos até as surgências do Engenho (Nas-20) e Palestina (Nas-23) na camada 1 do modelo (Figura 26A) e até a surgência Samambaia (Nas-19) na camada 2 (Figura 26B), conforme as rotas obtidas através dos ensaios com traçadores de Auler (1994) e Teodoro (2020). O resultado da simulação de partículas mostrou, claramente e conforme observado em campo por Teodoro 2020, a contribuição da área da Janela cárstica Cocho d'água (Nas-18) para a surgência do Engenho (Nas-20). Nesse contexto, pela análise de sensibilidade durante a calibração das vazões e pelos resultados das rotas de partículas, acredita-se ainda que as cavidades na porção oeste da bacia tenham impacto relevante nas vazões observadas na Janela cárstica Cocho d'água (Nas-18), surgência Engenho (Nas-20) e na vazão da surgência Samambaia (Nas-19), na qual a contribuição da Gruta Lapa Vermelha (Nas-31) corresponde a apenas 13% da vazão total observada (TEODORO 2020).

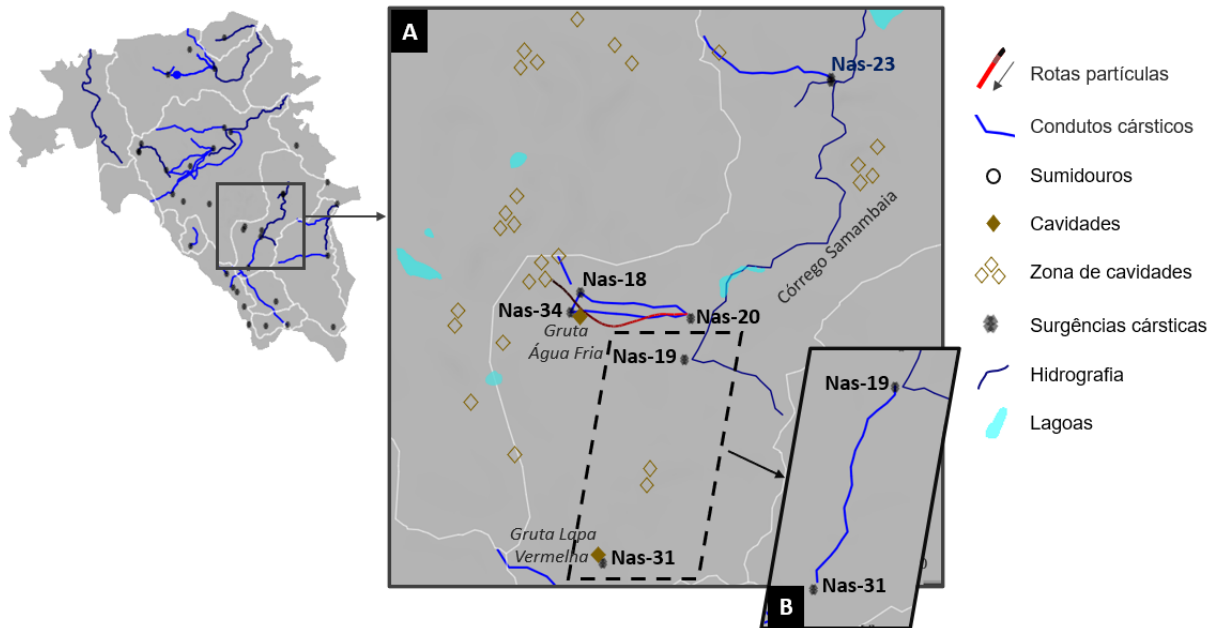


Figura 26 – Conduitos modelados na Bacia Samambaia e resultados da simulação de partículas em direção às nascentes na camada 1 e, na camada 2, no trecho destacado.

6.3 AVALIAÇÃO DA TROCAS DE ÁGUA NO AQUÍFERO CÁRSTICO

A partir dos resultados do modelo numérico foram feitas avaliações das trocas de água calculadas entre o aquífero cárstico da Formação Sete Lagoas e as demais unidades hidrogeológicas (Figura 27).

Os resultados indicam que a maior parte das trocas do aquífero cárstico ocorrem com a porção superior do sistema hidrogeológico, representada pelas coberturas que abrangem os saprolitos (principalmente da Formação Sete Lagoas intemperizada), os sedimentos inconsolidados nas áreas de drenagens (aquífero granular) e, em menor proporção, os pelitos da Formação Serra de Santa Helena (aquiclude). Esse direcionamento de fluxo pode ser explicado pelas trocas com o calcário alterado localizado lateralmente aos maciços aflorantes e sobre o calcário são e pela descarga em superfície sob a forma de surgências cársticas. Nota-se que há também uma contribuição do domínio das coberturas para o aquífero cárstico, o que pode representar a recarga em superfície através das coberturas.

Por outro lado, é interessante notar que, embora sejam os aquíferos com maior extensão em contato, as trocas calculadas entre o aquífero cárstico e o aquífero cárstico-fissural foram muito pequenas o que sugere, de fato, uma compartimentação

entre esses dois sistemas aquíferos, conforme já sugerido também nos trabalhos de Paula (2019) e Ribeiro (2020) e Dantas, Velásquez & Paula (2023).

Em relação ao aquífero fissural do embasamento cristalino, nota-se uma contribuição advinda do aquífero cárstico que ocorre na zona aflorante do embasamento na margem do Ribeirão da Mata, à sudoeste da área de estudo. Como mostrado na Figura 20, nesse ponto há uma componente de fluxo SW em direção ao Ribeirão da Mata, em uma zona onde o gnaiss-migmatítico encontra-se em condição mais alterada, sendo representado, na primeira camada, pelas coberturas ao longo da drenagem (aquífero granular).

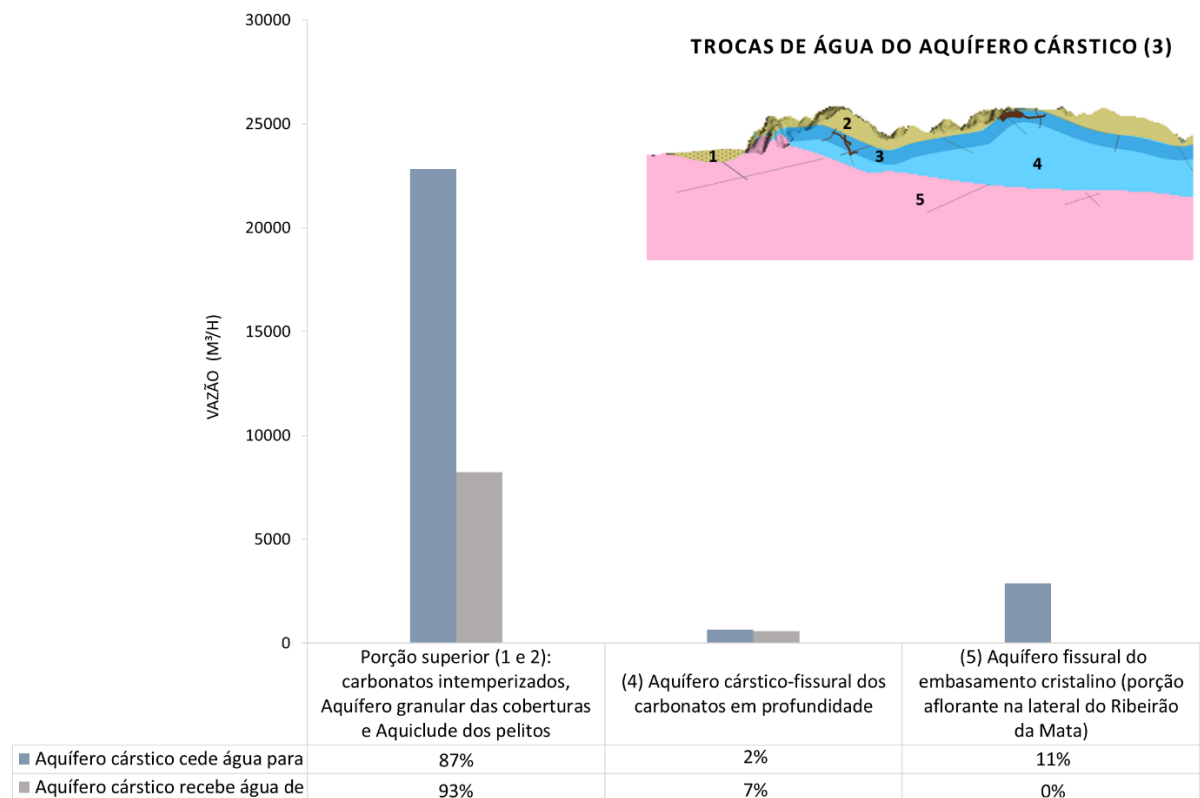


Figura 27 – Trocas de água calculadas pelo modelo numérico entre o aquífero cárstico (camadas 1-4) e as demais unidades hidrogeológicas.

7 - CONCLUSÃO

O modelo numérico hidrogeológico desenvolvido atendeu aos critérios e boas práticas de calibração para níveis d'água (NRMS 11%), vazões (erros das vazões das bacias entre 1 e 23%) e balanço de massa (1%). As condutividades hidráulicas obtidas

foram simplificadas com representação de anisotropia apenas na componente Kz e os valores finais são coerentes com as referências de literatura. Analogamente, a recarga efetiva aplicada por bacia hidrogeológica, variou entre 1 e 19% do volume total de precipitação e também está em consonância com trabalhos em desenvolvimento na área de estudo. Além disso, as cargas hidráulicas na área modelada representaram, satisfatoriamente, a direção preferencial de fluxo subterrâneo, de sudoeste para nordeste, em direção ao Rio das Velhas, que é nível de base regional.

A partir da discretização de condutos cársticos, por meio de discrete features 1D, foi possível representar as rotas de fluxos comprovadas pelos ensaios com traçadores corantes de Auler (1994), Teodoro et al. 2019 e Teodoro (2020) e, durante o processo de retroanálises, foram inseridos outros condutos para calibração das vazões das surgências cársticas.

As simulações de lançamento de partículas, com o intuito de verificar a resposta do modelo em relação ao fluxo subterrâneo por meio dos condutos discretizados, conseguiram reproduzir alguns dos fluxos comprovados pelos ensaios com traçadores e indicaram outras possíveis interações no fluxo subterrâneo do aquífero cárstico. Nas bacias Escrivânia-Gordura e Palmeiras-Jaguara foram representados condutos com entradas externas de água para o sistema, os quais foram essenciais para as calibrações das vazões, corroborando com a hipótese de que parte da água de origem desconhecida observada nas surgências cársticas, seja proveniente de fora da área.

Por fim, a avaliação das trocas de água calculadas entre o aquífero cárstico da Formação Sete Lagoas e as demais unidades hidrogeológicas indicou que a maior parte do fluxo do aquífero cárstico (87%) é descarregado na porção superior do sistema hidrogeológico, o que foi relacionado com as trocas com os carbonatos intemperizados (localizados sobre e lateralmente ao aquífero cárstico) e pela descarga em superfície sob a forma de surgências cársticas.

É importante destacar que modelos numéricos são aproximações da realidade que se baseiam em premissas e, portanto, apresentam limitações. Como oportunidades para trabalhos futuros sugere-se a realização de novos ensaios com traçadores corantes nas rotas de fluxo sugeridas e uso da modelagem numérica de

detalhe, para avaliações locais, utilizando a abordagem dos discrete features para representação de condutos cársticos.

8 - AGRADECIMENTOS

Ao apoio da CECAV para o Projeto: 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) e ao Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (CPMTC-IGC).

9 - REFERÊNCIAS

- ALKMIM, F.F.; MARTINS-NETO, M.A. A bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: PINTO, C.P.; MARTINS-NETO, M.A. (Eds.). Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte: SBG, 2001. p. 9-30.
- ANDERSON, M.P., WOESSNER, W.W., Applied Groundwater Modeling – Simulation of Flow and Advective Transporte, Academic Press, California, E.U.A, 1992.
- ANDERSON, M.P.; WOESSNER, W.W.; HUNT, R.J. Applied Groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. 2^a ed. London: Elsevier Inc, 2015.
- AULER, A. S. Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst, Brazil. 110 f. MSc Thesis, Department Of Geography And Geology, Western Kentucky University, Bowling Green, 1994.
- AULER, A. Lakes as speleogenetic agent in the karst of Lagoa Santa, Brazil. Cave and Karst Science, Buxton, v.21, n.3, p.105-110, 1995.
- AUTERIVES, C.; BINET, S.; ALBÉRIC PATRICK. Inferred Conduit Network Geometry from Geological Evidences and Water-Head in a Fluvio-Karstic System (Val D’Orleans, France). H2Karst Research in Limestone Hydrogeology, p.49-58. 2014.
- BERBERT-BORN, M. Carste de Lagoa Santa, MG - Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; QUEIROZ, E.T.; WINGE, M.; BERBERT-BORN, M. (Eds.) Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. 1. ed. Brasília: DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), 2002. p. 415-430.
- DANTAS, J.C.M; VELÁSQUEZ, L.N.M.; PAULA, R.S. Horizontal and vertical compartmentalization in the fissure and karstic aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area and surrounding, Minas Gerais, Brazil. Journal of South American Earth Sciences, 123. 2023.
- DIERSCH, H.J.G. FEFLOW – Finite Element Modelling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Berlin: Springer, 2014

- GALVÃO, P. H. F. Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas. 124 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 124p. 2015.
- HERAS, R. (Org.) Manual de hidrologia: princípios básicos em hidrologia – v.1. Madrid: Escuela de Hidrología, 473p. 1972.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de clima do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. 1 MAPA. Escala 1:5.000.000. Disponível em: https://atlascolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas_brasil/brasil_clima.pdf. Acesso em: 16mar.2023
- KOHLER, H.C. Geomorfologia Cárstica na Região de Lagoa Santa – MG. Tese de Doutorado. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 113p. 1989.
- MIDDLEMIS, H.; MERRICK, N.P.; ROSS, J.B. Groundwater flow modelling guideline. Aquaterra Consulting Pty Ltd. Western Australia, 133p. 2000.
- NINANYA, H.; GUIGUER, N.; VARGAS JÚNIOR, E.A.; NASCIMENTO, G.; ARAÚJO, E.; CAZARIN, C.L. Analysis of water control in an underground mine under strong karst media influence (Vazante mine, Brazil). *Hydrogeology Journal*. Springer, 2018.
- PACHECO NETO, W.M.; PAULA, R.S.; VELÁSQUEZ, L.N.M.; PENA, M.A.C.; TEIXEIRA, G.M. Caracterização e classificação das lagoas existentes na região cárstica de Lagoa Santa e suas proximidades, através de técnicas de sensoriamento remoto e análise temporal de imagens (no prelo).
- PAULA, R. S. Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Doutorado em Hidrogeologia – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 272p. 2019.
- PEREIRA, S.I. Modelagem hidrogeológica numérica aplicada à avaliação de cenários de uso de água subterrânea no contexto do aquífero cárstico da região urbana de Sete Lagoas (MG). Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia e Recursos Hídricos) – Departamento de Geologia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 105p. 2022.
- PESSOA, P. F. P.; MOURÃO, M. A. A. Levantamento Hidrogeológico. In: IBAMA; CPRM; (Eds.). APA Carste de Lagoa Santa - Meio físico. Belo Horizonte, 1998. 36p. (Série APA Carste de Lagoa Santa - MG).
- PESSOA, P.F.P. Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos da Região de Lagoa Santa, MG. 335 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- RIBEIRO, C.G. Compartimentação dos fluxos do sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí a partir dos isótopos ^2H , ^{18}O e ^3H na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. 2020. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 234p. 2020.
- RIBEIRO, C.G.; MEIRELES, C.G.; LOPES, N.H.B.; ARCOS, R.E.C. Levantamento Geológico estrutural Aplicado aos Fluxos dos Aquíferos Cárstico-Fissurais da Região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais. Trabalho Geológico de Graduação. Instituto de

Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2016.

RIBEIRO, C.G.; VELÁSQUEZ, L.N.M.; PAULA, R.S.; MEIRELES, C.G.; LOPES, N.H.B.; ARCOS, R.E.C.; AMARAL, D.G.P. Análise dos fluxos nos aquíferos cársticos-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Águas Subterrâneas*, v.33, n.1, p.12-21. 2019.

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, Capim Branco, Prudente de Morais, Confins e Funilândia, Minas Gerais – relatório final, escala 1:50.000. 2. ed. Belo Horizonte: CPRM, 2003, 54p.

SILVA, A.B.; MOREIRA, C.V.R.; CESAR, F.M., AULER, A. Estudo da Dinâmica dos Recursos Hídricos da Região Cárstica dos Municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Matozinhos. Unpublished technical report, CETEC, 32p. 1987.

SOUZA, R.T. Vulnerabilidade de Aquíferos Cársticos com Cobertura Espessa de Solo: Metodologia COP-Solo em Ambiente Tropical Úmido. Doutorado em Geologia – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 231p. 2020.

TAYLOR, C.J.; GREENE, E.A. Hydrogeologic Characterization and Methods Used in the Investigation of Karst Hydrology. Chapter 3 in *Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water*. 2008.

TEIXEIRA, G.M.; PENA, M.A.C.; SILVA, P.H.P. Avaliação da conectividade hidrogeológica entre a região a sudeste de Sete Lagoas e a APA Carste de Lagoa Santa. MG. Trabalho Geológico de Graduação. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 282 p. 2020.

TEODORO, M.I.P.; VELÁSQUEZ, L.N.M.; FLEMING, P.M.; PAULA, R.S.; SOUZA, R.T.; DOI, B.M. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, v.33, n.4, p.392-406. 2019.

TEODORO, M.I.P. Hidrodinâmica das zonas cárstica e cárstica-fissural do sistema aquífero da Formação Sete Lagoas por meio de traçadores corantes e da análise das estruturas rúpteis na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. 2020. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 196p. 2020.

VIEIRA, L.C.M. Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 154 p. 2018.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A evolução do conhecimento é feita de forma colaborativa e contínua. Assim, acredita-se que o presente trabalho tenha contribuído para o “Projeto de Implantação e Adequação 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” através da consolidação de estudos anteriores, os quais possibilitaram a geração de um Modelo Hidrogeológico Numérico que poderá, também, ser utilizado como referência e base em trabalhos futuros.

No refinamento do Modelo Hidrogeológico Conceitual, que gerou o artigo “HORIZONTAL AND VERTICAL COMPARTMENTALIZATION IN THE FISSURE AND KARSTIC AQUIFERS OF THE LAGOA SANTA KARST ENVIRONMENTAL PROTECTION AREA AND SURROUNDINGS, MINAS GERAIS, BRAZIL”, a principal contribuição foi mostrar que o comportamento hidrogeológico no sistema cárstico local não está restrito às unidades litoestratigráficas, mas pode ser variável dentro de uma mesma unidade e ter características de fluxo a partir da combinação de duas litologias.

Por sua vez, as compartimentações horizontais e verticais propostas no Modelo Hidrogeológico Conceitual foram aplicadas para o desenvolvimento do Modelo Hidrogeológico Numérico de fluxo subterrâneo, que culminou no artigo “MODELAGEM DE FLUXO SUBTERRÂNEO EM CARSTE NEOPROTEROZÓICO COM BASE EM ROTAS DE TRAÇADORES CORANTES”.

A partir do desenvolvimento da modelagem numérica, com a representação dos condutos cársticos por discrete features e da simulação de caminhamento de partículas, foram sugeridas possíveis rotas de fluxo subterrâneo em direção às nascentes cársticas principais e demonstrada a importância da entrada de água de áreas externas ao domínio do estudo, para explicar as altas vazões observadas em algumas das surgências cársticas.

É importante ressaltar que há limitações na modelagem numérica, uma vez que ela se baseia em premissas e, muitas vezes, são feitas simplificações. A fim de se obter modelos cada vez mais realísticos, o processo de modelagem numérica deve

evoluir em conjunto com conhecimento da área, sendo atualizado, ou refeito, à luz de novas informações e dados de monitoramento. Nesse sentido, sugere-se a continuidade da modelagem hidrogeológica numérica em regime transiente, a partir da consolidação dos novos dados de monitoramento dos projetos em andamento e entende-se também que há oportunidade de desenvolvimento de modelos numéricos locais, e de maior detalhe, com o objetivo de investigar áreas específicas. Nesses modelos, por exemplo, pode-se estudar formas para representação de sumidouros e buscar o entendimento da influência de lagoas no regime de fluxo local. Por fim, sugere-se que as “novas” rotas de fluxo subterrâneo aventadas neste trabalho sejam melhor investigadas através de ensaios com traçadores corantes.

5 REFERÊNCIAS

- Alkmim, F.F.; Martins-Neto, M.A. 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: Pinto, C.P.; Martins-Neto, M.A. (eds.). Bacia do São Francisco. *Geologia e Recursos Naturais*, Belo Horizonte, SBG, 2001. p. 9-30.
- Amaral, D. G. P. 2018. *Análise do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas da região da APA Carste Lagoa Santa (MG)*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 156 p.
- Amaral, D.G.P.; Velásquez, L.N.M.; Rodrigues, P.C.H. 2019. Comportamento hídrico das depressões cársticas da região de Lagoa Santa, MG. *Águas Subterrâneas*, **33**:169-209.
- Anderson, M.P., Woessner, W.W. 1992. Applied Groundwater Modeling – Simulation of Flow and Advective Transporte, Academic Press, California, E.U.A.
- Anderson, M.P.; Woessner, W.W. 2015; Hunt, R.J. Applied Groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. 2ª ed. London: Elsevier Inc.
- Andrade, I.B.; Amorim, J.B. 2018. *Mapeamento geológico com ênfase na relação hidráulica entre o Complexo granítico-gnáissico com o grupo Bambuí*. Graduation final work, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 180 p.
- Auler, A. S. 1994. *Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst, Brazil*. Msc Thesis, Department Of Geography And Geology, Western Kentucky University, Bowling Green, 110 p.
- AULER A. 1995. Lakes as speleogenetic agent in the karst of Lagoa Santa, Brazil. *Cave and Karst Science*, Buxton, v.21, n.3, p.105-110.

Auterives, C.; Binet, S.; Albéric Patrick. 2014. Inferred Conduit Network Geometry from Geological Evidences and Water-Head in a Fluvio-Karstic System (Val D'Orleans, France). *H2Karst Research in Limestone Hydrogeology*, p.49-58.

Berbert-Born, M.; Horta, L. S.; Dutra, G. M. 1998. Levantamento Espeleológico. In: CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. *APA Carste de Lagoa Santa: Patrimônio Espeleológico, Histórico e Cultural – Volume II*, CPRM/IBAMA, Belo Horizonte, 71 p.

Berbert-Born, M. 2002. *Carste de Lagoa Santa, MG - Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira*. In: Schobbenhaus, C.; Campos, D.A.; Queiroz, E.T.; Winge, M.; Berbert-Born, M. (eds.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*, 1. Ed. Brasília, DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), p. 415-430.

Cardoso, F.A. 2019. Natural background levels of inorganic elements in the groundwaters of the Lagoa Santa karst region, Minas Gerais, Brazil. *Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 89p.*

Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF), 2021. A Bacia. Acessado em: 30 August 2021 <<https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/>>.

Dantas, J.C.M; Velásquez, L.N.M.; Paula, R.S. 2023. Horizontal and vertical compartmentalization in the fissure and karstic aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area and surrounding, Minas Gerais, Brazil.

Diersch, H.J.G. 2014. *FEFLOW – Finite Element Modelling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*. Berlin: Springer.

Galvão, P. H. F. 2015. *Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 124 p.

Heras, R. (Org.) 1972. *Manual de hidrologia: princípios básicos em hidrologia – v.1*. Madrid: Escuela de Hidrología, 473p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de clima do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. 1 MAPA. Escala 1:5.000.000. Disponível em: https://atlasescolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas_brasil/brasil_clima.pdf. Acesso em: 16mar.2023

Karfunkel, J.; Aranha, P. R. A.; Büchi, A.; Pimenta, F.; Pagung, R.; Silva Pinto, J.A.; Hofmann, M.; Hoppe, A. 2006. Registros neotectônicos entre Vespasiano e Pedro Leopoldo ao norte de Belo Horizonte, Minas Gerais. In: XLII Congresso Brasileiro de Geologia, Aracaju, *Anais*, p. 292.

- Kohler, H.C. 1989. Geomorfologia Cárstica na Região de Lagoa Santa – MG. Tese de Doutorado. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 113p.
- Middlemis, H.; Merrick, N.P.; Ross, J.B. 2000. Groundwater flow modelling guideline. Aquaterra Consulting Pty Ltd. Western Australia, 133p.
- Miller, J. A. 1999. Introduction and National Summary. In: USGS – U.S. Geological Survey. Groundwater Atlas of the United States. USGS.
- Ninanya, H.; Guiguer, N.; Vargas Júnior, E.A.; Nascimento, G.; Araújo, E.; Cazarin, C.L. 2018. Analysis of water control in an underground mine under strong karst media influence (Vazante mine, Brazil). *Hydrogeology Journal*. Springer.
- Pacheco Neto, W.M.; Paula, R.S.; Velásquez, L.N.M.; Pena, M.A.C.; Teixeira, G.M. Caracterização e classificação das lagoas existentes na região cárstica de Lagoa Santa e suas proximidades, através de técnicas de sensoriamento remoto e análise temporal de imagens (no prelo).
- Palmer, A. N. 1991. Origin and morphology of limestone caves. *Bulletin of Geological Society of America*, **103**(1):1-21.
- Paula, R. S. 2019. *Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 272 p.
- Pereira, S.I. 2022. Modelagem hidrogeológica numérica aplicada à avaliação de cenários de uso de água subterrânea no contexto do aquífero cárstico da região urbana de Sete Lagoas (MG). Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia e Recursos Hídricos) – Departamento de Geologia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 105p.
- Pessoa, P. F. P.; Mourão, M. A. A. 1998. Levantamento Hidrogeológico. In: IBAMA; CPRM; (eds.). *APA Carste de Lagoa Santa - Meio físico*. Belo Horizonte, 36 p.
- Pessoa, P.F.P. 2005. *Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos da Região de Lagoa Santa, MG*. PhD Thesis, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 335 p.
- Ribeiro, C.G. 2020. *Compartimentação dos fluxos do sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí a partir dos isótopos ^2H , ^{18}O e ^3H na região de Lagoa Santa, Minas Gerais*. 2020. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 234 p.
- Ribeiro, C.G.; Meireles, C.G.; Lopes, N.H.B.; Arcos, R.E.C. 2016. *Levantamento Geológico estrutural Aplicado aos Fluxos dos Aquíferos Cárstico-Fissurais da Região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais*. Graduation final work. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Ribeiro, C.G.; Velásquez, L.N.M.; Paula, R.S.; Meireles, C.G.; Lopes, N.H.B.; Arcos, R.E.C.; Amaral, D.G.P. 2019. Análise dos fluxos nos aquíferos cársticos-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Águas Subterrâneas*, **33** (1):12-21.

Ribeiro, J.H.; Tuller, M.P.; Filho, A.D.; Padilha, A.V.; Córdoba, C.V. 2003. *Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais – relatório final, escala 1:50.000*. 2. ed. Belo Horizonte, CPRM, 54 p.

Schöll, W. U. 1976. Sedimentologia e geoquímica do Grupo Bambuí na parte sudeste da Bacia do São Francisco. In: XXIX Congresso Brasileiro de Geologia, Ouro Preto, *Anais*, 29, 2, p. 207-231.

Shinzato, E. *O carste da Área de Proteção Ambiental de Lagoa Santa (MG) e sua influência na formação dos solos*. 1998. MS Dissertation, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, 117 p.

Silva, A.B.; Moreira, C.V.R.; Cesar, F.M., Auler, A. 1987. Estudo da Dinâmica dos Recursos Hídricos da Região Cárstica dos Municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Matozinhos. Unpublished technical report, CETEC, 32 p.

Souza, R.T. 2020. Vulnerabilidade de Aquíferos Cársticos com Cobertura Espessa de Solo: Metodologia COP-Solo em Ambiente Tropical Úmido. Doutorado em Geologia – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 231 p.

Taylor, C.J.; Greene, E.A. 2008. Hydrogeologic Characterization and Methods Used in the Investigation of Karst Hydrology. Chapter 3 in *Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water*.

Teixeira, G.M.; Pena, M.A.C.; Silva, P.H.P. 2020. *Avaliação da conectividade hidrogeológica entre a região a sudeste de Sete Lagoas e a APA Carste de Lagoa Santa, MG*. Graduation final work, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 282 p.

Teodoro, M.I.P.; Velásquez, L.N.M.; Fleming, P.M.; Paula, R.S.; Souza, R.T.; Doi, B.M. 2019. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, **33** (4):392-406.

Teodoro, M.I.P. 2020. *Hidrodinâmica das zonas cárstica e cárstica-fissural do sistema aquífero da Formação Sete Lagoas por meio de traçadores corantes e da análise das estruturas rúpteis na região de Lagoa Santa, Minas Gerais*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 196 p.

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.; Almeida, S.B.S. 2018. *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 nº22.317. Belo Horizonte, p. 93-109.

Vieira, L.C.M. 2018. *Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG*. MS Dissertation, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 154 p.

Vieira, L.C.M.; Velásquez, L.N.M.; Dussin, T.M.; Borba, R.P. 2020. Caracterização Hidrogeoquímica dos aquíferos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Geociências*, **39**(4):1087-1105.

White, W.B.; 2002. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Engineering Geology*. **65**:85-105.