UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

Rafaela Assunção Gurita

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS NA APA CARSTE DE LAGOA SANTA, MINAS GERAIS – BRASIL

Belo Horizonte
2026

Rafaela Assunção Gurita

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS NA APA CARSTE DE LAGOA SANTA, MINAS GERAIS – BRASIL

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

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sérgio De Paula

Co-Orientador: Prof. Dr. Tiago Amâncio Novo

Belo Horizonte

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DO IGC/UFMG

FOLHA DE APROVAÇÃO

Comparação entre Métodos para Estimativa de Parâmetros Hidrodinâmicos na APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais - Brasil

RAFAELA ASSUNÇÃO GURITA

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

Aprovada em 01 de julho de 2026, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Dr(a). Rodrigo Sérgio de Paula – Orientador(a)
PPGeol/UFMG

Prof(a). Dr(a). Paulo Henrique Ferreira Galvão
PPGeol/UFMG

Prof(a). Dr(a). Luana Alves de Lima
UFVJM

Belo Horizonte, 01 de julho de 2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Daniela, e à minha irmã, Risamara, duas mulheres extraordinárias que me ensinaram, com o exemplo, o significado da coragem, resiliência e amor incondicional. Mesmo sendo uma família pequena, vocês fizeram com que eu nunca me sentisse sozinha. Ofereceram compreensão e a tranquilidade necessária para que eu pudesse seguir em frente, mesmo nos momentos em que minha ausência foi inevitável. Obrigada por compreenderem as horas dedicadas a este trabalho, por respeitarem meus silêncios e, principalmente, por nunca deixarem de acreditar em mim. À minha sobrinha, Maria Luísa, dedico também este momento. Espero que, ao crescer, você saiba que pode sonhar sem limites. Que nunca duvide da sua capacidade de conquistar aquilo que desejar e que tenha a certeza de que, assim como eu tive uma base sólida para me sustentar, você também terá. Nós sempre estaremos ao seu lado, apoiando seus sonhos, celebrando suas conquistas e lembrando que o amor da família é a força que nos permite ir cada vez mais longe.

Ao meu orientador, Rodrigo, minha sincera gratidão por toda a dedicação e confiança ao longo desta trajetória. Agradeço, especialmente, por enxergar minhas dificuldades sem jamais permitir que elas definissem minha caminhada. Levarei comigo não apenas os conhecimentos, mas também o exemplo de profissionalismo, ética e compromisso com a ciência.

Agradeço a todos os amigos que fiz ao longo deste percurso pelas experiências compartilhadas, Iza, Camila, Pedro e Matheus. Aos amigos de longa dada, Jennifer, Carol, Marina, Lúcio, Luiz, Aninha, obrigada pela paciência nos meus momentos mais sensíveis. Agradeço à Vale, Angélica e Diego, pelo suporte e liberações necessárias para que eu conseguisse finalizar esta dissertação.

Ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade/Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas - ICMBio/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.

Ao Instituto de Geociências – UFMG pela oportunidade e infraestrutura disponibilizadas para o desenvolvimento da pesquisa. Ao William, por todo suporte.

Aos membros da banca, Paulo Galvão e Luana Lima pelas valiosas contribuições.

RESUMO

A Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, localizada na porção centro-sul de Minas Gerais, abriga um dos mais importantes sistemas cársticos do Brasil. Os aquíferos carbonáticos associados ao Grupo Bambuí constituem importante fonte de abastecimento hídrico para a população local e para parte da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Entretanto, a elevada heterogeneidade e anisotropia características desses sistemas dificultam a determinação de parâmetros hidrodinâmicos representativos, sobretudo quando são empregados métodos originalmente desenvolvidos para aquíferos homogêneos e isotrópicos. Neste contexto, esta pesquisa teve como objetivo aplicar métodos desenvolvidos especificamente para ambientes cársticos na estimativa dos parâmetros transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S), com destaque para os métodos de Thrailkill (1988) e Bernard & Delay (2008). Inicialmente, esses métodos foram estatisticamente comparados entre si, buscando identificar aqueles mais representativos para a caracterização hidrogeológica regional. Posteriormente, os métodos clássicos de Agarwal (1980) e Moench (1984), amplamente difundidos na literatura hidrogeológica, foram avaliados em relação aos métodos cársticos selecionados, visando identificar quais apresentavam maior compatibilidade conceitual e estatística. A partir dessas relações, foram propostas equações de conversão regional destinadas a ajustar os resultados produzidos pelos métodos clássicos para valores equivalentes aos obtidos pelos métodos específicos para o carste. Para isso, foram analisados dados provenientes de 51 testes de bombeamento realizados em aquíferos cárstico-fissurais, além de séries históricas de monitoramento de nível d'água obtidas em 12 instrumentos. Os resultados indicaram distribuições não normais para todos os métodos avaliados, refletindo a elevada complexidade dos sistemas aquíferos cársticos. Para T, o método de Thrailkill (1988) apresentou maior representatividade hidrogeológica, com intervalo entre 10^{-2} e 10^{-3}, enquanto Agarwal (1980) foi o método clássico que apresentou maior aderência aos seus resultados, embora com dados subestimados em relação à Thrailkill (1988), com coeficiente de correlação de 0.98 e coeficiente de determinação próximo de 0,99. Para S, Bernard & Delay (2008) apresentou resultados mais uniformes e compatíveis com os intervalos tipicamente observados em aquíferos cársticos, com intervalo médio de 10^{-4}. Entretanto, em função da maior disponibilidade de dados e proximidade entre os

valores, as análises comparativas foram conduzidas utilizando Thrailkill (1988) como referência. Novamente, Agarwal (1980) apresentou o melhor desempenho entre os métodos clássicos, novamente com valores menores aos de Thrailkill (1988), alcançando R^2 de 0,98 após o ajuste dos dados. As análises espaciais evidenciaram que os maiores valores de T e S estão associados às unidades carbonáticas da Formação Sete Lagoas, às áreas com maior densidade de feições cársticas e aos principais corredores estruturais de fluxo subterrâneo. Por fim, os resultados demonstram que, embora os métodos desenvolvidos para aquíferos carbonáticos sejam os mais adequados para a estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos da região, metodologias clássicas podem ser utilizadas de forma mais confiável quando previamente calibradas a partir de referências conceitualmente compatíveis com a dinâmica dos sistemas cársticos.

Palavras-chave: transmissividade; coeficiente de armazenamento; hidrogeologia; SIG; estatísticas.

ABSTRACT

The Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area (EPA), located in the south-central region of Minas Gerais State, Brazil, encompasses one of the country's most significant karst systems. The carbonate aquifers associated with the Bambuí Group constitute an important groundwater resource for the local population and for part of the Belo Horizonte Metropolitan Region. However, the pronounced heterogeneity and anisotropy that characterize these systems hinder the estimation of representative hydrodynamic parameters, particularly when methods originally developed for homogeneous and isotropic aquifers are employed. In this context, this study aimed to apply methodologies specifically developed for karst environments to estimate transmissivity (T) and storage coefficient (S), with particular emphasis on the methods proposed by Thrailkill (1988) and Bernard and Delay (2008). Initially, these karst-specific methods were statistically compared to identifying those providing the most representative characterization of the regional hydrogeological system. Subsequently, the conventional methods of Agarwal (1980) and Moench (1984), which are widely used in hydrogeological investigations, were evaluated against the selected karst methods to determine which exhibited the greatest conceptual and statistical agreement. Based on these relationships, regional conversion equations were developed to adjust estimates obtained from conventional methods to values equivalent to those generated by the karst-specific approaches. The analyses were based on data from 51 pumping tests conducted in karst-fissured aquifers, together with historical groundwater-level records from 12 monitoring wells. The results revealed non-normal distributions for all evaluated methods, reflecting the intrinsic complexity of karst aquifer systems. For transmissivity, the Thrailkill (1988) method provided the most representative hydrogeological estimates, with values predominantly ranging between 10^{-2} and 10^{-3} m^2 s^{-1}. Among the conventional methods, Agarwal (1980) showed the highest agreement with Thrailkill (1988), albeit yielding lower values compared to Thrailkill (1988), yielding a correlation coefficient of 0.98 and a coefficient of determination close to 0.99. For storage coefficient, Bernard and Delay (2008) produced more uniform estimates that were consistent with values typically reported for carbonate aquifers, with an average magnitude on the order of 10^{-4}. Nevertheless, because of the larger dataset available and the close correspondence between the results, Thrailkill (1988) was adopted as the reference

method for comparative analyses. Once again, Agarwal (1980) exhibited the best performance among the conventional approaches, again with figures lower than Thraikill (1988), achieving an R^2 of 0.98 after data adjustment. Spatial analyses showed that the highest transmissivity and storage coefficient values are associated with the carbonate rocks of the Sete Lagoas Formation, areas with a high density of karst features, and the principal structural groundwater-flow corridors. Overall, the results demonstrate that although methods specifically developed for carbonate aquifers provide the most reliable estimates of hydrodynamic parameters in the study area, conventional methods can also be applied with greater confidence when previously calibrated using reference methods that are conceptually consistent with the hydrogeological behavior of karst systems.

Keywords: transmissivity; storage coefficient; hydrogeology; GIS; statistics.

SUMÁRIO

RESUMO 6

ABSTRACT 8

1 INTRODUÇÃO 15

1.2 Objetivo 18

1.3 Justificativa 19

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22

2.1 O Carste 22

2.2 Hidrogeologia do Carste 26

2.3 Parâmetros hidrodinâmicos no Carste 30

2.4 Evolução do conhecimento na Área 32

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 38

3.1 Localização 38

3.2 Clima 39

3.3 Geologia 41

3.4 Geomorfologia e Solos 46

3.5 Hidrologia 50

3.6 Hidrogeologia 55

4 MATERIAIS E MÉTODOS 63

4.1 Compilação e Tratamento de Dados 63

4.2 Métodos Para Obtenção de Parâmetros Hidrodinâmicos 64

4.2.1 Métodos Em Meios Não Específicos 66

Agarwal (1980) 67

Moench (1984) 68

4.2.2 Métodos Em Meios Cársticos 68

Thrailkill (1988) 69

Bernard & Delay (2008) 72

4.3 Comparação estatística....73
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 77
5.1 Transmissividade (T)....77
5.1.1 Aplicação do método de Thraikill (1988)....77
5.1.2 Avaliação estatística dos métodos....78
5.1.3 Distribuição espacial da transmissividade 81
5.1.4 Correlação entre os métodos e proposição de equação de conversão 83
5.2 Coeficiente de Armazenamento (S)....85
5.2.1 Aplicação do método de Bernard & Delay (2008) 85
5.2.2 Avaliação estatística dos métodos....86
5.2.3 Distribuição espacial do armazenamento 88
5.2.4 Correlação entre os métodos e proposição de equação de conversão 90
6 CONCLUSÃO....93
7 REFERÊNCIAS 95
8 APÊNDICE 106
APÊNDICE A – RESULTADOS DOS MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DE T. 106
APÊNDICE B – RESULTADOS DOS MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DE S. 108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Relação entre disponibilidade de CO2 e processos de dissolução na zona epicárstica. 26
Figura 2 — Classificação genética de dolinas. 27
Figura 3 — Representação de diversas feições comuns em ambientes cársticos. 29
Figura 4 — Localização da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, com indicação das lagoas mapeadas, hidrografia e municípios. 39
Figura 5 — Mapa Geológico da área de estudo, com indicação da hidrografia e estruturas descontínuas. 42
Figura 6 — Perfil esquemático com as principais formações que constituem a geologia regional da área de estudo. 43
Figura 7 — Mapa hidrográfico com as principais bacias hidrográficas mapeadas na área de estudo. 52
Figura 8 — Mapa geológico com as principais rotas de fluxo identificadas nos estudos de traçadores, além da indicação do mapeamento de lagoas e maciços locais. 56
Figura 9 — Relação de conjuntos com intervalos de rebaixamento, com indicação do início do rebaixamento (retângulo vermelho 1) e início da recuperação (retângulo vermelho 2). 69
Figura 10 — Geometria do sub-aquífero e do poço na solução de carga constante. 70
Figura 11 — Exemplo da aplicação do método de Thraikill (1988) em um dos poços compilados na área de estudo, com destaque para os novos intervalos de rebaixamento e recuperação do nível d'água. 78
Figura 12 — Variação estatística completa (a) e em escala reduzida (b) dos valores de T dos métodos aplicados. 80
Figura 13 — Mapas de distribuição de transmissividade a partir dos métodos de Thraikill (1988) e Agarwal (1980), em poços que interceptam exclusivamente sistemas aquíferos cársticos-fissurais. 82
Figura 14 — Análise de regressão log-log entre os métodos de Agarwal (1980) e Thraikill (1988) para transmissividade. 84
Figura 15 — Exemplo da aplicação do método de Bernard & Delay (2008) em um dos poços compilados na área de estudo, com destaque para a correlação entre os valores de S e a variação da pressão atmosférica. 86

Figura 16 — Variação estatística completa (a) e em escala reduzida (b) dos valores de S dos métodos aplicados. 88
Figura 17 — Mapas de distribuição de S a partir dos métodos de Thraikill (1988) e Agarwal (1980), em poços que interceptam exclusivamente sistemas aquíferos cársticos e cárstico-fissurais. 90
Figura 18 — Análise de regressão log-log antes das análises e remoção de *outliers* entre os métodos de Agarwal (1980) e Thraikill (1988) para S. Destaque em vermelho para os valores considerados outliers. 91
Figura 19 — Análise de regressão log-log após análises e remoção de *outliers* entre os métodos de Agarwal (1980) e Thraikill (1988) para S. 92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Comparação conceitual entre os diferentes métodos de tratamento de dados para obtenção de parâmetros hidrodinâmicos. 66
Tabela 2 — Exemplo da aplicação do método de Thraikill (1988) em um dos poços compilados na área de estudo, com destaque para as equações propostas e parâmetros de validação. 78
Tabela 3 — Transmissividade (m²/s) obtida para os 3 métodos propostos. 79
Tabela 4 — Armazenamento (S) obtido a partir de 4 métodos. 87

1 INTRODUÇÃO

O conceito de carste refere-se a paisagens formadas pela presença de cavernas e sistemas subterrâneos de circulação hídrica, desenvolvidos em rochas solúveis. A interação da água com o substrato rochoso promove processos de carstificação, resultado da elevada solubilidade das rochas carbonáticas e da existência de uma porosidade secundária bem desenvolvida (White, 2003; Ford & Williams, 2007). O avanço da ciência dedicada ao estudo do carste ampliou a compreensão sobre a vulnerabilidade desses ambientes e sua relevância para a sociedade. Estima-se que vastas áreas continentais livres de gelo sejam compostas por terrenos cársticos e que cerca de 20 a 25% da população mundial dependa diretamente das águas subterrâneas oriundas desses sistemas (Ford & Williams, 2007).

Devido à distribuição irregular das fraturas e planos de acamamento, que funcionam como vias preferenciais para a circulação da água e para os processos de dissolução, os aquíferos cársticos apresentam elevada heterogeneidade e anisotropia (Legrand & Lamoreaux, 1975; Ford & Williams, 1991). Essa característica se evidencia na grande variação dos valores de condutividade hidráulica (K) observados em diferentes pontos de um mesmo aquífero, bem como na independência da direção de medição, o que confirma sua anisotropia. A determinação das propriedades hidrodinâmicas desses sistemas exige análises mais detalhadas. Goldscheider & Drew (2007) destacam o chamado *“Hydraulic conductivity-scale effect”*, ressaltando que os resultados em testes de bombeamento são diretamente influenciados pela presença de macrofraturas, o que tende a elevar os valores de K.

Apesar das limitações impostas pela complexidade desses sistemas, Feitosa *et al.* (2008) apontam que alguns métodos de interpretação de testes de bombeamento podem ser aplicados para estimar parâmetros como transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S). Contudo, os resultados devem ser considerados apenas como representativos das imediações do poço analisado, não sendo recomendada sua extrapolação para áreas mais amplas. White (2002) acrescenta que os aquíferos cársticos podem ser descritos como sistemas de tripla permeabilidade, nos quais o fluxo subterrâneo ocorre em diferentes escalas: pela matriz rochosa intacta, pelas fraturas e pelos protocondutos. Assim, mesmo que os valores obtidos sejam pontuais

ou acompanhados de ressalvas, o conhecimento desses parâmetros é essencial para compreender a dinâmica do fluxo subterrâneo e a produtividade dos aquíferos.

A porção central do estado de Minas Gerais abriga um dos sistemas cársticos mais relevantes do Brasil sob os pontos de vista arqueológico, paleontológico, espeleológico, hidrogeológico e cultural, com um sistema de cavernas e outras formações cuja preservação é primordial para o ecossistema local (Viana, Kohler & Tavares, 1998). Assim, definiu-se como objeto de estudo desta dissertação a Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa (APACLS), uma unidade de conservação ambiental que se destaca mundialmente por abrigar importantes sítios arqueológicos, incluindo “Luzia”, o mais antigo fóssil humano das Américas, com cerca de 11 mil anos (Herrmann *et al.,* 1998; Feathers *et al.,* 2010), além do Parque Estadual do Sumidouro, com as famosas e turísticas Grutas da Lapinha, Maquiné e Rei do Mato.

Localizada a cerca de 35 km ao norte de Belo Horizonte, a APACLS possui aproximadamente 360 km² e engloba, total ou parcialmente, os municípios de Matozinhos, Funilândia, Pedro Leopoldo, Lagoa Santa e, desde 1997, Confins (CPRM/IBAMA, 1998). Em função da sua proximidade com a capital mineira, o Governo de Minas Gerais, nos últimos anos, intensificou as táticas de desenvolvimento econômico local, como as novas instalações da Cidade Administrativa (sede do governo do estado) e a expansão do Aeroporto Estadual, somadas aos diferentes empreendimentos já existentes na área, como siderurgias e mineradoras de cimento e cascalho, elevando a condição da área para a de polo industrial (Viana, Kohler & Tavares, 1998). Segundo De Paula (2019), em função da condição de recarga pontual em alguns sumidouros e fraturas abertas, o sistema aquífero torna-se intrinsicamente mais vulnerável à poluição. Assim, a condição econômica e hidrogeológica local coloca a região em potencial destaque para novos conflitos hídricos e interesse ambiental (Viana, Kohler & Tavares, 1998).

Nesse sentido, entende-se que é fundamental expandir o conhecimento hidrogeológico em áreas de rica diversidade científica e cultural, que se associam a condições de crescimento demográfico sem orientação definida. Vale ressaltar que a criação da APACLS pelo Governo Federal em 1990, e sua posterior ampliação em 1996, visou proteger esse sistema frágil, sobretudo diante do aumento de investimentos nos setores minerários, industriais, turístico, agrícola e habitacional,

resultando em crescente pressão sobre os recursos naturais, especialmente os hídricos (De Paula & Velásquez, 2019). Projetos institucionais, como o VIDA (Ribeiro *et al.,* 2003) e o APA Carste Lagoa Santa (Viana, Kohler & Tavares, 1998), marcaram etapas decisivas ao fornecer mapeamentos geológicos em escala detalhada (1:50.000) e consolidar interpretações estruturais que se tornaram referência para estudos posteriores. Esses trabalhos revelaram a deformação das unidades do Grupo Bambuí, com falhas de empurrão, zonas de cisalhamento sub-horizontais, fraturas múltiplas e contatos tectônicos, elementos fundamentais para compreender o condicionamento da carstificação e do fluxo subterrâneo.

Posteriormente, Velásquez *et. al.* (2018) iniciaram o “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”, partindo do entendimento de que a APA é uma área crítica, sob pressão antrópica, no estado de Minas Gerais, e que poderia subsidiar a efetivação do Plano de Ação Nacional para Conservação do Patrimônio Espeleológico das Áreas Cársticas da Bacia do Rio São Francisco pelo ICMBio.

No que tange os estudos relacionados a parâmetros hidrodinâmicos, muitos foram elaborados na APA, porém a grande maioria utilizou-se se métodos clássicos, como a equação de Theis (1935), os quais baseiam-se na Lei de Darcy e assumem a validade de se aproximar o meio (matriz, fraturas e rede de condutos) como um aquífero poroso quando o número de fraturas é elevado e elas estão interconectadas (Bair & Roadcap, 1992; Podgorney & Ritzi Jr., 1997; Muldoon & Bradbury, 2005). No entanto, em aquíferos cársticos, o fluxo pode depender, principalmente, da rede de condutos em vez da matriz, e como os modelos de meio poroso equivalente não distinguem entre fluxo preferencial, eles podem não representar adequadamente esse tipo de aquífero (Pankow *et al.,* 1986; Scanlon *et al.,* 2003). Feitosa *et al.* (2008) e Galvão, Todd & Hirata (2015) indicaram, ainda, os obstáculos ao extrapolar valores obtidos por métodos diretos em aquíferos cársticos devido à sua anisotropia e heterogeneidade inerentes.

O presente trabalho, portanto, visa utilizar diferentes metodologias de análise aplicadas em poços tubulares instalados em aquíferos cársticos, com o objetivo de avaliar a aplicabilidade de abordagens desenvolvidas para sistemas carbonáticos.

Entre os métodos voltados ao carste, destaca-se a Análise de Intervalo de Rebaixamento (DIA), proposta por Thrailkill (1988), empregada na estimativa de T e S em aquíferos rasos, além do procedimento de Bernard & Delay (2008), que utiliza variações barométricas e marés terrestres para calcular S em ambientes confinados. Assim, esses métodos foram comparados entre si, buscando identificar aqueles mais representativos para a caracterização hidrogeológica regional. Por outro lado, reconhecendo que métodos clássicos, amplamente difundidos na literatura hidrogeológica, como Agarwal (1980) e Moench (1984), também foram avaliados e comparados em relação aos métodos cársticos selecionados, visando identificar quais apresentavam maior compatibilidade conceitual e estatística. A integração dessas diferentes abordagens busca ampliar os métodos de obtenção de parâmetros hidrodinâmicos, a partir de referências conceitualmente compatíveis com a dinâmica dos sistemas cársticos local.

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a aplicabilidade de diferentes metodologias de interpretação de testes de bombeamento para a estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos T e S em aquíferos carbonáticos da APA Carste de Lagoa Santa, com ênfase na comparação entre métodos desenvolvidos especificamente para ambientes cársticos e na adaptação de métodos clássicos amplamente utilizados na literatura hidrogeológica.

De forma mais específica, este estudo pretende:

- Aplicar os métodos de Thrailkill (1988) e Bernard & Delay (2008), desenvolvidos especificamente para sistemas cársticos, visando estimar os parâmetros T e S e avaliar sua representatividade para o contexto hidrogeológico da APA Carste de Lagoa Santa;

- Comparar os resultados dos métodos cársticos, identificando suas potencialidades, limitações e aderência ao modelo conceitual hidrogeológico regional;

- Aplicar os métodos clássicos de Agarwal (1980) e Moench (1984) para a estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos, avaliando seu desempenho em aquíferos carbonáticos;

- Realizar análises estatísticas entre os resultados dos diferentes métodos, buscando identificar convergências, divergências e níveis de compatibilidade entre as abordagens avaliadas;

- Identificar, entre os métodos clássicos analisados, aqueles que apresentam maior correspondência estatística e hidrogeológica com os métodos específicos para o carste, e, posteriormente, desenvolver equações de correção regional que permitam converter resultados obtidos por métodos clássicos em estimativas equivalentes às produzidas pelos métodos cársticos considerados mais representativos;

- Espacializar os valores de T e S em ambiente SIG, relacionando sua distribuição às unidades geológicas, estruturas tectônicas, feições cársticas e principais trajetórias de fluxo subterrâneo da área de estudo.

1.3 Justificativa

A APA Carste de Lagoa Santa, situada no vetor norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte, constitui uma das mais importantes áreas de pesquisa relacionadas à arqueologia, paleontologia, espeleologia e hidrogeologia do território brasileiro. Os aquíferos carbonáticos associados às rochas do Grupo Bambuí, unidade pertencente ao Supergrupo São Francisco, representam um dos principais reservatórios de água subterrânea de Minas Gerais, sendo responsáveis pelo abastecimento de parcela significativa da população local e desempenhando papel estratégico para a segurança hídrica regional.

Nas últimas décadas, a região tem sido submetida a intensas transformações decorrentes da expansão urbana, do crescimento industrial, da mineração de calcário, da agropecuária e da implantação de grandes empreendimentos de infraestrutura, como o Aeroporto Internacional de Belo Horizonte e a Cidade Administrativa. Esse processo ampliou a pressão sobre os recursos hídricos subterrâneos e intensificou os conflitos relacionados ao uso e à ocupação do solo, tornando ainda mais necessária

a compreensão do funcionamento hidrogeológico do sistema aquífero. Estudos como o de Auler (1994) já apontavam problemas recorrentes, como a instalação desordenada de poços tubulares, a expansão urbana sobre áreas cársticas, a poluição hídrica, o desmatamento e a contaminação agrícola e microbiológica nas zonas de recarga.

Entretanto, a caracterização de aquíferos carbonáticos constitui um desafio científico devido à elevada heterogeneidade e anisotropia desses sistemas. A circulação da água subterrânea ocorre por meio de uma complexa interação entre fraturas e condutos dissolvidos, resultando em comportamentos hidráulicos que frequentemente não atendem aos pressupostos adotados pelos métodos clássicos de interpretação de testes de bombeamento (Feitosa *et al.,* 2008). Apesar disso, grande parte dos estudos hidrogeológicos desenvolvidos na APA Carste de Lagoa Santa e em outras regiões carbonáticas brasileiras, foi conduzida com base em metodologias originalmente concebidas para aquíferos homogêneos e isotrópicos, como as soluções derivadas de Theis (1935).

Embora essas abordagens tenham contribuído significativamente para o avanço do conhecimento hidrogeológico regional, sua aplicação em sistemas cársticos pode resultar em interpretações simplificadas ou parciais dos parâmetros hidrodinâmicos. Como consequência, estimativas de T e S frequentemente deixam de representar adequadamente a influência dos condutos dissolvidos, das fraturas e das diferentes escalas de fluxo presentes nos aquíferos carbonáticos.

Nesse contexto, a principal motivação deste trabalho reside na necessidade de avaliar metodologias desenvolvidas especificamente para ambientes cársticos, partindo do pressuposto de que essas abordagens são conceitualmente mais adequadas para representar a dinâmica hidrogeológica de sistemas carbonáticos. Métodos como Thrailkill (1988) e Bernard & Delay (2008) foram concebidos considerando características inerentes ao carste e, portanto, tendem a fornecer estimativas mais compatíveis com o comportamento real desses aquíferos.

A relevância científica da pesquisa está justamente na avaliação comparativa entre essas metodologias específicas para o carste, buscando identificar quais delas melhor representam as condições hidrogeológicas da APA Carste de Lagoa Santa. Somente

a partir dessa definição torna-se possível avaliar criticamente os métodos clássicos mais difundidos na literatura, verificando quais apresentam maior proximidade estatística e conceitual com os resultados pelas abordagens cársticas.

Além disso, este estudo busca estabelecer correlações matemáticas e equações de conversão regional que permitam ajustar esses resultados para valores equivalentes aos obtidos pelos métodos específicos para o carste. Dessa forma, pretende-se ampliar a aplicabilidade e confiabilidade das metodologias clássicas quando utilizadas em ambientes carbonáticos, fortalecendo a construção de modelos conceituais mais robustos.

Diante desse cenário, as seguintes questões científicas orientam a pesquisa: entre os métodos desenvolvidos especificamente para sistemas cársticos, quais apresentam maior capacidade de representar os parâmetros T e S na APA Carste de Lagoa Santa? Entre os métodos clássicos mais usuais na literatura, como os de Agarwal (1980) e Moench (1984), quais apresentam maior proximidade conceitual e numérica em relação aos métodos voltados ao carste? E, por fim, é possível estabelecer relações matemáticas que permitam converter resultados dos métodos convencionais em estimativas equivalentes às produzidas por metodologias concebidas especificamente para a realidade hidrogeológica dos aquíferos carbonáticos?

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo corresponde à síntese da revisão bibliográfica, reunindo os conceitos fundamentais que serviram de base para a elaboração deste trabalho. Inicialmente, apresenta-se um panorama sobre a evolução do conhecimento acerca dos terrenos cársticos e suas principais características. Em seguida, é feita uma revisão sobre os principais modelos conceituais hidrogeológicos de fluxo e hidrodinâmicos, foco principal deste trabalho. Por fim, o capítulo contempla um levantamento dos estudos geológicos pretéritos relacionados ao tema e à área de estudo, tanto em escala regional quanto local, oferecendo o embasamento necessário para a compreensão do contexto investigado.

2.1 O Carste

O termo “carste” é amplamente empregado para designar terrenos formados por rochas solúveis, sobretudo carbonáticas, como calcário, mármore e gesso. A solubilidade desses materiais condiciona a evolução da paisagem e a formação de diversas feições cársticas, entre elas lapiás, dolinas, uvalas, poljés, simas, sumidouros e cavernas, elementos fundamentais para compreender a dinâmica desses ambientes (Dias, 2009).

De modo geral, o carste refere-se a paisagens desenvolvidas em rochas predominantemente carbonáticas, como calcário e dolomito, sendo denominado por muitos pesquisadores como “Carste Clássico” (Ford & Williams, 2007; Van Beynen, 2011). Contudo, parte da literatura científica amplia o conceito para incluir paisagens formadas em outros tipos de rochas, já que feições semelhantes às do carste clássico também podem se desenvolver em materiais não carbonáticos, o que torna o uso do termo igualmente válido (Travassos, 2010).

Esse conceito tem passado por transformações, impulsionadas pelos avanços da carstologia e pela compreensão mais aprofundada dos processos que originam as formas e sua relação com os sistemas geológicos e hidrológicos. No presente trabalho, o termo será utilizado em associação direta às regiões carbonáticas.

Historicamente, o termo surgiu na região de Kras, localizada entre a Eslovênia e a Itália, onde o relevo é chamado de carso. A palavra eslovena kras originou o termo

germânico karst, que acabou se consolidando mundialmente para designar esse tipo de relevo (Sweeting, 1972; Ford & Williams, 1989; 2007). A base da moderna carstologia foi estabelecida no século XIX, com os estudos do sérvio Jovan Cvijić (1865–1927), natural da região de Kras (Van Beynen, 2011).

Para Cvijić (1960), o carste ocorre em áreas calcárias ou em rochas análogas, compostas por diferentes proporções de carbonato de cálcio, tornando-as solúveis em água, especialmente quando há presença de ácido carbônico. O grau de fissuração da rocha é determinante, pois permite a penetração da água e promove a dissolução em profundidade. A descrição detalhada das formas cársticas e sua associação ao processo de dissolução estabelecem os fundamentos da carstologia.

Atualmente, a carstologia avançou significativamente, integrando a compreensão dos ambientes cársticos, sua fragilidade e importância para o desenvolvimento humano. Estima-se que áreas cársticas representem entre 10% e 15% da superfície terrestre, englobando tanto rochas aflorantes quanto em subsuperfície (Ford & Williams, 2007).

Essas regiões, sobretudo as carbonáticas, possuem grande relevância econômica e hidrogeológica, pois frequentemente apresentam solos agricultáveis, reservas subterrâneas de água e importância ambiental, marcada pelas feições geomorfológicas resultantes da dissolução, como dolinas, sumidouros e lagoas.

O carste e seus territórios são amplamente estudados em escala global, e os conceitos do “carste clássico” continuam sendo referência, com características semelhantes observadas em diferentes continentes, especialmente na Europa, Ásia, América do Norte, América Central e Caribe, e em menor proporção na América do Sul, Austrália e África (Ford & Williams, 2007; Van Beynen, 2011).

Em âmbito nacional, diversos pesquisadores têm se dedicado ao estudo dos carstes brasileiros, entre eles Wernick, Pastore & Pires Neto (1973), Troppmair & Tavares (1984), Monteiro & Ribeiro (2001), Berbert-Born (2002), Auler (1994), Willems *et al.* (2008), Hardt (2009), Morais (2009), entre outros, com destaque para a intensificação das pesquisas a partir dos anos 2000. Especificamente na região cárstica de Lagoa Santa, trabalhos relevantes foram realizados por Silva (2003), Pessoa (2005), Batista (2009), Carneiro (2013), Galvão (2015), Velásquez *et al.* (2018) e De Paula (2019).

O sistema cárstico é complexo, resultado da integração entre os sistemas hidrogeológicos e geoquímicos. A carstificação decorre de processos de dissolução química ou da ação mecânica da água sobre rochas carbonáticas (Karamouz, Ahmadi & Akhbari, 2011). A interação química entre a água e as rochas ocorre pela presença de gás carbônico dissolvido, que confere caráter ácido à água. Ao entrar em contato com rochas carbonáticas, esse processo promove sua dissolução.

A concentração de CO_2 na água, principal agente da carstificação, depende de fatores como temperatura, pressão parcial de CO_2 atmosférico e condições climáticas. Além disso, o contato da água com solos ricos em matéria orgânica intensifica a acidificação e, consequentemente, os processos de dissolução.

A água das precipitações retém CO_2 da atmosfera ou proveniente da decomposição orgânica, reagindo com o calcário e formando bicarbonato de cálcio solúvel em água. Esse processo pode ser representado pelas reações apresentadas na Equação (1) e (2) (Goldscheider & Drew, 2007):

$$H^+ + HCO_{3-} = H_2CO_3 = H_2O + CO_2 \qquad \text{Equação (1)}$$

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 = Ca(HCO_3)_2 = H_2O + Ca^{2+} + 2HCO_{3-} \qquad \text{Equação (2)}$$

Apenas a solubilidade da rocha não é suficiente para o desenvolvimento do carste; fatores como litologia e estruturas geológicas desempenham papel essencial. Rochas carbonáticas mais puras e intensamente fraturadas favorecem a evolução do carste, já que a carstificação resulta da combinação entre alta solubilidade e presença de porosidade secundária bem desenvolvida (White, 2003; Ford & Williams, 2007).

O processo químico ocorre no interior dos maciços carbonáticos, principalmente ao longo de planos de estratificação, contatos rochosos e descontinuidades, dissolvendo e ampliando gradualmente as fendas. Esse mecanismo gera as drenagens subterrâneas e as típicas morfologias cársticas. É importante considerar que a circulação da água se dá preferencialmente pelas superfícies de fraturas e acamamentos, muitas vezes sem direções fixas, o que confere aos aquíferos cársticos elevada anisotropia e heterogeneidade (Legrand & Lamoreaux, 1975; Ford & Williams, 1989).

A orientação e extensão dos fluxos subterrâneos nesses aquíferos podem variar ao longo do tempo, já que os espaços podem colapsar ou ser preenchidos por sedimentos. Além disso, as variações no nível da água podem deixar condutos e fraturas ora saturados, ora insaturados (Ford & Williams, 2007). White (2002) descreve esses sistemas como dotados de tripla permeabilidade, operando em diferentes escalas:

- Permeabilidade da matriz da rocha sã, variável conforme o tipo de calcário ou dolomito, podendo ser insignificante em alguns casos ou elevada em calcários mesozoicos, como os da Flórida e do Caribe.

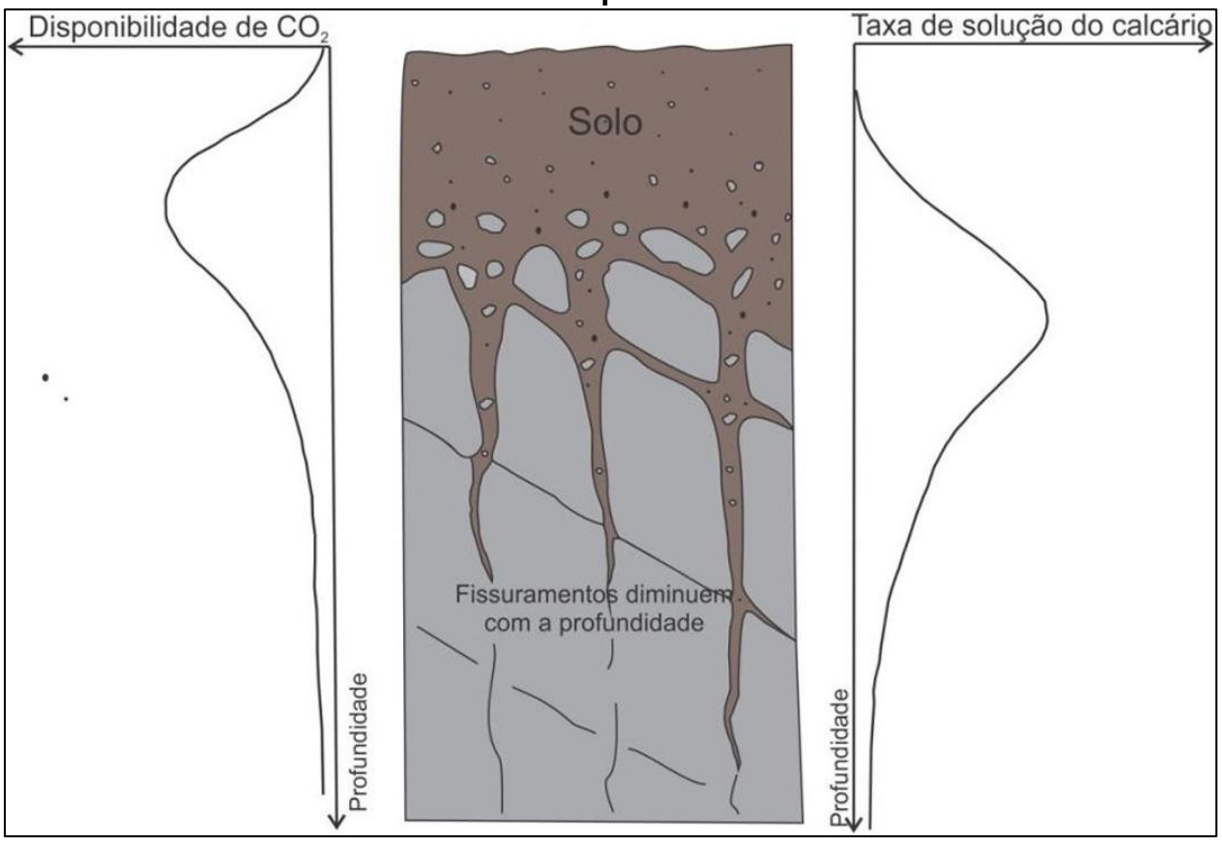
- Permeabilidade das fraturas, dependente da abertura e espaçamento, fortemente influenciados pela dissolução. As aberturas podem variar de micrômetros a poucos milímetros.

- Permeabilidade dos condutos, que pode atingir dimensões de 10 mm até centenas de metros, constituindo os principais canais de fluxo subterrâneo (White, 2002; 2003).

Assim, a carstificação ocorre conforme a dissolução das rochas e o avanço ao longo das rotas de permeabilidade disponíveis. O alargamento das fraturas pode ser mais intenso dependendo de fatores como gradiente hidráulico, distância de circulação e dimensões iniciais das aberturas (Pessoa, 2005).

Apesar disso, a tendência é que o desenvolvimento da carstificação diminua em profundidade, devido à menor disponibilidade de CO_2 e à redução das descontinuidades (Milanović, 2004). Esse comportamento é ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, que mostra como a evolução do carste está condicionada à interação entre fatores químicos e estruturais, variando conforme a profundidade.

Figura 1 — Relação entre disponibilidade de CO2 e processos de dissolução na zona epicárstica.



Fonte: Williams (1983) apud Pessoa (2005).

2.2 Hidrogeologia do Carste

Diversos autores, como Ford & Williams (1989), Piló (2000) e Jones *et al.* (2003), propuseram a compartimentação geomorfológica do carste em três domínios principais: exocarste (superfície), epicarste (subsuperfície) e endocarste (meio subterrâneo).

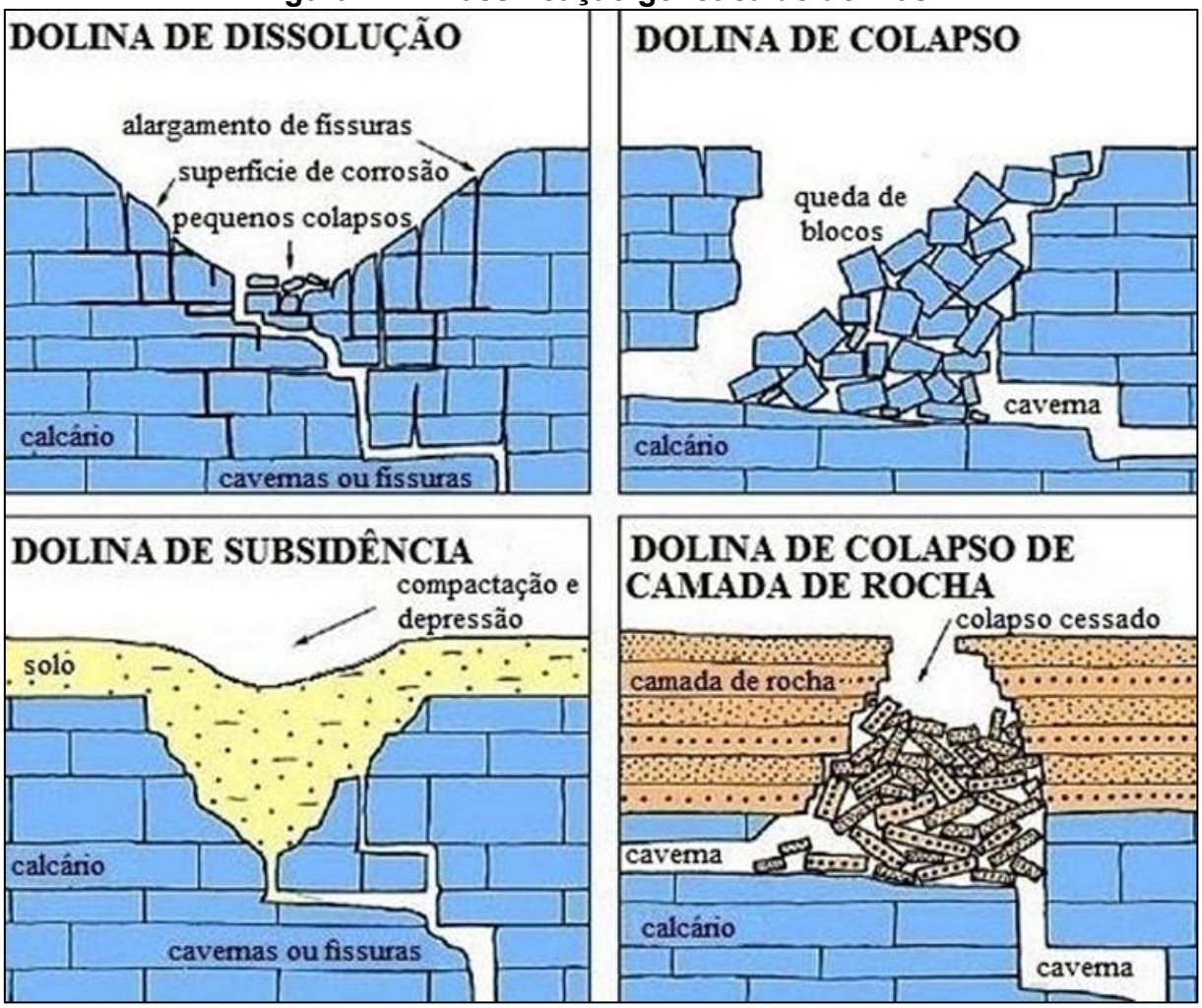
O exocarste corresponde ao domínio mais exposto, reunindo feições morfológicas que variam conforme os fatores que modelam o relevo (Guareschi, 2012). Segundo Goldscheider & Drew (2007), esse domínio inclui formas frequentemente representadas em mapas geomorfológicos, ainda que muitas delas sejam expressões superficiais de processos ligados ao epicarste e ao endocarste.

De acordo com Bogli (1980), as feições mais comuns do relevo cárstico se originam no exocarste e no endocarste, estando próximas à superfície. No exocarste predominam as formas negativas (poljés, uvalas e dolinas) e as formas positivas (maciços, torres e verrugas). Já no endocarste, destacam-se os condutos e cavernas,

frequentemente ornamentados por espeleotemas como colunas, cortinas, estalactites e estalagmites.

Entre essas feições, as dolinas são particularmente recorrentes. Trata-se de depressões circulares fechadas, cuja gênese está geralmente associada à dissolução das rochas por infiltração de água através de fraturas, juntas e planos de acamamento. Contudo, podem evoluir também por processos mecânicos, como nas dolinas de abatimento, ou por colapso e subsidência relacionados ao carste subjacente, como mostra o esquema da Figura 2 (Piló, 2000; Silva, 2008).

Figura 2 — Classificação genética de dolinas.



Fonte: Adaptado de Waltham & Fookes (2003).

Segundo Piló (2000), três pré-requisitos básicos são necessários para a formação dessas feições: Passagem para o fluxo de água; Zona de rocha solubilizada em subsuperfície; Cobertura de solo ou outro material sobre a superfície.

Essas feições possuem grande relevância para a compreensão dos processos de recarga dos aquíferos cársticos, já que funcionam como pontos preferenciais de infiltração (Galvão, 2015).

Comumente, quando um conjunto de depressões de dissolução se conecta durante seu crescimento, forma-se o que se denomina uvalas ou dolinas compostas (White, 2003). A evolução das dolinas para uvalas resulta de um processo superficial mais rápido do que em profundidade, sendo que sua linha de união geralmente acompanha a direção das fraturas das rochas e o fluxo preferencial da água (Silva, 2008).

As largas depressões fechadas, de fundo plano preenchido por sedimentos e bordas elevadas, com carstificação avançada, são chamadas de poljés (Monroe, 1970; Piló, 2000; Field, 2002). Podem ser secos, intermitentes ou permanentemente inundados. Segundo Piló (2000), sua evolução está ligada à dissolução das bordas e à inibição do rebaixamento do relevo, causada pela impermeabilização do fundo por sedimentos argilosos ou pela proximidade ao nível de base. Outras formas comuns de absorção fechada incluem vales cegos, zonas de perdas e vales mortos, que correspondem a vales epigenéticos desativados pela carstificação em profundidade. Em alguns casos, podem ser intermitentes durante períodos de chuvas intensas (Silva, 2008).

As formas de absorção abertas no carste são os sumidouros e as cavernas. Os sumidouros funcionam como pontos de infiltração preferencial das águas superficiais, geralmente associados a outras feições cársticas (Ford & Williams, 2007; Silva, 2008). Podem ser:

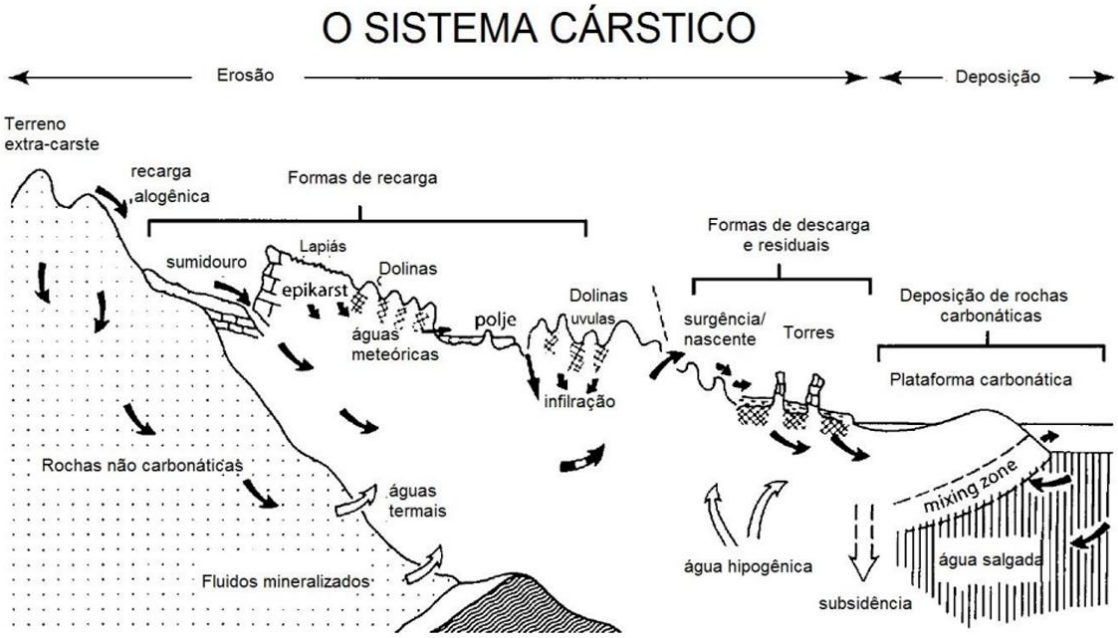
- Permanentes, absorvendo vazões de corpos hídricos;
- Acidentais, atuando apenas em enchentes;
- Intermitentes, captando águas apenas em épocas chuvosas (Goldscheider & Drew, 2007).

As cavernas, por sua vez, são aberturas naturais suficientemente amplas para permitir a entrada de pessoas (Milanović, 2004). Muitas vezes conectadas a outras feições cársticas, podem funcionar como condutos de fluxo hídrico (Silva, 2008). Milanović (2004) descreve as cavernas como canais horizontais ou levemente inclinados,

ligados à superfície por uma ou mais aberturas, desenvolvidos ao longo de falhas, fraturas e juntas pré-existentes.

Outro elemento típico do exocarste são os lapiás, formas côncavas de dissolução que podem ser classificadas conforme tamanho, forma ou gênese. Quando concentrados em grandes áreas, formam os chamados campos de lapiás, indicativos de intenso desenvolvimento do epicarste, embora este também possa ocorrer sem a presença dessas feições (Goldscheider & Drew, 2007; Feitosa *et al.,* 2008). A Figura 3 apresenta algumas das formações citadas.

Figura 3 — Representação de diversas feições comuns em ambientes cársticos.



Fonte: Ford & William (2007).

O epicarste, também chamado de zona subcutânea (Ford & Williams, 2007), corresponde à interface entre rocha e solo. Apresenta uma trama de fissuras originadas por processos cársticos e espessura variável de decímetros a dezenas de metros. Sua permeabilidade é maior e melhor distribuída em comparação às rochas subjacentes, desempenhando papel essencial em S de água e na concentração de fluxo (Goldscheider & Drew, 2007). Piló (2000) destaca a importância do manto de alteração e dos solos nesse domínio, pois influenciam diretamente a circulação hídrica e o desenvolvimento do exocarste e do endocarste, funcionando como elo entre ambos.

O endocarste representa o domínio subterrâneo, caracterizado por condutos e depósitos químicos, clásticos e orgânicos (Piló, 2000). Sua gênese depende das estruturas da rocha e da relação entre áreas de recarga e descarga hídrica. Pode ser subdividido em:

- Hipercarste, formado pela dissolução a partir de águas meteóricas;
- Hipocarste, associado à dissolução por águas conatas (juvenis) (Ford & Williams, 2007; Goldscheider & Drew, 2007).

Em síntese, as feições cársticas assumem diferentes formas e funções conforme o domínio em que se encontram e o estágio de evolução, refletindo o resultado da percolação da água sobre rochas carbonáticas e da contínua modelagem do relevo.

2.3 Parâmetros hidrodinâmicos no Carste

Os aquíferos cársticos apresentam características singulares que os diferenciam de sistemas formados em outros tipos de rochas. Em geral, são marcados por grande variabilidade de parâmetros hidráulicos, como permeabilidade, T e S, e anomalias na direção de fluxo em relação ao nível de base regional (Custódio & Lhamas, 1983; Milanović, 2004; Manoel Filho, 2008).

Devido à dissolução aleatória ao longo de fraturas e descontinuidades, somada à variabilidade geomorfológica e hidrogeológica, o entendimento do sistema hidráulico cárstico é complexo, e a extrapolação de resultados entre diferentes regiões do mundo torna-se limitada (Silva, 2008).

Embora, em termos práticos, T seja o produto de K pela espessura saturada do aquífero, essa relação não é simples em sistemas cársticos. Isso porque as propriedades transmissivas dos condutos são muito superiores às da matriz rochosa. Goldscheider & Drew (2007) ressaltam que, nesses casos, K não possui significado físico real, funcionando apenas como constante de proporcionalidade da Lei de Darcy.

A elevada anisotropia e heterogeneidade dos aquíferos cársticos faz com que a velocidade das águas subterrâneas varie em várias ordens de magnitude (Ford & Williams, 2007; Goldscheider & Drew, 2007). Um método amplamente utilizado para determinar velocidade aparente, direção e comportamento do fluxo, além de delimitar

zonas de contribuição e conexões entre sumidouros e surgências, é o uso de traçadores corantes (Pessoa, 2005; Goldscheider & Drew, 2007; Galvão, 2015).

Essa heterogeneidade explica por que poços altamente produtivos podem coexistir próximos a poços praticamente secos, tornando difícil prever a produtividade. A presença de fraturas verticais concentradas aumenta a dissolução das rochas carbonáticas e, consequentemente, a produtividade dos poços e os valores de K (Manoel Filho, 2008). Além disso, poços localizados em fundos de vale ou em topos de colinas tendem a apresentar melhores resultados, devido à maior abundância de fraturas e dissoluções, em comparação às encostas (Davis & De Wiest, 1966).

Segundo Ford & Williams (2007), a posição vertical das nascentes controla a elevação do nível freático no ponto de descarga, enquanto K e a vazão determinam a inclinação do nível freático a montante e sua variação em diferentes condições. Por isso, as nascentes são locais ideais para medir vazões, analisar aspectos hidroquímicos e monitorar contaminantes (White, 2002; 2003).

A permeabilidade é geralmente estimada a partir de K, obtida por ensaios laboratoriais em núcleos rochosos ou por bombeamentos em poços e piezômetros. Como essas medidas refletem apenas as condições locais, múltiplas amostragens são necessárias para representar o aquífero como um todo (White, 2002; Pessoa, 2005).

Os testes de bombeamento representam uma das principais ferramentas para determinação desses parâmetros, consistindo na aplicação controlada de perturbações hidráulicas em poços e na observação da resposta do sistema subterrâneo ao longo do tempo. Em sua forma mais comum, o procedimento envolve a extração de água por bombeamento contínuo, acompanhada do monitoramento do rebaixamento do nível d'água durante a fase de bombeamento e de sua recuperação após a interrupção da extração (Kruseman & De Ridder, 1994).

A interpretação dos testes baseia-se na teoria do fluxo subterrâneo transiente, desenvolvida inicialmente por Theis (1935), que descreveu matematicamente o comportamento do rebaixamento em aquíferos confinados homogêneos, isotrópicos e de extensão infinita. A partir dessa solução clássica, diversos métodos analíticos foram desenvolvidos para considerar condições mais complexas, incluindo aquíferos

fissurados, sistemas de dupla porosidade e meios cársticos (Moench, 1984; Barker, 1988; Thrailkill, 1988).

Podem ser divididos, de maneira geral, em testes de aquífero e teste de produção. Os testes de aquífero visam determinas parâmetros hidrodinâmicos do meio, como T, S e K. Sua execução consiste, basicamente, no bombeamento do poço, com vazão constante (Q) e o acompanhamento da evolução dos rebaixamentos produzidos em um, ou mais, poço (s) de observação, situado (s) a uma distância r qualquer do poço bombeado. Por outro lado, os testes de produção tendem a determinar a vazão de explotação, sendo possível registrar as perdas de cargas totais e a evolução dos rebaixamentos e recuperação no próprio poço bombeado (Feitosa *et. al.,* 2008).

2.4 Evolução do conhecimento na Área

A região de Lagoa Santa é reconhecida como um dos principais cenários de estudos cársticos no Brasil. Entre os trabalhos mais relevantes com enfoque hidrogeológico e geológico, destacam-se os de Silva *et al.* (1987), Kohler (1989), Auler (1994), Berbert-Born (1998), Pessoa (2005), Galvão (2015) e De Paula (2019), além dos projetos conduzidos pela CPRM — Projeto APA Carste Lagoa Santa (CPRM/IBAMA, 1998), Projeto Vida (Ribeiro *et. al.,* 2003) e Projeto Sete Lagoas–Abaeté (Tuller *et. al.,* 2010) — e das pesquisas vinculadas ao Projeto PAN Cavernas São Francisco (Velásquez *et al.,* 2018).

Os estudos variam em abrangência e temática, sendo que poucos contemplam toda a extensão da APA Carste de Lagoa Santa. Com foco na dinâmica dos recursos hídricos, Silva *et al.* (1987) realizaram também o mapeamento geológico da região, além de análises morfológicas e estruturais fundamentais para a compreensão da hidrogeologia local. Esses autores identificaram oito domínios fisiográficos, posteriormente sintetizados em seis por Auler (1994), e definiram domínios hidrogeológicos, com zonas de recarga nos calcários da Formação Sete Lagoas e nos mantos de alteração dos Planaltos Cársticos, e zonas de descarga nos cursos d’água e na Depressão Mocambeiro.

Posteriormente, os projetos APA Carste Lagoa Santa e Vida, realizados pela CPRM, mapearam toda a região em escala 1:50.000, trabalho atualizado por Velásquez *et al.* (2018). As alterações recentes incluíram a redefinição dos limites da Formação Serra

de Santa Helena nas porções norte, nordeste e noroeste, além da inclusão de contatos por falhas de empurrão entre os membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, ambos pertencentes à Formação Sete Lagoas.

No que se refere à evolução do carste, Auler (1994) descreveu a região de Matozinhos–Pedro Leopoldo como um carste maduro, caracterizado por feições típicas e fluxo subterrâneo bem desenvolvido (De Paula & Velásquez, 2020). Berbert-Born (1998), apoiando-se nos trabalhos de Kohler (1989), abordou a história paleoclimática da região: inicialmente, a carstificação teria começado após a dissecação dos solos lateríticos terciários sob alternância de climas frio/seco e quente/úmido; em seguida, com o início da dissolução dos carbonatos, cujo ápice ocorreu em clima quente e úmido no Pleistoceno Superior; e, por fim, em período frio e seco, marcado por sedimentação química, precipitações secundárias e formação de crostas de calcita e espeleotemas. Novos episódios de aumento de temperatura e umidade teriam favorecido a retomada da carstificação e o retrabalhamento das feições primárias e secundárias.

Em estudo morfométrico mais recente, Velásquez *et al.* (2018) dividiram a região em depressões cársticas e maciços rochosos, reforçando a complexidade geomorfológica da APA Carste de Lagoa Santa.

As mudanças climáticas do final do Proterozoico e os diferentes eventos de glaciação, registrados nos carbonatos da Formação Sete Lagoas, foram analisados por Vieira (2007) em estudos detalhados de sedimentologia, estratigrafia, geoquímica, geocronologia, isótopos estáveis e paleomagnetismo. Sua pesquisa trouxe contribuições importantes para a descrição das fácies e para o modelo de sedimentação das rochas carbonáticas da formação em toda a região do Carste de Lagoa Santa. Vieira (2007) propôs uma transição de ambientes de águas rasas a oeste para águas mais profundas a leste, a partir da distribuição estratigráfica das fácies, auxiliando na caracterização dos calcários dos membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa.

No campo dos solos da APA Carste de Lagoa Santa, os principais estudos foram realizados por Shinzato (1998) e Viana *et al.* (1998). Shinzato analisou perfis de solos em diferentes posições do relevo, incluindo dolinas e áreas rebaixadas, considerando aspectos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos. Os solos profundos,

granulares e finos característicos da região têm origem principalmente nas rochas pelíticas da Formação Serra de Santa Helena, com pouca contribuição dos calcários.

A caracterização hidrogeológica e o desenvolvimento de modelos conceituais de fluxo subterrâneo foram abordados por diversos autores, geralmente em áreas restritas. Auler (1994) concentrou seus estudos em Pedro Leopoldo e Matozinhos; Silva (2003) e Pessoa (2005) em Lagoa Santa; enquanto Batista (2009), Machado (2011), Carneiro (2013) e Galvão (2015) focaram em Sete Lagoas.

O trabalho de Auler (1994) é considerado um dos mais relevantes sobre o fluxo subterrâneo da APA Carste, fundamentado na aplicação de traçadores artificiais (branqueador óptico e fluoresceína) nas bacias do Samambaia e do Palmeiras-Mocambo. Foram identificadas três direções principais de fluxo: NW-SE, W-E e SW-NE. Auler concluiu que a recarga do carste é essencialmente autogênica, com pouca contribuição dos pelitos, e que o Rio das Velhas recebe a maior parte da descarga subterrânea.

Berbert-Born (1998) descreveu a “bacia cárstica de Matozinhos–Pedro Leopoldo” como uma região de rochas altamente solúveis, com drenagem predominantemente subterrânea e grande complexidade hidrográfica. A autora também destacou o elevado número de lagoas, intermitentes ou não, regidas por uma dinâmica hídrica complexa.

Kohler (1978) identificou que a Lagoa Central de Lagoa Santa se encontra em estado de equilíbrio, formada pela dissolução do pacote calcário sotoposto ao filito. Posteriormente, Auler (1994) classificou três tipos de lagos na área:

- Lagos estáveis sobre o filito;
- Lagos sazonais (sumidouros) em áreas mais altas e na base de dolinas;
- Lagos de lençol freático, situados sobre o carbonato em elevações mais baixas.

Nesse contexto, Berbert-Born (1998) estudou sedimentos em lagoas da região entre Sete Lagoas e Lagoa Santa, identificando indícios de modificações recentes no sistema cárstico. Entre as lagoas analisadas, destacam-se Santo Antônio, Sumidouro e Confins, todas em domínios cársticos.

Em Lagoa Santa, próximo à Mina Lapa Vermelha, Pessoa (2005) verificou a presença de um aquífero cárstico extremamente ativo sob o manto de intemperismo, controlado pela distribuição de calcários puros do Membro Lagoa Santa. O autor ressaltou que a carstificação está condicionada estruturalmente a planos de intersecção entre contatos interestratais (direção N-S), juntas e foliações tectônicas. A aplicação do traçador Rodamina WT permitiu identificar derivações nas rotas de fluxo subterrâneo entre zonas de recarga e descarga.

Em Sete Lagoas, Batista (2009) e Galvão (2015) propuseram modelos conceituais do aquífero cárstico. Batista concluiu que o fluxo subterrâneo é mais intenso próximo ao contato com formações menos permeáveis, favorecendo maior produtividade dos poços. Também observou que as lagoas da região, embora recebam alguma contribuição dos aquíferos profundos, são mais influenciadas pelo escoamento superficial, funcionando como reservatórios naturais.

Galvão (2015), por sua vez, apontou as dolinas, entradas de cavidades e o manto de intemperismo como principais zonas de recarga, e destacou os planos de acamamento alargados pela dissolução como as principais rotas de fluxo. Embora menos comuns, as fraturas verticais também foram consideradas vias de circulação. A análise hidroquímica revelou a presença de águas mistas, sugerindo interconexão entre o aquífero cárstico e o embasamento.

Na região de Sete Lagoas, Carneiro (2013) desenvolveu um modelo hidrogeoquímico que descreve a evolução da água subterrânea desde a zona de recarga até a zona de descarga. O estudo identificou um aumento gradual nos parâmetros de condutividade elétrica, pH e alcalinidade, acompanhado de maiores concentrações de cálcio, magnésio e sílica.

Dentro dos limites da APA Carste de Lagoa Santa, destacam-se os trabalhos de Amaral (2018), voltados ao estudo do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas, e de De Paula (2019), que elaborou um modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região. De Paula (2019) identificou a continuidade do fluxo subterrâneo no sentido oeste-leste, especialmente nas imediações da bacia do córrego Palmeira. Além disso, ressaltou o elevado grau de antropização na área, observando que a retirada de água por poços tubulares,

somada à explotação em córregos, é responsável por consumir praticamente toda a recarga pluvial disponível para o sistema aquífero.

Nos últimos anos, diversos trabalhos foram realizados no âmbito do Projeto PAN Cavernas São Francisco (Velásquez *et al.,* 2018), abrangendo toda a extensão da APA Carste de Lagoa Santa. Ribeiro *et al.* (2019) caracterizaram planos de acamamento, fraturas e paleocondutos, relacionando-os às direções de fluxo já identificadas em estudos anteriores. A concordância entre as direções de fluxo E-W, NE-SW e NW-SE, obtidas por traçadores, e as direções preferenciais das fraturas e paleocondutos, demonstra que o acamamento, aliado às fraturas E-W de alto ângulo, constitui as principais estruturas que orientam o fluxo regional em direção ao nível de base.

Ainda dentro do projeto, Amaral, Velásquez & Rodrigues (2019) analisaram o comportamento hídrico das depressões cársticas da APA Carste, considerando aspectos morfoestruturais, morfométricos e feições residuais. Os autores concluíram que depressões sempre secas ou que se esgotam totalmente ao final da estiagem — especialmente em anos hidrológicos normais — possuem elevado potencial para promover a recarga aquífera.

A análise hidroquímica realizada por Vieira (2018) mostrou que as nascentes associadas aos calcários puros do Membro Lagoa Santa apresentam maiores vazões em comparação às do Membro Pedro Leopoldo, devido à maior propensão à dissolução. No entanto, os poços localizados sobre as rochas do Membro Pedro Leopoldo exibem maior capacidade específica e vazão, resultado do forte controle estrutural. Vieira atribuiu essa alta produtividade à proximidade de zonas de falha de direção NW-SE, que favorecem a circulação e exploração da água subterrânea.

Além dos trabalhos já discutidos, a região da APA Carste de Lagoa Santa tem recebido uma série de pesquisas recentes com diferentes enfoques hidrogeológicos. Entre elas, destacam-se Tayer & Velásquez (2017), Aragão *et. al.* (2020) e Silva (2022), que investigaram a vulnerabilidade intrínseca do carste de Lagoa Santa. De Paula & Velásquez (2019) e Teixeira *et al.* (2023), com foco no balanço hídrico e nas recargas dos aquíferos. Teodoro *et al.* (2019), que aplicaram traçadores corantes para compreender o fluxo subterrâneo. Ribeiro *et al.* (2019), Dantas *et al.* (2023) e Neto *et al.* (2023b), que analisaram os fluxos e conexões dentro dos aquíferos da APA e

regiões vizinhas. Ribeiro, Velásquez & Fleming (2020), voltados à análise de isótopos no carste de Lagoa Santa. Vieira, Dussin & Velásquez (2018) e Barbosa *et. al* (2024) realizaram caracterizações geoquímicas das rochas e aquíferos locais. De Paula *et al.* (2020) e Pena *et al.* (2024), que levantaram os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos da região. De Paula (2019) e Dantas *et al.* (2024), que realizaram modelagem hidrogeológica dos sistemas aquíferos locais.

Esse conjunto de pesquisas evidencia a diversidade de abordagens aplicadas ao estudo da hidrogeologia cárstica em Lagoa Santa, desde análises de vulnerabilidade e recarga até modelagens complexas de fluxo e caracterizações geoquímicas.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização

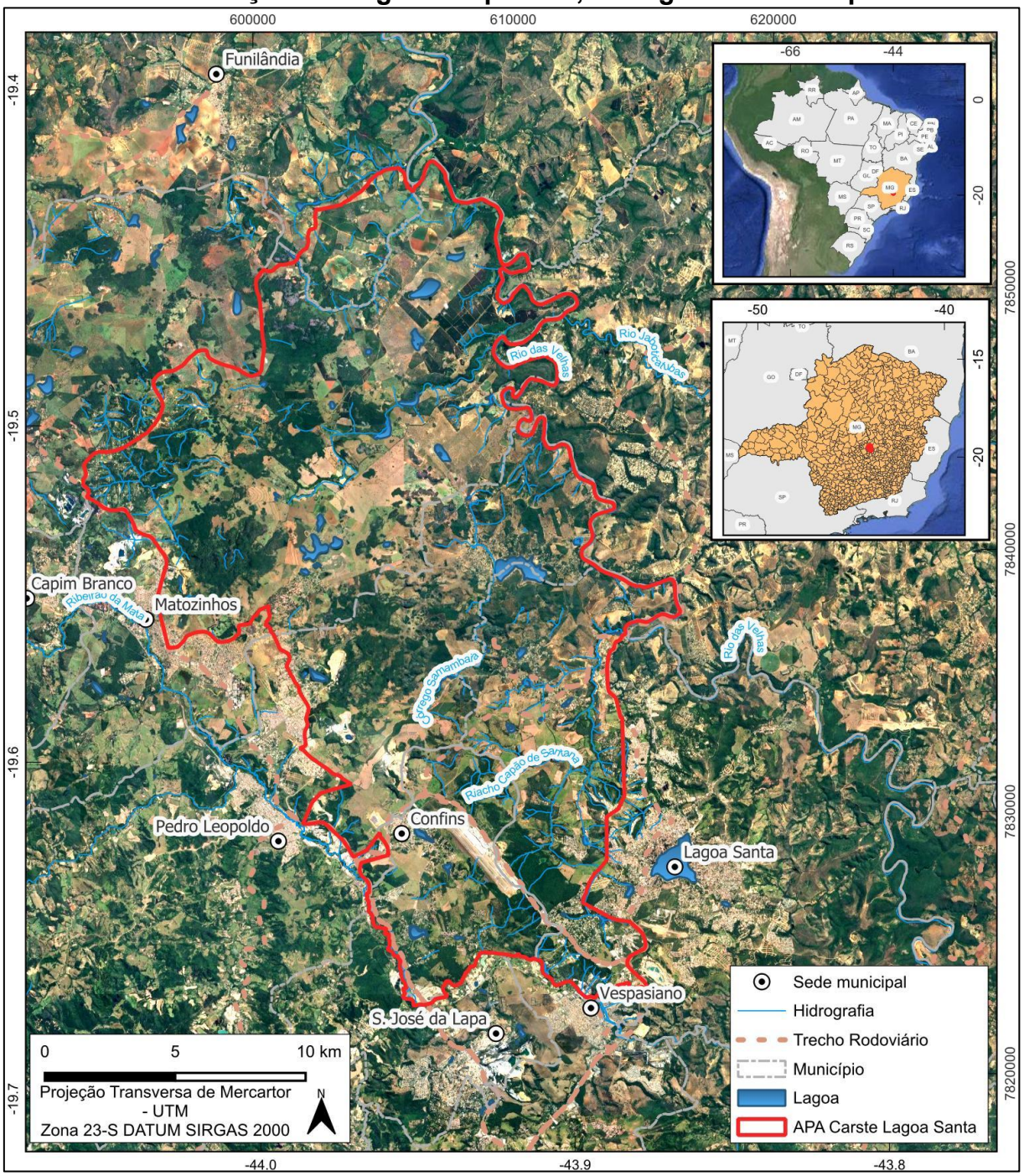
A APA Carste de Lagoa Santa, criada em 1990 com vistas a proteger o frágil ecossistema cárstico local, de relevância nacional, localiza-se na porção central de Minas Gerais, a aproximadamente 35 km de Belo Horizonte, abrangendo integral ou parcialmente os municípios Lagoa Santa, Pedro Leopoldo, Confins, Matozinhos e Funilândia (Figura 4).

Com cerca de 360 km², a unidade de conservação é delimitada principalmente pelas rodovias MG-010 (ao sul) e MG-424 (a oeste), além das principais drenagens regionais: o Rio das Velhas (a leste) e o Ribeirão da Mata (ao sul). O acesso principal à região, partindo de Belo Horizonte, ocorre pela rodovia MG-010 em direção à Lagoa Santa. Na altura de Vespasiano, a MG-010 se bifurca e dá origem à MG-424, que segue em direção a Pedro Leopoldo, funcionando como rota alternativa.

A área em estudo corresponde à chamada “região cárstica de Lagoa Santa”, definida por Kohler *et al.* (1978), e constitui um ambiente amplamente investigado desde o século XIX, despertando interesse científico em diversos campos, como a paleontologia, arqueologia e geomorfologia (Pessoa, 2005). Do ponto de vista geológico, insere-se no contexto do Cráton São Francisco (CSF), caracterizado pelas bacias sedimentares carbonáticas do Grupo Bambuí. Já no âmbito hidrológico, integra a Bacia do São Francisco, mais especificamente a sub-bacia do Rio das Velhas.

Além de sua relevância científica e ambiental, a região é marcada por atividades agropecuárias e pela presença de condomínios residenciais. Em sua porção sul, no município de Confins, encontra-se o Aeroporto Internacional Tancredo Neves, e a área também é atendida pela Rede Ferroviária Federal S.A.

Figura 4 — Localização da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, com indicação das lagoas mapeadas, hidrografia e municípios.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 Clima

O clima da APA Carste de Lagoa Santa, típico das regiões tropicais brasileiras, encontra-se sob influência direta do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), centro bárico de alta pressão que transporta umidade proveniente do Oceano Atlântico (Viana *et al.,* 1998; Meneses, 2003). Esse sistema estacionário, em razão da intensa radiação solar incidente, apresenta elevados índices de umidade absoluta e

temperaturas internas altas. Entretanto, predominam condições de estabilidade atmosférica, resultado das correntes verticais descendentes que reduzem a instabilidade (Viana *et al.,* 1998).

As classificações climáticas, derivadas da interação entre variáveis climatológicas e fatores ambientais como vegetação, solo e precipitação, são diversas. De acordo com a classificação de Köppen e Geiger (1928), fundamentada na precipitação e na temperatura média do ar, a região enquadra-se em uma zona de climas megatérmicos, descrita pela sigla Aw, caracterizada por duas estações bem definidas: verão quente e úmido e inverno frio e seco, com temperaturas médias superiores a 18 °C (Viana *et al.,* 1998; IEF, 2010). Já segundo a classificação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a área insere-se no tipo climático Tropical Brasil Central subquente a semiúmido, com período seco de quatro meses, entre maio e agosto (Nimer, 1989).

Rodrigues (2023) destaca que as taxas de insolação são diretamente influenciadas pela precipitação, variando conforme a presença de nuvens. Apesar dos dias mais curtos no inverno, a insolação diária é maior devido à baixa precipitação e ao “céu limpo”. A evapotranspiração, por sua vez, está diretamente correlacionada à insolação e ao regime de chuvas. Entre abril e outubro, a evapotranspiração supera a precipitação, gerando um cenário de déficit hídrico.

O balanço hídrico regional evidencia déficit entre abril e setembro, com valores máximos de 42 mm em agosto (De Paula & Velásquez, 2019). O excedente hídrico ocorre entre novembro e março, com pico de 183 mm em janeiro. A estação chuvosa é bem marcada, estendendo-se de outubro a março, enquanto os meses de setembro e abril funcionam como períodos de transição entre os regimes seco e úmido.

De acordo com os dados históricos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), registrados pelas estações convencionais de Sete Lagoas (OMM:8670), Pedro Leopoldo (1944009), Lagoa Santa (1943049) e Vespasiano (19430400), todas próximas à área de influência da APA, a média pluviométrica anual, considerando o período de 1961 a agosto de 2025, é de 1122,3 mm. A temperatura máxima média anual nesse intervalo é de 27,6 ºC, enquanto a mínima corresponde a 16,2 ºC. As amplitudes térmicas anuais são reduzidas, geralmente inferiores a 5 °C (IEF, 2010).

Entretanto, destaca-se o ano de 2014, quando o registro anual de precipitação foi de apenas 551 mm, valor significativamente abaixo da média histórica. Meneses (2003) ressalta que essa variabilidade climática gera consequências diretas para o ambiente cárstico, afetando suas características hídricas, como o fluxo e a composição química da água, além de influenciar o grau e o modo de atuação dos processos morfogenéticos, entre os quais se destaca a dissolução das rochas carbonáticas.

Essa dinâmica climática, portanto, exerce impactos diretos sobre os sistemas cársticos da região, condicionando tanto o fluxo quanto a composição química das águas subterrâneas e influenciando os processos de evolução do relevo, especialmente aqueles relacionados à dissolução das rochas (Meneses, 2003).

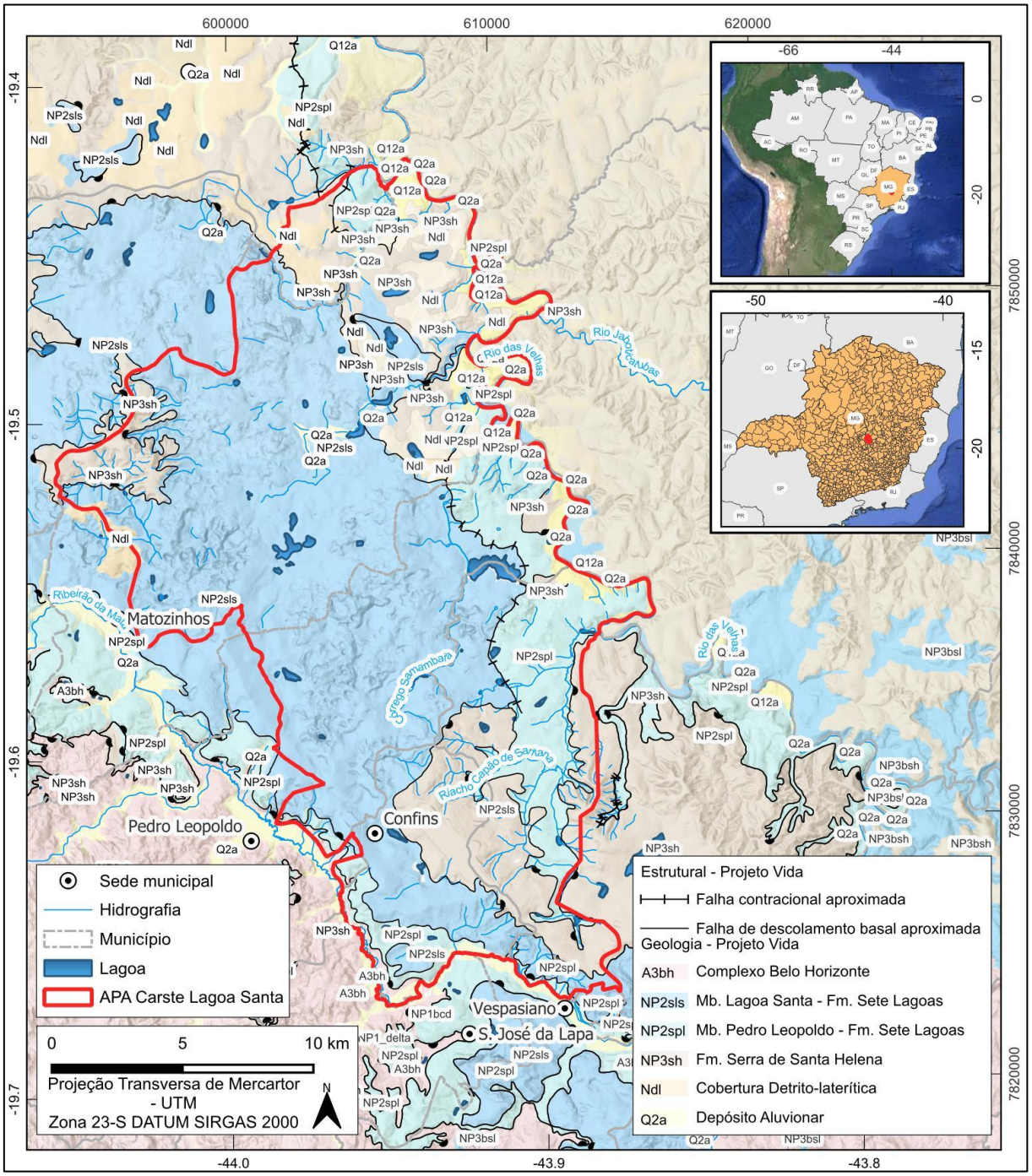
3.3 Geologia

A área de estudo insere-se no contexto geológico da porção centro-sul do Cráton São Francisco (Almeida, 1977; Dardenne, 1978; Alkmim & Martins Neto, 2001; Alkmim, 2004). O principal trabalho de referência para a caracterização geológica local é o mapeamento geológico do Projeto Vida, realizado pela CPRM na escala de 1:50.000 (Ribeiro *et al.,* 2003), posteriormente complementado pelo mapeamento mais recente do Projeto Sete Lagoas – Abaeté (Tuller *et al.,* 2010). Esses levantamentos descrevem o embasamento gnáissico-migmatítico do Complexo Belo Horizonte, sobreposto por unidades basais neoproterozoicas do Grupo Bambuí, pertencente ao Supergrupo São Francisco, destacando-se as rochas da Formação Sete Lagoas e da Formação Serra de Santa Helena (Figura 5). As demais unidades do Grupo Bambuí não serão descritas neste trabalho, uma vez que não afloram na região de estudo e, portanto, não possuem relevância direta para esta pesquisa.

O embasamento cristalino do Complexo Belo Horizonte aflora principalmente nas porções sul e sudoeste da área de estudo. De acordo com Ribeiro *et al.* (2003), embora apresente grande diversidade litológica, sua composição é essencialmente granito-gnáissica e migmatítica, constituindo o substrato das rochas supracrustais adjacentes, com as quais mantém contato brusco e discordante (Pessoa, 1996; Noce *et. al.,* 1997). Em termos petrográficos, essas rochas possuem coloração clara, granulação média a grossa e exibem minerais estirados e orientados, como biotita e anfibólio, além de estruturas como shear bands e boudins. As idades atribuídas ao Complexo Belo Horizonte variam entre o Arqueano e o Paleoproterozoico, conforme

diferentes autores (Ribeiro *et al.,* 2003; Ribeiro *et al.,* 2016). Essa variação reflete tanto a complexidade geológica da unidade quanto os processos de rejuvenescimento isotópico relacionados a eventos tectonotermais posteriores, como o evento Brasiliano.

Figura 5 — Mapa Geológico da área de estudo, com indicação da hidrografia e estruturas descontínuas.

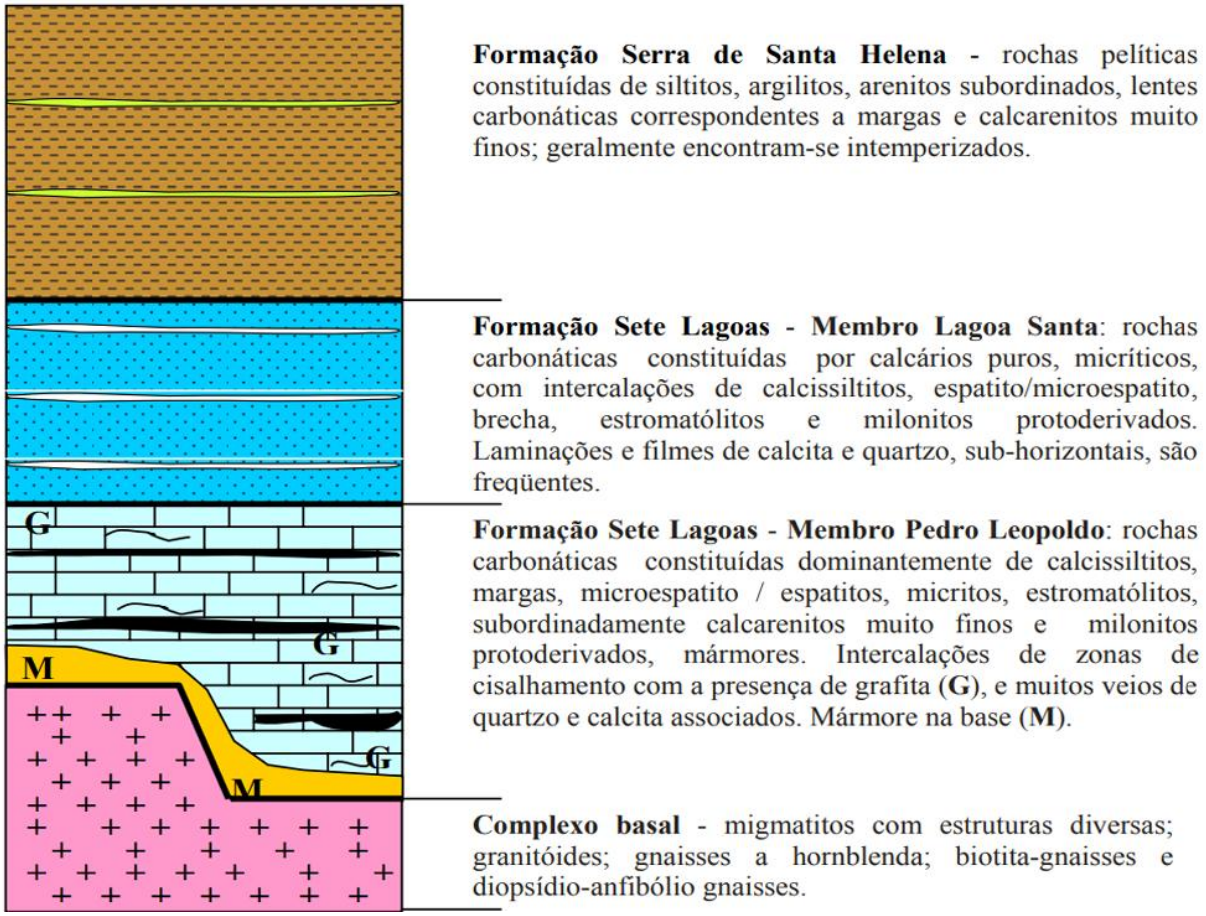


Fonte: Adaptado de “Projeto VIDA” (Cabral, 1994; Ribeiro *et al.,* 2003).

Ribeiro *et al.* (2003), com base nos trabalhos de Magalhães (1988), propõe um modelo de sedimentação composto por três ciclos distintos (Figura 6). O primeiro ciclo é de

caráter transgressivo, representado pelo Membro Pedro Leopoldo. O segundo corresponde a um ciclo regressivo, responsável pela formação do Membro Lagoa Santa. Já o terceiro e mais recente ciclo é novamente transgressivo, associado à deposição da Formação Serra de Santa Helena.

Figura 6 — Perfil esquemático com as principais formações que constituem a geologia regional da área de estudo.



Fonte: Extraído de Pessoa (2005).

O Grupo Bambuí é constituído por unidades litoestratigráficas depositadas sobre o embasamento do cráton até as faixas móveis marginais, funcionando este como base para a deposição de sedimentos pelito-carbonáticos marinhos sobre uma plataforma epicontinental estável. Trata-se de um ambiente continental marcado por sucessivas regressões e transgressões marinhas, com idade mínima relativa de aproximadamente 630 Ma (Neoproterozoico) (Dardenne, 1978; Schobbenhaus *et al.,* 1984; Zalán & Romeiro Silva, 2007).

A Formação Sete Lagoas, de idade Ediacarana (Warren *et al.,* 2014), caracteriza-se regionalmente por uma sequência carbonática composta predominantemente por calcários e, subordinadamente, por dolomitos, descritos conforme suas variações

composicionais em diferentes horizontes. É a unidade de maior representatividade na área de estudo, ocupando cerca de 78% da superfície, especialmente nas porções central, noroeste e sudoeste. Constitui a base do Grupo Bambuí e subdivide-se em dois membros: o Pedro Leopoldo, inferior, e o Lagoa Santa, superior (Viana *et al.,* 1998; Ribeiro *et al.,* 2003; Uhlein *et al.,* 2018).

Em decorrência dos eventos deformacionais que atingiram a região, ambos os membros apresentam rochas intensamente recristalizadas, com estruturas primárias em grande parte obliteradas (Tuller *et al.,* 2010). Conforme descrito por Ribeiro *et. al.* (2016), e posteriormente por De Paula (2019), as fraturas de alto ângulo nos carbonatos funcionam como mecanismo de recarga que direcionam a água meteórica para o meio subterrâneo. Quando estas fraturas interceptam uma estrutura planar sub-horizontal, o processo de dissolução evolui e gera os condutos cársticos com gradiente hidráulico para o rio das Velhas.

O Membro Pedro Leopoldo sobrepõe o Complexo Gnáissico-migmatítico indiferenciado em contato brusco e discordante, por vezes marcado por falhas de descolamento (Ribeiro *et al.,* 2003). Suas exposições ocorrem geralmente em faixas de direção SE-NW, destacando-se entre os municípios de Pedro Leopoldo, Lagoa Santa e Funilândia. Essa unidade ocupa cerca de 11% da área de estudo e possui espessura aproximada de 150 m (Cabral, 1994). Os litotipos que a compõem incluem calcissiltitos, microesparitos, esparitos, micritas, subordinadamente calcarenitos muito finos, margas e milonitos protoderivados (Ribeiro *et al.,* 2003). Segundo Pessoa (2005), trata-se de um calcissiltito, caracterizado como calcário laminado de coloração cinza-claro, com impurezas argilosas e deformação variável entre incipiente e elevada. O mineral predominante é a calcita, enquanto as intercalações pelíticas são formadas por quartzo e sericita, com ocorrência de sulfetos disseminados. As porções mais puras apresentam, frequentemente, aspecto sacaroide.

O Membro Lagoa Santa, por sua vez, sobrepõe o Pedro Leopoldo em contato brusco e constitui a unidade principal da área de estudo, formada por estratos sub-horizontais de rochas calcárias. É a litologia dominante, aflorando em quase 59% da área, exceto nas porções nordeste e leste. Devido à sua composição essencialmente carbonática, seus estratos podem ser observados em afloramentos naturais e em cavas abertas. Ocorre formando morros contínuos de maciços calcários intensamente fraturados,

localizados em colinas suaves e extensas, com feições cársticas desenvolvidas como dolinas e condutos. Sua espessura média é de cerca de 100 m (Cabral, 1994). Os litotipos incluem calcarenitos, espatitos e calcilutitos subordinados (Ribeiro *et al.,* 2003).

Os calcarenitos do Membro Lagoa Santa apresentam coloração cinza-escuro, alternando lâminas claras e camadas escuras, ambas essencialmente calcíticas. Essa alternância está relacionada à quantidade de matéria orgânica presente e à granulometria da calcita. Em geral, os calcários dessa unidade possuem granulação mais grossa que os do Membro Pedro Leopoldo e apresentam sulfetos disseminados. Diferentemente das rochas do membro inferior, as estruturas observadas nos calcários do Lagoa Santa decorrem do estiramento dos cristais de calcita e são menos evidentes. Entre as estruturas identificáveis estão foliação subparalela ao acamamento, lineação de estiramento com direção aproximada E-W, milonitização e dobras isoclinais intrafoliais. São comuns, ainda, veios de calcita com espessuras variando de milímetros a centímetros (De Paula, 2019).

A Formação Serra de Santa Helena, descrita originalmente por Dardenne (1978) na serra homônima, no município de Sete Lagoas, ocorre principalmente nas porções norte e sudeste da área de estudo, estendendo-se até as imediações da cidade de Lagoa Santa e alcançando o Rio das Velhas. Essa unidade ocupa cerca de 11% da área total do projeto.

Segundo Ribeiro *et al.* (2003), a Formação Serra de Santa Helena dispõe-se, em geral, sobre a Formação Sete Lagoas por meio de contato tectônico brusco, embora em alguns locais seus litotipos estejam diretamente assentados sobre o embasamento cristalino. Ainda conforme o autor, trata-se de uma formação composta predominantemente por litotipos siliciclásticos, com ocorrência subordinada de rochas carbonáticas. Os siliciclásticos são representados por siltitos e argilitos, que na maioria dos casos se apresentam decompostos e semi-alterados. Nessas condições, exibem coloração variada, gradando do ocre ao vermelho e do creme ao cinza-claro, além de textura argilosa e elevada friabilidade. Nos casos em que se encontram frescos, geralmente em pedreiras, apresentam coloração verde-escura e, por vezes, clivagem ardosiana. Sua composição essencial é dominada por quartzo e sericita,

com presença subordinada de argila e óxidos de ferro. As rochas exibem laminação, crenulação e frequentes dobras fechadas a abertas (De Paula, 2019).

Do ponto de vista estrutural, as rochas da Formação Serra de Santa Helena apresentam laminação, caracterizada pela intercalação de lâminas espessas de sericita e delgadas de quartzo, além de crenulação e dobras frequentes, variando de fechadas a abertas. Essa formação é interpretada como um ciclo transgressivo sobre as rochas da Formação Sete Lagoas, depositada em ambiente marinho sublitorâneo de baixa energia, com águas profundas e redutoras (Ribeiro *et al.,* 2003). Tanto a Formação Sete Lagoas quanto a Serra de Santa Helena apresentam paragêneses típicas de metamorfismo de baixo grau, em fácies xisto verde (Ribeiro *et al.,* 2003; Tuller *et al.,* 2010).

Além dessas formações, a área é recoberta por coberturas recentes, datadas do Terciário e Quaternário, que se dividem em coberturas detrito-lateríticas e depósitos aluviais (Alkmim & Martins Neto, 2001). As coberturas detrito-lateríticas apresentam exposições expressivas, embora descontínuas, ocupando aproximadamente 0,8% da área total. Manifestam-se em faixas alongadas e irregulares, com espessuras variáveis superiores a 2 m, geralmente em cotas acima de 800 m. Litologicamente, são compostas por cascalho fino, areia, material silto-argiloso e porções limonitizadas, resultantes de processos erosivos atuantes sobre rochas mais antigas (Ribeiro *et al.,* 2003).

Os depósitos aluvionares são bastante presentes na área de estudo e foram subdivididos em aluviões recentes e terraços aluviais, ocupando cerca de 5% da área. De acordo com Ribeiro *et al.* (2003), os depósitos mais recentes estão associados às drenagens atuais, enquanto os mais antigos apresentam níveis distintos, situando-se abaixo dos depósitos recentes e em cotas topograficamente mais elevadas. Esses depósitos são comumente encontrados nos arredores do Rio das Velhas e possuem composição variada, incluindo cascalhos, areias, argilas e siltes.

3.4 Geomorfologia e Solos

O sistema cárstico da região de estudo desenvolve-se sobre os calcários cristalinos da Formação Sete Lagoas, cuja elevada pureza e baixo teor de magnésio favorecem os processos de dissolução (Auler, 1994). Estudos realizados por Pessoa (2005), em

sondagens próximas à Lagoa Santa, demonstraram que a maior parte das cavidades ocorre em calcários calcíticos (51,5%), seguidos por calcários cálcio-filíticos (35,5%), xistos carbonáticos (10%) e mármores (3%).

A geomorfologia da APA Carste de Lagoa Santa reflete diretamente o contexto geológico, permitindo distinguir dois domínios principais. O primeiro, predominante na área central, está associado aos calcários da Formação Sete Lagoas e apresenta feições típicas de carste, como dolinas, uvalas, colinas convexas, morros alongados e paredões (Viana *et al.,* 1998). As dolinas e uvalas, formadas principalmente por dissolução e em menor grau por abatimento, aparecem alinhadas e em diferentes dimensões, frequentemente ladeadas por paredões calcários. A intersecção entre condutos subterrâneos e a superfície resulta na abundância de cavernas e reentrâncias (Berbert-Born, 2002). O segundo domínio, subordinado, ocorre sobre os pelitos da Formação Serra de Santa Helena, especialmente na porção sudeste, próximo à cidade de Lagoa Santa. Esse setor é caracterizado por colinas convexas e alongadas, situadas em cotas superiores a 850 m (Meneses, 2003). Kohler (1989) interpreta esse domínio como remanescente da superfície de aplainamento Sul-Americana do Terciário, descrita por King (1956) como Pediplano Sul-Americano.

De forma mais detalhada, Auler (1994) subdividiu a área em seis domínios geomorfológicos: planaltos cársticos, com topografia desenvolvida entre 700 e 860 m e elevada permeabilidade; depressão Mocambeiro, marcada por relevo dissecado e fluviocarste em altitudes inferiores a 700 m; superfícies cársticas encobertas, recobertas por espesso manto de intemperismo; superfícies filíticas, em altitudes superiores a 800 m; planícies fluviais, associadas aos rios; e o domínio ígneo metamórfico, caracterizado por formas arredondadas e diques básicos.

Velásquez *et al.* (2018) realizaram estudo morfométrico que identificou 393 depressões cársticas, das quais 84% possuem área inferior a 147 m² e 60% apresentam profundidade entre 3,0 e 12,9 m. A maioria dessas feições possui declividade interna de 0 a 10°. Entre as formas mais comuns estão dolinas, feições do tipo karren, depressões preenchidas por lagos temporários, além de sumidouros de dissolução e colapso (Auler, 1994).

O Projeto Vida contabilizou, até 2003, 289 cavernas na região (Ribeiro *et al.,* 2003), destacando-se a Gruta da Lapinha, Gruta de Maquiné, Gruta do Rei do Mato e Gruta do Sumidouro. Auler (1988) observou que a maioria das cavernas ocorre em áreas mais elevadas, sendo comuns aquelas associadas ao nível freático. Essa relação reforça a conexão entre processos subterrâneos e feições superficiais, com forte influência do embasamento. Pessoa (2005) acrescenta que o assoalho cristalino controla a disposição dos carbonatos e os processos de dissolução, de modo que as variações estruturais não estariam ligadas a grandes dobras, mas sim às irregularidades do embasamento, denominadas “embaciamentos”.

Berbert-Born (1998) verificou que o comportamento hídrico das lagoas Santo Antônio e Confins, ambas situadas no Membro Lagoa Santa, é fortemente condicionado por processos subterrâneos. Em estudos posteriores, Velásquez *et al.* (2018) confirmaram que o padrão das fraturas do embasamento coincide com os lineamentos da cobertura, evidenciando o controle estrutural exercido pelas rochas basais.

A paisagem cárstica da região apresenta relevos acidentados do tipo côncavo-convexo, com feições superficiais (exocarste) e subterrâneas (endocarste), compostas por condutos de diferentes dimensões e morfologias (Piló, 2000; Berbert-Born, 2002). Além disso, Piló (1998; 2000) descreve o epicarste, domínio de interface rocha-solo, como elemento fundamental na configuração da paisagem de Lagoa Santa.

Assim, a geomorfologia local reflete a sucessão de duas unidades principais: a Formação Sete Lagoas, composta por rochas carbonáticas e responsável pelo compartimento cárstico e cárstico-fissural; e a Formação Serra de Santa Helena, constituída por rochas siliciclásticas finas, que formam o compartimento não cárstico. As coberturas detrito-lateríticas e elúvio-coluvionares do Cenozoico também desempenham papel importante na estruturação do relevo, funcionando como superfícies residuais posteriores aos estágios de aplainamento (Berbert-Born, 2002).

O compartimento não cárstico, situado em cotas acima de 800 m, é caracterizado por colinas alongadas e convexas, com drenagem dendrítica (Meneses, 2003). Esse relevo, esculpido sobre metapelitos da Formação Serra de Santa Helena, raramente apresenta feições típicas de carste, indicando que a carstificação ocorre em

profundidade (Herrmann *et al.,* 1998). Já o compartimento cárstico, localizado na área central entre 650 e 850 m, apresenta mudanças hipsométricas bruscas e concentra grande diversidade de feições, como desfiladeiros, abismos, cavernas, dolinas, uvalas, poljés e depressões de dissolução ou colapso, com formas variadas (Kohler, 1989; Ribeiro et al., 2003). Muitas dessas estruturas seguem padrões estruturais, como fraturas e falhas, confirmando o controle tectônico no desenvolvimento do carste. Amaral (2018) observou que a ampliação das depressões cársticas coincide com direções estruturais NE e NW, associadas a eventos geotectônicos.

Na região da APA Carste de Lagoa Santa, especialmente no domínio do planalto cárstico, observa-se uma diversidade de classes de solos, com predominância dos latossolos vermelho-escuros e, em menor proporção, cambissolos e podzólicos vermelho-escuros (Shinzato, 1998). De modo geral, esses solos apresentam granulometria dominada por silte e argila, são profundos, bem drenados e possuem boa porosidade e permeabilidade.

Os latossolos vermelhos ocorrem principalmente nas porções sul, leste e nordeste da área. São solos de textura argilosa, estrutura granular e horizonte A com boas condições de infiltração e retenção de umidade (Souza & Sampaio, 2021). Frequentemente muito profundos, apresentam solum com espessura superior a 1 m (Meneses, 2003). Carneiro (2013) descreve-os como ricos em caulinita e em óxidos de ferro e alumínio, como hematita, goethita e gibbsita, resultado da intensa ação intempérica. A presença desses minerais aumenta a acidez, reduz a disponibilidade de nutrientes e eleva a toxicidade para as plantas devido ao alto teor de alumínio. Por isso, são considerados pouco férteis, exigindo elevados custos de correção e fertilização para uso agrícola (Meneses, 2003).

Nas dolinas, que apresentam formas e dimensões variadas, predominam cambissolos gleicos eutróficos de textura muito argilosa. Essas características resultam da ação da água dura, que confere fertilidade (eutrófico) e coloração acinzentada, especialmente próxima ao nível freático ou em áreas de intensa circulação hídrica (gleico) (Shinzato, 1998). Devido à diversidade de material de origem, relevo e condições climáticas, os cambissolos apresentam ampla variação: podem ser fortemente a imperfeitamente drenados, rasos ou profundos, e exibem colorações que vão do bruno ao vermelho-escuro. Quanto à fertilidade, os cambissolos háplicos

podem ser aproveitados em manejos mais desenvolvidos, mas são pouco aptos para lavouras sem mecanização. Já os cambissolos gleicos eutróficos apresentam limitações de uso devido ao excesso hídrico característico das dolinas e uvalas onde se encontram (Meneses, 2003).

Nas várzeas, predominam gleissolos e solos aluviais, geralmente mal ou imperfeitamente drenados (Shinzato, 1998). Esses solos ocorrem ao longo dos cursos d'água e são suscetíveis a inundações periódicas, o que favorece sua utilização agropecuária nas planícies fluviais, embora o risco constante de alagamentos seja um fator limitante (Meneses, 2003). A água rica em cálcio e magnésio, proveniente da dissolução das rochas carbonáticas, confere elevada fertilidade a esses solos (Shinzato, 1998).

Cabe destacar que as rochas carbonáticas mais expressivas da APA Carste de Lagoa Santa são compostas por mais de 90% de calcita. Dessa forma, seria esperado o desenvolvimento de solos rasos e pouco espessos. A presença de coberturas pedológicas mais espessas na área indica que sua formação está mais associada aos pelitos da Formação Serra de Santa Helena do que às rochas carbonáticas (Shinzato, 1998; Piló, 2000).

3.5 Hidrologia

Na escala regional, a rede hidrográfica da área de estudo está inserida na porção central da bacia do rio das Velhas, que, embora sob jurisdição estadual, integra a bacia do rio São Francisco, de relevância nacional e federal, abrangendo seis estados brasileiros (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2021). A área é descrita por sistemas tanto exorréicos quanto criptorréicos, situando-se na depressão do Alto-Médio rio São Francisco e compondo a sub-bacia do rio das Velhas (IBGE, 2006).

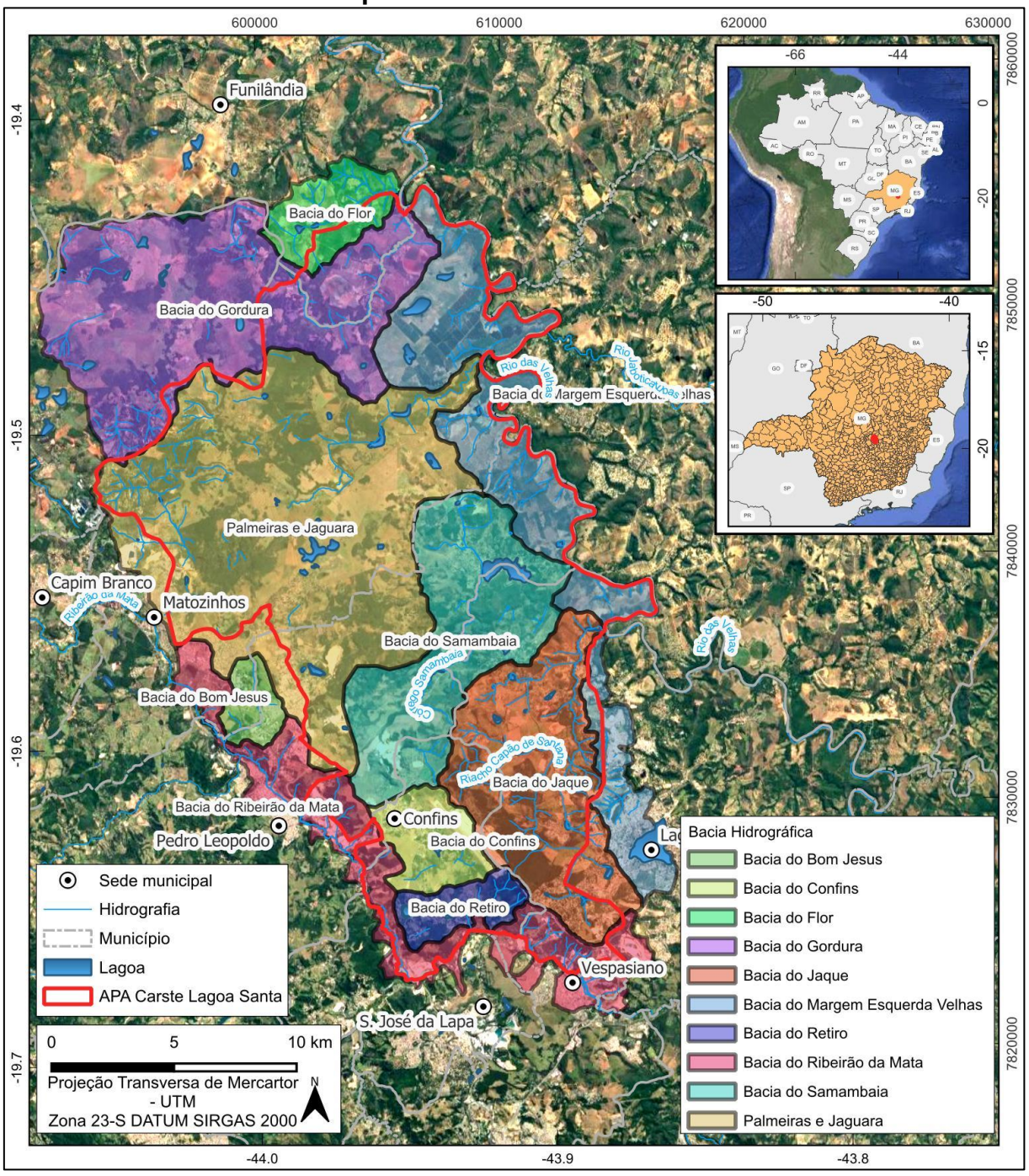
O rio das Velhas nasce a cerca de 1.300 m de altitude, no Parque Natural Municipal das Andorinhas, em Ouro Preto (MG). Com aproximadamente 700 km de extensão, deságua no rio São Francisco, sendo um de seus principais tributários. Entre seus afluentes mais relevantes destaca-se o ribeirão da Mata, que nasce a leste da área de estudo e percorre a zona limítrofe desta.

No contexto local, o rio das Velhas atua como nível de base predominante, recebendo o escoamento das principais drenagens da região, incluindo o ribeirão da Mata. A área de estudo é composta por importantes sub-bacias hidrográficas, cujos cursos d'água principais são os córregos Flor, Escrivânia-Gordura, Palmeira-Jaguara, Margem Velhas, Samambaia, Confins, Jaque, Retiro e Ribeirão da Mata (Figura 7). Esses compartimentos hidrogeológicos já haviam sido delimitados e retificados em trabalhos anteriores realizados no âmbito da APACLS (Velásquez *et al.,* 2018; De Paula, 2019; Teodoro *et al.,* 2019).

A rede de drenagem da APA Carste de Lagoa Santa apresenta grande complexidade, composta por condutos subterrâneos e cavernas interligados a feições cársticas como dolinas, uvalas, sumidouros e surgências (Teodoro, 2020). Nas áreas de afloramento calcário, observa-se menor densidade de drenagens superficiais, devido à presença de dolinas, depressões cársticas e cavernas, que frequentemente desviam o fluxo para o ambiente subterrâneo (Ribeiro *et al.,* 2016; Teodoro *et al.,* 2019). Além disso, a região apresenta grande número de lagoas cársticas, tanto perenes quanto intermitentes, formadas por emergências e ressurgências de alto volume. Em sistemas cársticos, é comum que os cursos superficiais não estejam diretamente conectados às drenagens subterrâneas (Palmer, 1991). O padrão retangular observado nos cursos d'água indica controle estrutural por fraturas e falhas, com fluxo preferencial orientado para leste, em direção ao rio das Velhas (De Paula, 2019).

Conforme Guerra (1993), esses sistemas subterrâneos podem emergir em nascentes ou integrar-se a rios subaéreos. Assim, os fluxos superficiais e subterrâneos se entrelaçam, configurando um terreno fluviocárstico. Em diversos pontos, as drenagens aéreas são interrompidas por formações cársticas, desviando o escoamento para o subsolo (Darnault, 2008).

Figura 7 — Mapa hidrográfico com as principais bacias hidrográficas mapeadas na área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora.

De Paula e Velásquez (2020) demonstraram forte correlação entre precipitação e vazão dos cursos d'água, com respostas rápidas em bacias carbonáticas, inferiores a um dia após eventos pluviométricos. Para validação, os resultados foram comparados com ensaios diretos de traçadores corantes realizados por Teodoro *et al.* (2019), que identificaram tempos de resposta de aproximadamente 23 horas, confirmando a alta conectividade entre os sistemas.

A região também é caracterizada pela alta frequência de lagoas, descritas por Kohler *et al.* (1978) e Neto *et al.,* (2023a), que apresentam variações irregulares de nível e ciclos hídricos complexos, incluindo períodos secos de até 15 anos. O monitoramento dessas lagoas é considerado fundamental para compreender seu comportamento hidrológico. Auler (1994) classificou três tipos principais: lagoas sobre filitos, lagoas formadas em dolinas e lagoas associadas ao nível d'água do aquífero aflorante.

Em relação às sub-bacias mais representativas, o córrego Flor é classificado como misto, recebendo contribuições de metapelitos e carbonatos. Possui pequena área de drenagem (16 km²) e baixas vazões médias, em torno de 0,01 m³/s, sendo fortemente impactado por retiradas antrópicas de água, chegando a secar nos períodos de estiagem (De Paula, 2019).

O córrego do Jaque, localizado no município de Lagoa Santa, é o mais extenso da região, com aproximadamente 17 km de comprimento e vazão média de 0,34 m³/s. Ele se forma a partir da confluência dos córregos do Fidalgo e Capão de Santana. Seu leito foi escavado em uma área composta predominantemente por calcários impuros do Membro Pedro Leopoldo, o que confere ao curso d'água uma orientação contínua no sentido sul-norte. A bacia de drenagem do córrego possui cerca de 59 km² e apresenta feições cársticas que favorecem a formação de lagoas importantes, tanto perenes, como as lagoas Olhos D'água e Sangrador, quanto intermitentes, como as lagoas Fidalgo e Velhas (Meneses, 2003). As águas do córrego são utilizadas principalmente para a dessedentação de animais e para a irrigação de pequenas culturas em propriedades rurais da região (Viana *et al.,* 1998).

A bacia da Escrivânia possui apenas uma nascente, que desaparece em um sumidouro e reaparece na bacia do Gordura, evidenciando a conectividade subterrânea típica de sistemas cársticos (Velásquez *et al.,* 2018). O córrego Palmeira, situado ao norte de Matozinhos, possui extensão de 6 km, 31 km² de área e orientação NW-SE, desenvolvendo-se sobre uma ampla formação calcária que favorece a presença de numerosos sumidouros e ressurgências ao longo de seu percurso. Conforme identificado por Auler (1994), por meio de traçadores corantes, o córrego é absorvido pelo aquífero cárstico no maciço da Cimento Mauá Minerações e reaparece cerca de 2,5 km a noroeste, na ressurgência de Mocambo. Sua vazão média é de 0.02 m³/s. Suas águas são utilizadas para abastecimento doméstico, dessedentação

animal e irrigação de culturas temporárias (Viana *et al.,* 1998). Após ressurgir ao norte de Mocambeiro, o córrego Palmeira passa a ser denominado córrego Mocambo. Cerca de 3 km a jusante da ressurgência de Mocambo, na fazenda Experiência da Jaguara, ocorre uma grande surgência conhecida como surgência da Jaguara. A partir da confluência com o córrego Mocambo, forma-se o córrego Jaguara, cujas águas, embora de origem ainda desconhecida, apresentam vazões significativas (Viana *et al.,* 1998). Devido à intensa carstificação, que inclui dolinas, lagoas, grutas e sumidouros ao longo de seus 13,8 km de extensão até desaguar no Rio das Velhas, o córrego Jaguara constitui uma sub-bacia de grande relevância regional, totalmente inserida no município de Matozinhos e orientada na direção SW-NE.

O Jaguara é a bacia mais expressiva da região, com área carbonática e vazão média de 0,98 m³/s, a maior registrada localmente. De forma semelhante ao Jaguara, o córrego Gordura apresenta intensa carstificação, de modo que apenas parte de seu curso é superficial. Localizado na porção norte da APA, possui 11,2 km de extensão, área de 96 km² e orientação variável entre NW-SE, W-E e SW-NE, até desaguar no Rio das Velhas, na divisa entre os municípios de Matozinhos e Funilândia (Meneses, 2003). Suas águas subterrâneas afloram principalmente na ressurgência da Gordura (Viana *et al.,* 1998). Sua vazão média é da ordem de 0.9 m³/s. Os autores sugerem que, assim como ocorre na sub-bacia do Jaguara, o sistema hídrico da Gordura pode não ser fechado, havendo possibilidade de fluxo subterrâneo para áreas vizinhas.

A sub-bacia do córrego Samambaia apresenta características tipicamente cársticas, resultado da grande diversidade de feições identificadas, especialmente surgências e ressurgências, como as da Samambaia, Gameleira, Palestina e do Engenho. Seu curso d'água possui orientação SW-NE, com extensão aproximada de 9 km e área de 48 km², e desagua na Lagoa do Sumidouro com uma vazão média de 0,24 m³/s, para a qual representa a principal fonte de contribuição, mesmo apresentando vazões relativamente baixas. Assim como ocorre no córrego do Jaque, as águas do Samambaia são utilizadas principalmente para a dessedentação de animais e para a irrigação de pequenas culturas nas propriedades rurais da região (Meneses, 2003).

A menor sub-bacia da região corresponde ao córrego Flor, localizado fora dos limites da APA Carste de Lagoa Santa, no extremo norte. Sua área de drenagem é de

aproximadamente 16 km², com baixas vazões. O curso principal possui 5 km de extensão, orientado na direção SW-NE, até desaguar no Rio das Velhas.

3.6 Hidrogeologia

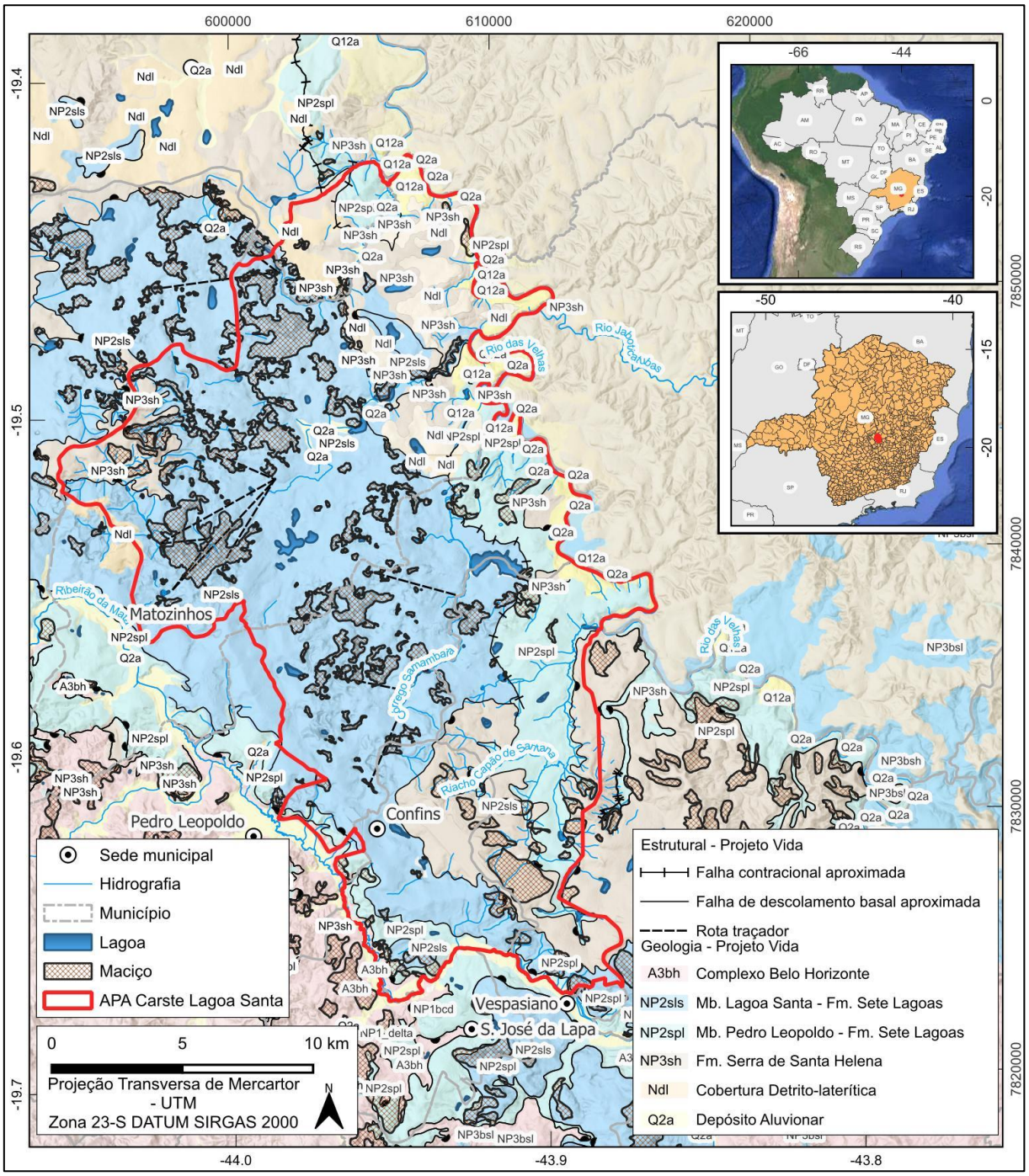
A rede de drenagem subterrânea da APA Carste de Lagoa Santa é formada por um conjunto complexo de condutos e cavernas interligados às diversas feições cársticas superficiais, como dolinas, uvalas, surgências e sumidouros, que caracterizam a região (Figura 8). Esse arranjo evidencia um sistema aquífero intricado, no qual predomina o fluxo subterrâneo, enquanto o escoamento superficial apresenta baixa densidade (Viana *et al.,* 1998). De modo geral, as nascentes dos rios locais estão situadas em terrenos carbonáticos e, devido à geomorfologia cárstica bem desenvolvida, grande parte da água pluvial é direcionada para condutos subterrâneos (Ribeiro *et al.,* 2016).

Com base em aspectos geológicos, estruturais, litológicos, estratigráficos e morfológicos, a hidrogeologia da área pode ser dividida em quatro unidades hidroestratigráficas (De Paula, 2019; Dantas, Velásquez & De Paula, 2023):

- Embasamento Cristalino: aquífero fissural;
- Formação Sete Lagoas: aquífero cárstico-fissural;
- Formação Serra de Santa Helena: aquitardo;
- Coberturas: aquífero granular.

O principal sistema aquífero é de natureza cárstica, desenvolvido nas rochas calcárias da Formação Sete Lagoas, que constitui a unidade de maior expressão na área. O Complexo Gnáissico-Migmatítico funciona como base impermeável desse sistema. Apesar de distintos, ambos devem ser analisados em conjunto, considerando a interação entre os carbonatos e a estruturação do embasamento cristalino, conforme destacado por Pessoa (2005).

Figura 8 — Mapa geológico com as principais rotas de fluxo identificadas nos estudos de traçadores, além da indicação do mapeamento de lagoas e maciços locais.



Fonte: Adaptado de “Projeto VIDA” (Cabral, 1994; Ribeiro *et al.,* 2003).

O aquífero cristalino ocorre no domínio das rochas do complexo gnáissico-migmatítico indiferenciado. Na maior parte da área, apresenta-se como aquífero confinado, recoberto pelos metassedimentos do Grupo Bambuí; já nas pequenas áreas aflorantes ao sul, constitui um aquífero livre (De Paula, 2019; Dantas, Velásquez & De Paula, 2023). Sua porosidade é do tipo fissural, com fluxo subterrâneo condicionado

pelas descontinuidades, sobretudo nos planos de fratura gerados por esforços tectônicos. Pessoa (1996) descreve duas formas de circulação: uma mais superficial, interligada ao manto de intemperismo, e outra mais profunda, confinada devido ao isolamento das fraturas. As porções não fraturadas apresentam porosidade primária praticamente nula, comportando-se como aquifugos (De Paula, 2019; Dantas, Velásquez & De Paula, 2023).

A recarga do aquífero fissural ocorre pelo encaixe de cursos d'água em sistemas de fratura do embasamento e pela infiltração através das coberturas coluvionares (Pessoa, 1996; De Paula, 2019). A descarga se dá pela transferência da água para zonas mais profundas, para cursos superficiais e por fontes difusas que emergem em fissuras ou nos contatos entre saprolito e rocha fresca (Mourão *et al.,* 2001).

Esse sistema apresenta grande heterogeneidade e anisotropia em suas propriedades hidrodinâmicas, funcionando como base impermeável do Sistema Aquífero Sete Lagoas e correspondendo ao aquífero de menor expressão na área.

O Sistema Aquífero Sete Lagoas (SASL), descrito por Pessoa (2005) e Galvão (2015), é o aquífero de maior relevância e representatividade da região. Classificado como cárstico-fissural, deve essa característica à sua composição predominantemente carbonática, com intercalações pelíticas e forte influência tectônica. Ocorre nos calcários do Membro Lagoa Santa, intensamente carstificado, e no Membro Pedro Leopoldo, menos carstificado, onde o maior potencial hídrico está associado às zonas de fraturamento e planos de acamamento (Dantas, Velásquez & De Paula, 2023).

De modo geral, trata-se de um aquífero altamente produtivo e vulnerável, com águas de boa qualidade, embora apresentem sabor desagradável devido à elevada concentração de íons de cálcio (Ca^{2+}) (Viana *et al.,* 1998). Está limitado na base pelo Complexo Gnáissico-Migmatítico e, no topo, pelos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena. Na maior parte da área, configura-se como um aquífero livre, mas torna-se semi-confinado nas regiões onde está sotoposto pelo aquitardo Serra de Santa Helena (De Paula, 2019; Dantas, Velásquez & De Paula, 2023).

No domínio cárstico, o fluxo e S da água são condicionados por condutos formados pelo alargamento de fraturas resultantes da dissolução do carbonato (Carneiro, 2013). Os calcários puros do Membro Lagoa Santa apresentam maior susceptibilidade à

solubilização, o que explica sua carstificação mais intensa em comparação ao Membro Pedro Leopoldo. Este último, por conter alternância entre intercalações pelíticas e porções carbonáticas, reforça o caráter cárstico-fissural do SASL (Mourão *et al.,* 2001). Nesse tipo de sistema, as propriedades hidráulicas combinam características de aquíferos fissurais e cársticos, com fluxos relacionados tanto às fraturas pré-existentes quanto à dissolução de lentes carbonáticas (Carneiro, 2013).

Peñaranda-Salgado (2016) também evidencia diferenças entre os dois membros da Formação Sete Lagoas, associando a composição das rochas ao desenvolvimento de condutos de dissolução. O autor identificou maior teor de MgO nos calcários impuros do Membro Pedro Leopoldo em relação ao Membro Lagoa Santa, o que explicaria o menor potencial de formação de condutos no primeiro.

A porosidade cárstica resulta da dissolução do carbonato de cálcio, gerando condutos que permitem fluxo subterrâneo rápido (White, 2002). Esses aquíferos são heterogêneos, anisotrópicos e apresentam permeabilidade hidráulica extremamente variável, indo de valores quase impermeáveis até equivalentes a cursos superficiais (White, 2003). Pessoa (2005) descreve velocidades de fluxo subterrâneo que podem atingir 80 m/h, em regime turbulento, além da presença de uma extensa rede de fraturas e conexões hidráulicas que caracterizam o SASL (De Paula, 2019; Dantas, Velásquez & De Paula, 2023).

Velásquez *et al.* (2018) registraram no setor norte da área de estudo velocidades aparentes superiores a 182 m/h, obtidas por meio da injeção de traçadores corantes em pontos de entrada e saída separados por mais de 4,2 km em linha reta, com recuperação total do corante em cerca de 23 horas. Como ressaltam Ford & Williams (1989), a solubilidade por si só não explica a formação do carste, sendo igualmente essenciais as estruturas e litologias das rochas, motivo pelo qual a análise estrutural da região tem sido amplamente discutida.

De Paula & Velásquez (2019) realizaram o balanço hídrico e a análise de recarga do sistema aquífero da região, estimando valores de recarga líquida entre 12 e 164 mm/ano, com média de aproximadamente 119 mm, o que corresponde a cerca de 12% do total pluviométrico. Nesse mesmo estudo, os autores calcularam o balanço de massa, levando em consideração tanto as retiradas antrópicas quanto as entradas

autóctones. Os resultados evidenciaram que, embora a área seja uma das principais zonas de proteção cárstica do país, as retiradas antrópicas superam a recarga líquida proveniente das chuvas, apontando para um cenário de pressão significativa sobre os recursos hídricos subterrâneos.

Segundo Mourão *et al.* (2001), a recarga do aquífero cárstico ocorre tanto em afloramentos calcários quanto em feições típicas como dolinas e sumidouros. Outra parcela da recarga está associada às coberturas de áreas planas e planaltos cársticos, conforme já indicado por Auler (1994). Pessoa (2005) acrescenta que, em áreas de mineração, a taxa de infiltração tende a ser maior, aumentando o percentual de recarga. Neto *et al.* (2023b) destaca ainda que o aquífero cárstico-fissural apresenta dois compartimentos: um mais carstificado, de maior relevância espacial e com conexões hidráulicas que extrapolam os limites da APA Carste de Lagoa Santa, e outro menos carstificado.

A descarga do sistema aquífero ocorre por infiltrações em zonas de circulação lenta e profunda, além do escoamento ao longo de condutos em direção ao nível de base regional, o rio das Velhas (Pessoa, 1996). Em estudo com traçadores corantes, Auler (1994) estimou que cerca de 88% da água subterrânea da área é direcionada para esse rio. A descarga também pode ocorrer de forma artificial, por meio da explotação de água subterrânea em poços tubulares profundos (Carneiro, 2013).

Auler (1994), ao aplicar traçadores nas principais redes hidrológicas locais, como as bacias do Samambaia e do Palmeiras-Mocambo, identificou três direções principais de fluxo: NW-SE, W-E e SW-NE. Ribeiro *et al.* (2019) reforçam a importância das fraturas de alto ângulo para os fluxos cársticos e confirmam a circulação preferencial de oeste para leste. Peñaranda-Salgado (2016), ao relacionar acamamento e fraturas predominantes, obteve três direções teóricas para o desenvolvimento de condutos: N20E (L1), N40E (L2) e N80W (L3), associadas às fraturas N10-20E (C1), N30-40E (C2) e N80W-EW (C3). Silva et al. (1987) já havia descrito juntas relacionadas ao Evento Brasiliano, com atitudes N10E/28E e N50/69E.

Pessoa (2005) relaciona os processos de carstificação à presença de planos de interseção entre estratos carbonáticos, geralmente orientados N-S, além de planos de juntas e foliação paralelos, e contatos entre fraturas conjugadas NW-SE e ENE-SSW.

O autor também ressalta a importância da zona epicárstica, desenvolvida sob o espesso manto de intemperismo, especialmente em carbonatos puros, que controla a recarga meteórica e influencia tanto o regime de fluxo em surgências quanto os processos de dissolução lateral.

Velásquez *et al.* (2018) observaram que os dutos de dissolução, responsáveis por parte do deslocamento da água subterrânea, se desenvolveram em zonas de junção de descontinuidades, especialmente onde fraturas de direção E-W se encontram com fraturas sub-horizontais. Nessas áreas, o fluxo subterrâneo ocorre predominantemente por condutos, com direção principal N80-90W, orientando-se para o Rio das Velhas.

Na região, prevalece o sistema de fluxo difuso, em que a circulação subterrânea se dá ao longo das fraturas NE e NW dos metacalcários, mais especificamente nas direções N0-10E, N10-30E e N10-90W. Essas fraturas, quando expostas, favorecem a recarga, mas apresentam baixa S e T (De Paula, 2019).

Quanto aos parâmetros hidrodinâmicos, estudos como os de Pessoa (2005) e De Paula *et al.* (2020) indicam que a condutividade hidráulica (K) diminui com a profundidade, devido ao fechamento das fraturas pela pressão confinante. Isso gera ao menos dois níveis distintos: um superior, dominado por condutos de dissolução, e outro mais profundo, controlado por fraturas menos abertas. Segundo Dantas, Velásquez & De Paula (2023), T também varia lateral e verticalmente. Valores reportados incluem T regional de 10^{-2} m²/s (Galvão, Todd & Hirata, 2015); condutividade hidráulica em condutos superior a 6,0 m/s e T próxima de 500 m²/s (Teodoro *et al.,* 2019); condutividade hidráulica de 10^{-3} m/s (De Paula et al., 2020); T entre 10^{-2} e 10^{-5} m²/s e S variando de 10^{-1} a 10^{-11} (Pena *et al.,* 2024).

Pessoa (2005), em testes de permeabilidade, identificou variações de K em uma mesma seção horizontal, interpretando os resultados como reflexo da dupla porosidade do meio cárstico. O autor ressalta que os valores obtidos correspondem a médias de condutividade no trecho saturado do aquífero, formado por porções carbonáticas e espaços vazios. Isso evidencia a grande amplitude dos dados e a heterogeneidade do sistema, dependente da região estudada, do método aplicado e da escala de análise.

O Sistema Serra de Santa Helena ocorre nos metapelitos da Formação homônima, composta por siltitos argilosos finamente laminados, presentes nas porções sudeste e nordeste da área. Trata-se de um aquitardo com porosidade fraturada, associada a planos de descontinuidade (fraturas e falhas). As maiores capacidades de S estão ligadas a raros níveis carbonáticos carstificados, geralmente nos contatos com os calcários da Formação Sete Lagoas (De Paula, 2019).

Essas rochas funcionam mais como zonas de recarga para os aquíferos carbonáticos do que como aquíferos produtivos. Auler (1994) cita a ocorrência de aquíferos suspensos em algumas porções argilosas, enquanto Pessoa (1996) sugere que a recarga mais eficaz ocorre em áreas intensamente fraturadas, onde os metassedimentos possuem espessura de cerca de 60 m. Também há recarga lenta em regiões com espesso manto de intemperismo, por infiltrações verticais ou associadas a cursos d’água. A descarga, por sua vez, ocorre por infiltração para o aquífero cárstico subjacente, coincidindo com zonas de fraturamento intenso. Devido ao elevado grau de intemperismo das rochas da Formação Serra de Santa Helena, esse tipo de sistema aquífero é considerado incomum na área (Carneiro, 2013).

Essas rochas funcionam mais como zonas de recarga para os aquíferos carbonáticos do que como aquíferos produtivos. Auler (1994) cita a ocorrência de aquíferos suspensos em algumas porções argilosas, enquanto Pessoa (1996) sugere que a recarga mais eficaz ocorre em áreas intensamente fraturadas, onde os metassedimentos possuem espessura de cerca de 60 m.

O sistema de coberturas da região é formado por coberturas detrito-lateríticas e depósitos aluviais recentes. Estudos pedológicos realizados por Shinzato (1998) apontam que os solos da APA Carste de Lagoa Santa apresentam alta permeabilidade, estando intensamente intemperizados e lixiviados. Entre os principais tipos de solos, destacam-se os latossolos, geralmente muito argilosos, mas que, devido ao arranjo estrutural em microagregados, podem apresentar condutividade relativamente elevada. Já os cambissolos, também relevantes, possuem duas camadas distintas: uma superior, fina, composta por cascalho com certo grau de cimentação, e outra inferior, formada por material compacto silto-argiloso (Carneiro, 2013). Esse sistema corresponde a um aquífero granular, caracterizado por sua heterogeneidade e anisotropia. Trata-se de um aquífero livre, com baixa

potencialidade hídrica, cuja principal função é atuar como zona de recarga para os aquíferos subjacentes. Sua explotação ocorre, em geral, por meio de cisternas e cacimbas, utilizadas principalmente para abastecimento doméstico.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos hidrogeológicos em meios cársticos exigem integração de bases bibliográficas e aplicação de métodos adequados à escala e complexidade do sistema. Nesse sentido, o presente trabalho foi estruturado em três etapas: (a) compilação de informações literárias e tratamento dos dados; (b) aplicação dos métodos para estimativa de parâmetros hidráulicos; e (c) avaliação e comparação estatística dos resultados.

Ressalta-se que foi utilizadp o Copilot, da Microsoft 365, como ferramenta de Inteligência Artificial (GenAI) para auxiliar na compreensão da estrutura metodológica e para apoiar a verificação da funcionalidade das fórmulas compiladas neste estudo.

4.1 Compilação e Tratamento de Dados

A elaboração deste estudo fundamentou-se em uma ampla base de informações da área de pesquisa, incluindo aspectos fisiográficos, registros pluviométricos, uso e ocupação do solo, cadastro de nascentes, dados geológicos e hidrográficos, além de medições de vazão em poços de bombeamento e níveis d’água em piezômetros e poços de monitoramento.

O arcabouço geológico foi baseado no projeto Vida (Ribeiro *et al.*, 2003), com suporte de dados da CPRM (atual SBG), incluindo os projetos APA Carste de Lagoa Santa e o Projeto de adequação da rede de monitoramento. Informações sobre unidades hidrogeológicas, foram extraídas de modelos hidrogeológicos e hidrodinâmicos prévios (De Paula, 2019; Dantas, Velásquez, De Paula, 2023; Dantas *et al.,* 2024; Pena *et al.,* 2024). As análises espaciais dos gráficos, para T e S, foram realizadas com em informações geomorfológicas do carste local, como maciços carbonáticos (CECAV) e rotas de fluxo subterrâneo identificadas por ensaios com traçadores artificiais (Auler, 1994; Velásquez *et al.,* 2018; Teodoro *et al.,* 2019).

Os dados de precipitação, dentro do período de 2000 e 2025, foram coletados na plataforma Hidroweb-ANA. As séries históricas de nível d’água, pressão barométrica e perfilagem ótica, coletados entre 2018 e 2021 (Rodrigues, 2023), foram obtidas a partir de 12 instrumentos na área de estudo.

Foram encontrados 354 testes de bombeamento na área de estudo, disponíveis em relatórios públicos, como Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM/SEMAD), Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SISEMA) e em processos de outorgas do Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM). No entanto, considerando que o objetivo do estudo não foi acompanhar os testes de bombeamento, mas sim realizar a compilação das informações, buscou-se priorizar aqueles registros que apresentavam o maior nível de detalhamento possível para aplicação dos métodos propostos, como geologia, localização, profundidade, informações construtivas dos poços, além de registros de nível e vazão, por exemplo. Assim, após o tratamento dos dados, foram utilizadas as informações de 51 testes de bombeamento realizados em poços tubulares alocados, total ou parcialmente, no aquífero cárstico-fissural do Sistema Aquífero Sete Lagoas (SASL).

Para a determinação dos valores de T e S, foram utilizados registros de bombeamento, rebaixamento e recuperação provenientes dos 51 testes de bombeamento realizados na área de estudo. Inicialmente, as informações foram organizadas e consolidadas em planilhas eletrônicas no *software* Microsoft Excel 365®, sendo posteriormente importadas para o *software* AquiferTest® (versão 13.0; Waterloo Hydrogeologic Inc.), onde foram conduzidas as interpretações hidrogeológicas com base nas soluções propostas por Agarwal (1980), Moench (1984) e Thraikill (1988).

Por outro lado, os 12 dados de monitoramentos de nível d'água foram analisados no programa Microsoft Excel 365 ® para Bernard & Delay (2008), para o cálculo de S, sendo necessário a aplicação, ainda, dos *softwares* Tsoft (Van Camp e Vauterin 2005); e PREDICT (Wenzel, 1995).

4.2 Métodos Para Obtenção de Parâmetros Hidrodinâmicos

O tratamento de testes de bombeamento em poços tubulares é um método amplamente utilizado para mensurar parâmetros hidrodinâmicos que caracterizam os aquíferos, como T e S. Em condições ideais, tais testes devem contar com um poço de observação, de modo a evitar que as interferências do sistema de bombeamento gerem perturbações nos dados medidos (Feitosa *et. al.,* 2008). No entanto, como o objetivo deste estudo não foi a execução de novos testes, mas sim a curadoria de informações já disponíveis em relatórios públicos, foram considerados registros que,

conforme algumas referências, permitem a realização de testes sem poço de observação, desde que certas premissas sejam atendidas — como a ocorrência de rebaixamentos suficientemente grandes no próprio poço bombeado (Papadopulos & Cooper Jr. 1967; De Paula, 2012). Na área de estudo, conforme identificado por De Paula (2019), embora os níveis estáticos sejam rasos, os poços apresentam baixa produtividade, resultando em rebaixamento profundos. Essa condição viabiliza a utilização dos dados obtidos diretamente no poço bombeado para aplicação dos métodos propostos neste estudo.

Assim, estes dados podem ser utilizados para uma análise geral das condições hidráulicas do aquífero (Kruseman & Ridder, 1979). Autores como Bredehoeft (1967), Mesquita *et al.,* (2017) e De Paula *et al.* (2020), recorreram a essa estratégia para se estimar S, assumindo que a distância do centro do poço bombeado até o ponto de observação seria igual ao raio do próprio poço. É, possível, ainda, obter T local com maior precisão a partir dessa mesma premissa (Mawlood & Ismail, 2019; Diniz & Michaluate, 2002).

A Tabela 1 apresenta uma comparação conceitual entre os métodos, suas limitações e os parâmetros que podem ser estimados.

Tabela 1 — Comparação conceitual entre os diferentes métodos de tratamento de dados para obtenção de parâmetros hidrodinâmicos.

Sistema	Método	Parâmetros	Vantagens	Limitações
Não específico	Agarwal (1980)	T, S	- Simples aplicação em testes de recuperação	- Pressupõe meio homogêneo e isotrópico
			- Reduz problemas de vazão constante	- Necessidade de bombeamento prolongado
			- Boa aplicabilidade em aquíferos confinados	- Menor precisão em ambientes cársticos heterogêneos
	Moench (1984)	T, S	- Considera dupla porosidade (matriz + fraturas)	- Modelo matemático mais complexo
			- Captura heterogeneidade do meio	- Requer dados de alta qualidade
			- Ampla utilização em ambientes fissurados	- Pode superestimar parâmetros em condutos cársticos
Cárstico	Thrailkill (1988)	T, S, E, Aw, Ci	- Específico para ambientes cársticos rasos	- Exige dados detalhados de perfilagem
			- Considera fluxo turbulento em condutos	- Complexidade matemática elevada
			- Permite análise detalhada de intervalos de rebaixamento	- Aplicação restrita a sub-aquíferos não confinados
	Bernard & Delay (2008)	S	- Alternativa de baixo custo	- Depende de monitoramento contínuo e preciso
			- Utiliza séries temporais (pressão barométrica, marés terrestres)	- Requer softwares específicos (Tsoft, PREDICT)
			- Útil em aquíferos confinados	- Estimativas sensíveis a ruídos nas séries temporais
			- Dispensa bombeamentos prolongados	

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.1 Métodos Em Meios Não Específicos

Os métodos em meios não específicos, conforme apontado em estudos anteriores (Pessoa, 2005; Pena *et al.,* 2024), mostraram-se satisfatórios na obtenção de parâmetros hidrodinâmicos em regiões cársticas, mesmo quando os dados são obtidos diretamente no poço de teste. Ressalta-se, contudo, que sua aplicação exige

atenção às limitações e singularidades do meio, especialmente em ambientes heterogêneos e anisotrópicos.

Agarwal (1980)

Agarwal (1980) desenvolveu um método aplicável a aquíferos lateralmente extensos, homogêneos e confinados, capazes de se submeterem a bombeamentos de longa duração, nos quais o fluxo radial se desenvolve nas porções intermediárias do poço (Trabucchi, Ramírez e Fernàndez-Garcia 2018). A solução dedica-se, portanto, ao período de recuperação do aquífero, após a interferência gerada pelo bombeamento. Assim, são ignoradas complicações associadas ao bombeamento, como a falta de confiabilidade nos dados durante o bombeamento e a dificuldade em manter uma vazão constante. No entanto, durante o período de recuperação, é importante analisar as oscilações naturais da carga hidráulica do aquífero, de maneira que apenas o rebaixamento residual proveniente do bombeamento seja mensurado. Além disso, para que a curva de rebaixamento se desenvolva, é necessário que o período de bombeamento se prolongue.

Segundo estudos elaborados na área (De Paula 2019; Dantas, Velásquez, De Paula, 2023; Pena *et al.,* 2024), o carstico aquífero apresenta forte controle estrutural por fraturas, respondendo ao bombeamento e recuperação, especialmente nas zonas cárstico-fissural. Isso permite que o método de Agarwal (1980) capture a resposta hidráulica do entorno do poço, uma vez que esses sistemas possuem a capacidade de rápida recuperação. A Equação (3) exibe o cálculo do fluxo subterrâneo, com base no rebaixamento de Agarwal.

$$\boldsymbol{sA(t)} = \frac{\boldsymbol{Q}}{\boldsymbol{4\pi T}}\left[\boldsymbol{ln}\left(\frac{\boldsymbol{4Ttp}}{\boldsymbol{r^2S}}\right) - \boldsymbol{ln}\left(\frac{\boldsymbol{4T(tr+tp)}}{\boldsymbol{r^2S}}\right) + \boldsymbol{ln}\left(\frac{\boldsymbol{4T(tr)}}{\boldsymbol{r^2S}}\right)\right] \qquad \text{Equação (3)}$$

Onde:

s(A) é o rebaixamento de Agarwal;

Q é descarga/vazão;

r é a Distância radial de observação do poço

tp é o tempo de bombeamento;

tr o tempo desde o início da recuperação.

Moench (1984)

O modelo de Dupla Porosidade de Moench (1984) propõe a interpretação de dados de bombeamento em sistemas confinados, nos quais a porosidade secundária, definida por fraturas e estruturas descontínuas, seria caracterizada por altas vazões e baixo S. Nessa análise, boa parte do fluxo que vai em direção ao poço ocorre através de falhas e fraturas, enquanto a matriz funciona como um bloco de armazenamento que fornece água para essas estruturas sob perturbação do equilíbrio (Bäumle, 2003). A possibilidade de aplicação desse método baseia-se na condição do sistema local ser subdividido em carste e carste-fissural, ou seja, com interação entre diferentes porosidades (De Paula, 2019); Dantas, Velásquez, De Paula 2023). A determinação da condutividade K, segue as Equação (4) e (5).

$$\boldsymbol{td} = \frac{\boldsymbol{K\,t}}{\boldsymbol{Ss\,r^2}} \qquad \text{Equação (4)}$$

$$hd = \frac{4\pi\,K\,D}{Q}(h0 - hf) \qquad \text{Equação (5)}$$

Onde:

td é o tempo adimensional;

K é a condutividade hidráulica;

t é o tempo a partir do começo do bombeamento;

Ss é o armazenamento específico;

hd é a carga hidráulica adimensional;

D é a espessura do aquífero;

h0 a carga hidráulica inicial e hf carga hidráulica final.

4.2.2 Métodos Em Meios Cársticos

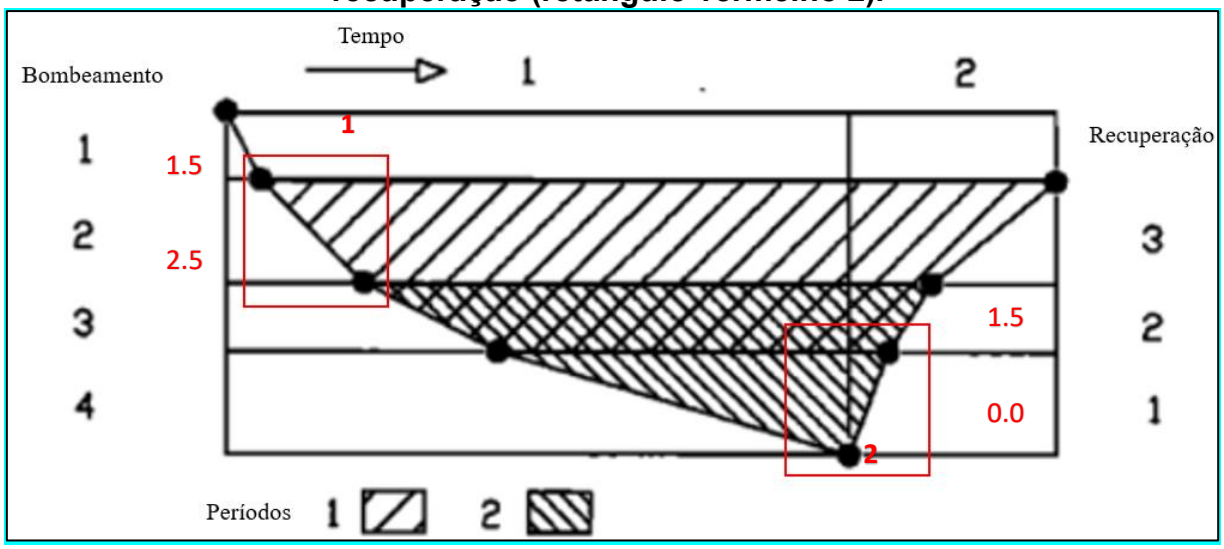
As metodologias concebidas para ambientes cársticos rasos e confinados, de maneira geral, mostraram-se satisfatórios na obtenção de parâmetros hidrodinâmicos, conforme apontado por Thrailkill (1988) e Bernard & Delay (2008).

Thrailkill (1988)

Thrailkill (1988), ao observar que a natureza dos espaços vazios em aquíferos carbonáticos e o fluxo subterrâneo diferem dos aquíferos granulares regidos pela Lei de Darcy (Freeze & Cherry, 1979), desenvolveu um modelo conceitual ajustado às características de sub-aquíferos com fluxo em condutos rasos não confinados (*Shallow Conduit Flow – SCF*).

Thrailkill (1988), então, elaborou o método de Análise de Intervalo de Rebaixamento (*Drawdown Interval Analysis – DIA*), expandindo discussões iniciadas em trabalhos anteriores (Thrailkill, 1985a; 1985b). O método consiste em identificar padrões correlatos de variações absolutas de nível d'água nos intervalos de bombeamento e recuperação. Por exemplo, o início do rebaixamento (retângulo 1 – Figura 9) produz uma redução absoluta de 1,5 m (NA = 2,5 – 1,5), assim como o início da recuperação (retângulo 2 – Figura 9), no qual o aumento absoluto também foi de 1,5 m (NA = 1,5 – 0,0). Dessa forma, percebe-se que o método é sensível à qualidade e definição dos intervalos de bombeamento e recuperação, exigindo a análise pontual para cada teste de bombeamento e recuperação.

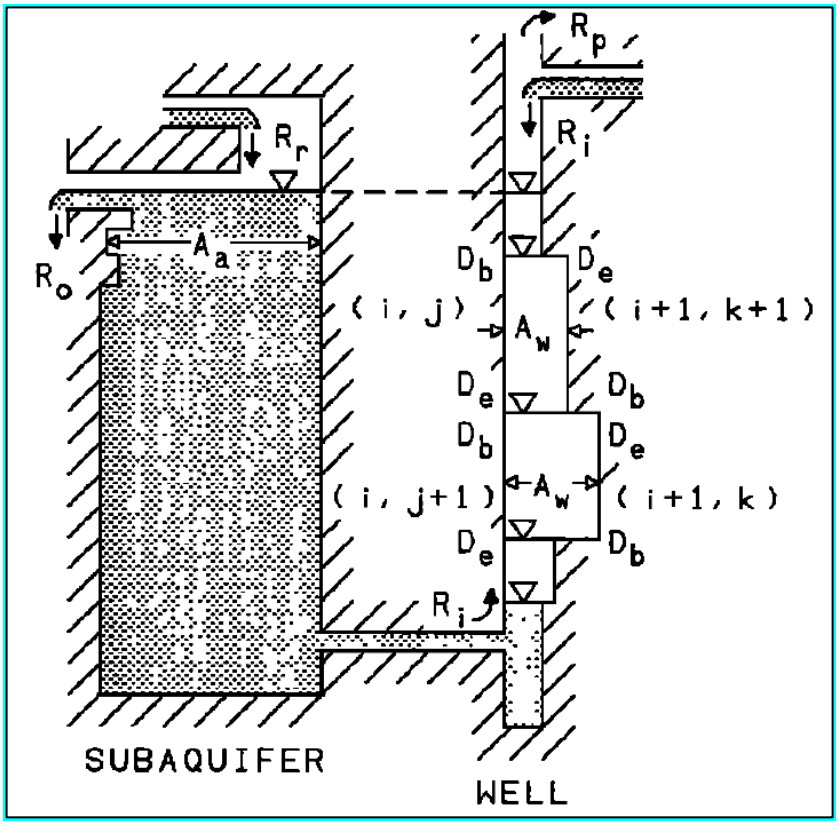
Figura 9 — Relação de conjuntos com intervalos de rebaixamento, com indicação do início do rebaixamento (retângulo vermelho 1) e início da recuperação (retângulo vermelho 2).



Fonte: Partes em destaque modificadas de Thrailkill (1988).

Para facilitar o entendimento, Thrailkill (1988) adota uma notação de subscrito duplo, (i,j), onde o primeiro subscrito identifica o período (bombeamento ou recuperação) e o segundo subscrito identifica o intervalo de profundidade de rebaixamento dentro desse período (Figura 10).

Figura 10 — Geometria do sub-aquífero e do poço na solução de carga constante.



Fonte: Thrailkill (1988).

Além disso, De (i,j) representa o rebaixamento no final do intervalo j, durante o período i; enquanto Db (i+m,k) representa o rebaixamento no início do intervalo k, durante um período posterior i+m (com m>0). O mesmo raciocínio se aplica simetricamente aos outros termos, como Db (i,j) para o início do intervalo j no período i, e De (i+m,k) para o final do intervalo k no período i+m. Assim, os subscritos "e" e "b" indicam o instante dentro do intervalo ao qual a redução se refere, seja ao seu limite final ou inicial no tempo, enquanto os argumentos (i,j) localizam esse valor no esquema geral de períodos e intervalos adotado pelo autor.

Thrailkill (1988) propõe, incialmente, que se obtenha as taxas de rebaixamento (Rd) e a taxa de entrada de um reservatório para o poço (Ri), a partir da taxa de bombeamento (Rp) e os níveis de rebaixamento inicial e final (De e Db), no tempo final (Te) e inicial (Tb), conforme se observa na Equação (6) e (7).

$$\boldsymbol{Rd} = \frac{(\boldsymbol{De}-\boldsymbol{Db})}{\boldsymbol{Te}-\boldsymbol{Tb}} \qquad \text{Equação (6)}$$

$$Ri(i,j) = Ri(i+1,k+1) = [Rd(i+1,k+1)Rp(i,j) - Rd(i,j)Rp(i+1,k+1)][Rd(i+1,k+1) - Rd(i,j)]^{-1} \quad \text{Equação (7)}$$

Alguns valores da área da seção transversal do poço – Aw, foram obtidos a partir de observações em campo, com base em perfilagem óptica (Rodrigues, 2023). Os poços próximos a condutos estudados por Auler (1994) e Teodoro *et al.* (2019), nos quais foram medidos os diâmetros e extensões, forneceram correlações importantes para as estimativas de Aw. Por outro lado, para os poços sem essas condições, Thrailkill (1988) indica que Aw pode ser estimada com base na Equação (8), uma vez que o método depende fortemente da estimativa desse fator.

$$\boldsymbol{Aw(i,j) = Aw(i+1,k+1) = [Rp(i,j) - Ri(i,j)][Rd(i,j)]^{-1}} \quad \text{Equação (8)}$$

Thrailkill (1988) orienta a aplicação da Equação (9) para obter o expoente de fluxo E, o qual pode variar entre 0 (independente), 0,5 (turbulento) e 1 (laminar). Para isso, utilizou-se a ferramenta de iterações, do *Microsoft Excel 365 ®.*

$$[De(i,j+1) - Db(i,j+1)][De(i,j) - Db(i,j)]^{-1} * [De(i,j)^{E+1} - Db(i,j)^{E+1}] * [De(i,j+1)^{E+1} - Db(i,j+1)^{E+1}]^{-1} - [Ri(i,j)][Ri(i,j+1)]^{-1} = 0 \quad \text{Equação (9)}$$

O coeficiente de influxo de entrada, Ci, que depende de E, pode ser estimado com base na Equação (10).

$$Ci = \left[Ri(i,j)[E+1][De(i,j) - Db(i,j)]\right][De(i,j)^{E+1} - Db(i,j)^{E+1}]^{-1} \quad \text{Equação (10)}$$

Ressalta-se que equações adicionais, também propostas por Thrailkill (1988) foram utilizadas para validar os cálculos, confirmando a consistência dos resultados, como a Equação (11) e (12):

$$Ri = Rp - AwRd \quad \text{Equação (11)}$$

$$Ri = CiH^{E} \quad \text{Equação (12)}$$

Importante destacar, ainda, que Thrailkill (1988) sugere que se utilize outras equações secundárias para confirmar a consistência dos resultados. Após essa verificação, Thrailkill (1988) indica que esses novos trechos são, de fato, os mais representativos do aquífero. Nesse contexto, foi possível utilizar o método de Moench (1984), indicado

por Pena *et al.* (2024) como o mais ajustado em termos de método direto para áreas cársticas, para se obter T e S.

Bernard & Delay (2008)

O nível da água responde às flutuações da carga hidráulica devido à dilatação do aquífero e ao movimento vertical do sistema poço-aquífero; portanto, uma onda que produza qualquer um desses fenômenos pode causar flutuações no nível da água. No entanto, a resposta à dilatação é muito maior do que a resposta ao movimento vertical (Cooper Jr. *et. al.,* 1965).

Nesse sentido, o método proposto por Bernard & Delay (2008) apresenta uma alternativa simples e de baixo custo em relação aos testes hidráulicos convencionais, como bombeamentos ou packer tests. O método foi elaborado para aquíferos cársticos fraturados confinados ou semiconfinados, sendo possível se estimar S.

A premissa central é que as variações do nível d'água podem ser usadas para identificar mudanças espaciais e temporais no sistema, além de fornecer informações sobre a deformação das rochas. Em outras palavras, considera-se que o aquífero cárstico e fraturado, com fluxo misto entre matriz e redes de fraturas/condutos em camadas confinadas, funciona como um filtro capaz de receber, armazenar e transmitir água. As respostas físicas do sistema — como flutuações do nível d'água em poços de monitoramento — são induzidas por fatores externos, como pressão barométrica e marés terrestres.

Nesse sentido, a posição e o monitoramento do nível d'água dos poços são utilizados como base para identificar mudanças espaciais e temporais de um sistema, além de fornecer informações sobre a dilatação de rochas saturadas com fluidos. Vale ressaltar que, como sugerido por Bredehoeft (1967), a variação do nível d'água é ligada ao S do aquífero. Dessa forma, quando um aquífero, seja ele poroso ou cárstico, é confinado, a variação no volume total do meio saturado de fluido em função da deformação dos grãos sólidos é relativamente menor se comparada com a variação no volume de água. Ou seja, utiliza-se as análises temporais para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos, pois quase toda mudança no volume do aquífero ocorre na zona saturada.

Inicialmente, para garantir a estacionariedade das séries temporais, Bernard & Delay (2008) orienta a aplicação da diferenciação de primeira ordem, como indicada na

Equação (13). Esta é uma técnica clássica amplamente utilizada em Geoestatística para obter quantidades estacionárias quando a variável em si (Y) é obviamente sujeita a tendências não constantes ao longo do espaço (ou tempo).

$$Dt^X = \boldsymbol{Yt} - \boldsymbol{Y}(\boldsymbol{t} - \boldsymbol{x}) \qquad \text{Equação (13)}$$

Removida as tendências, procedeu-se com a obtenção da eficiência barométrica (B), definida como a razão da variação da pressão atmosférica dPa para as flutuações do nível de água induzidas - dh (Bernard & Delay, 2008). O parâmetro B, portanto, expressa a resposta elástica do aquífero (material e pressão da água no poro) próximo ao poço. Consequentemente, uma flutuação hidrostática dentro do aquífero é igual à variação da pressão atmosférica menos a resposta elástica do aquífero a essa variação de pressão, como indica a Equação (14).

$$dh = -B\frac{dPa}{\rho g} \qquad \text{Equação (14)}$$

O *software* Tsoft, desenvolvido no Observatório Real da Bélgica (Van Camp e Vauterin 2005), foi utilizado para calcular a maré terrestre teórica na área de estudo, considerando latitude, longitude e elevação dos instrumentos. De posse desses dados, o método indica ser possível uma correlação entre os efeitos barométricos com $\boldsymbol{\eta e}$ do aquífero nas proximidades do poço via Equação (15), associando a dilatação teórica do aquífero gerada pela onda de maré com base no *software* PREDICT (Θ), a constante de elasticidade da água (Ew), a gravidade (g) e a densidade de massa da água (ρ).

$$\eta e = \frac{\Theta Ew}{dh\rho g + (1-B)\Theta Ew} \qquad \text{Equação (15)}$$

Por fim, Bernard & Delay (2008) propõe, com base na Equação (16), o cálculo de S, a partir do entendimento do volume de água liberado pela descompressão do fluido e rearranjo da matriz sólida em um aquífero com espessura conhecida “e”.

$$S = \frac{\rho g e}{Ew\left[\frac{1}{\eta e} + (B-1)\right]} \qquad \text{Equação (16)}$$

4.3 Comparação estatística

A proposta central deste estudo consiste em avaliar a aplicabilidade de diferentes metodologias para estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos em aquíferos

carbonáticos da APA Carste de Lagoa Santa, adotando como referência os métodos desenvolvidos especificamente para sistemas cársticos. Dessa forma, a análise estatística não teve como objetivo apenas comparar resultados numéricos, mas verificar quais metodologias apresentam maior capacidade de representar a dinâmica hidrogeológica característica desses ambientes.

Inicialmente, foi avaliado o comportamento estatístico dos dados por meio do teste de normalidade de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965), amplamente utilizado para verificar a aderência de conjuntos amostrais à distribuição normal. Essa etapa teve como finalidade identificar os procedimentos estatísticos mais adequados para a comparação dos resultados dos diferentes métodos.

Considerando que aquíferos cársticos apresentam elevada heterogeneidade e anisotropia, decorrentes da interação sobretudo entre fraturas e condutos dissolvidos, é esperado que os parâmetros hidrodinâmicos apresentassem distribuições assimétricas e comportamento distinto daqueles observados em aquíferos homogêneos. Assim, o teste de normalidade foi empregado como ferramenta de diagnóstico estatístico, fornecendo subsídios para a escolha das análises subsequentes.

Nos casos em que a hipótese de normalidade for rejeitada, procedeu-se à aplicação do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis (Kruskal & Wallis, 1952), adequado para comparação entre grupos independentes. Esse procedimento permitiu avaliar se as diferenças observadas entre os métodos resultavam de variações estatisticamente significativas ou de flutuações aleatórias inerentes ao conjunto amostral, adotando-se nível de confiança de 95%.

Após a caracterização estatística dos resultados, foram aplicados e comparados os métodos desenvolvidos especificamente para ambientes cársticos, representados por Thrailkill (1988) e Bernard & Delay (2008). Essa etapa teve como objetivo identificar quais abordagens apresentavam maior coerência com o comportamento hidrogeológico regional e com o modelo conceitual atualmente aceito para os aquíferos carbonáticos da APA Carste de Lagoa Santa (De Paula, 2019; Dantas *et. al.,* 2024).

Uma vez definido o método considerado mais representativo para cada parâmetro analisado, procedeu-se à avaliação dos métodos clássicos amplamente difundidos na

literatura hidrogeológica, com destaque para Agarwal (1980) e Moench (1984). Nessa etapa, buscou-se verificar quais metodologias apresentavam maior proximidade estatística e conceitual em relação às abordagens específicas para o carste.

Considerando que parâmetros hidráulicos em sistemas cársticos frequentemente apresentam comportamento próximo ao log-normal, foi aplicada a transformação logarítmica em base 10 [log10(T) e log10(S)], com o objetivo de reduzir a dispersão dos dados, minimizar a influência de valores extremos e permitir comparações mais robustas entre os diferentes métodos (Freeze & Cherry, 1979).

A correspondência entre os métodos foi avaliada por meio de regressões lineares em escala log-log, permitindo quantificar o grau de associação entre os resultados, identificar possíveis tendências sistemáticas e verificar a viabilidade de conversão matemática entre as metodologias analisadas. A qualidade dos ajustes foi avaliada a partir dos coeficientes de correlação, coeficientes de determinação (R^2), análise dos resíduos e significância estatística.

Com base nos métodos cársticos considerados mais representativos e nos métodos clássicos que apresentaram maior aderência aos seus resultados, foram desenvolvidas equações de correção regional destinadas à conversão dos parâmetros estimados pelas abordagens convencionais para valores equivalentes aos obtidos pelas metodologias específicas para o carste.

As equações de correção seguem a forma genérica apresentada na Equação (17) e (18).

$$T_{Corrigido} = a * T_{Clássico} + b \qquad \text{Equação (17)}$$

$$S_{Corrigido} = a * S_{Clássico} + b \qquad \text{Equação (18)}$$

Onde:

$T_{Corrigido}$ e $S_{Corrigido}$ correspondem aos valores corrigidos de T e S, respectivamente; $T_{Clássico}$ e $S_{Clássico}$ representam os valores originalmente estimados pelos métodos convencionais; e os coeficientes a e b correspondem aos parâmetros ajustados pelas regressões.

A proposição dessas equações fundamenta-se na hipótese de que métodos originalmente desenvolvidos para aquíferos não cársticos podem apresentar

desempenho satisfatório quando calibrados a partir de metodologias concebidas especificamente para ambientes carbonáticos. Dessa forma, busca-se ampliar a aplicabilidade prática de abordagens amplamente utilizadas, sem desconsiderar as particularidades hidrogeológicas que controlam o comportamento dos aquíferos cársticos estudados.

Complementarmente às análises estatísticas, os resultados para os diferentes métodos foram avaliados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), visando verificar a coerência espacial dos parâmetros hidrodinâmicos estimados. Para isso, os valores de T e S foram integrados a informações geológicas, estruturais e geomorfológicas previamente disponíveis para a área de estudo, incluindo unidades litológicas, lineamentos estruturais, maciços carbonáticos, cavidades naturais, sumidouros e trajetórias de fluxo subterrâneo identificadas por estudos de traçadores. Essa etapa teve como objetivo verificar se a distribuição espacial dos parâmetros apresentava compatibilidade com os controles hidrogeológicos reconhecidos para a APA Carste de Lagoa Santa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Transmissividade (T)

Os resultados da aplicação dos métodos de Agarwal (1980), Moench (1984) e Thrailkill (1988), para T, encontram-se apresentados no Apêndice A.

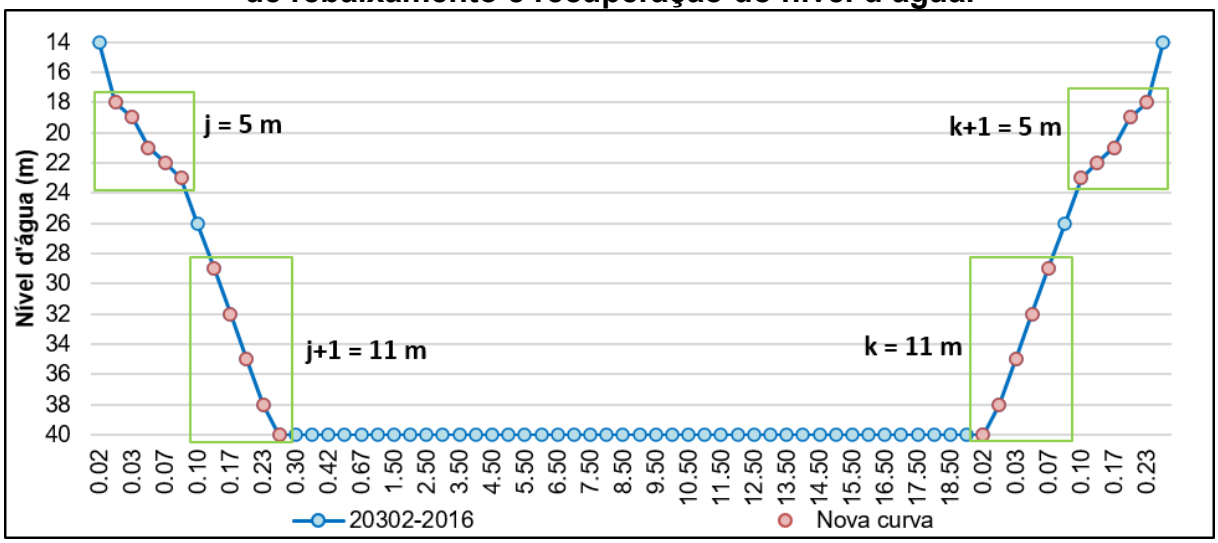
5.1.1 Aplicação do método de Thraikill (1988)

A aplicação do método de Thrailkill (1988), conforme recomendado pelo autor e detalhado no item referente à fundamentação teórica (Thrailkill (1988)), utilizou uma etapa adicional de tratamento dos dados, envolvendo a seleção de intervalos específicos da curva de rebaixamento e recuperação considerados mais representativos do comportamento hidráulico do aquífero.

O gráfico da Figura 11 ilustra esse procedimento para o poço 20302-2016, localizado no município de Lagoa Santa, o qual apresenta a curva original dos intervalos de rebaixamento e recuperação (em azul), obtidos a partir do teste de bombeamento, e os trechos equivalentes (j e k+1 = 5 m; j+1 e k = 11 m), representados pela denominada “Nova Curva”. A partir desses intervalos selecionados, foram calculados os parâmetros necessários à aplicação das equações propostas por Thrailkill (1988), conforme exemplificado na Tabela 2.

Os valores de T e S foram então obtidos por meio da interpretação segundo o modelo de Moench (1984), abordagem que, de acordo com Pena *et al.* (2024), apresenta desempenho satisfatório para aquíferos cársticos.

Figura 11 — Exemplo da aplicação do método de Thraikill (1988) em um dos poços compilados na área de estudo, com destaque para os novos intervalos de rebaixamento e recuperação do nível d'água.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 2 — Exemplo da aplicação do método de Thraikill (1988) em um dos poços compilados na área de estudo, com destaque para as equações propostas e parâmetros de validação.

Sigla	Parâmetro	Unidade	Bombeamento		Recuperação		OBS
			(i, j)	(i, j+1)	(i+1, k)	(i+1, k+1)	
Rp	Taxa bombeamento	m³/h	14.09	13.64	0.00	0.00	Input
Db	Rebaixamento inicial	m	18.00	29.00	40.00	23.00	Input
Tb	Tempo inicial	h	0.03	0.13	0.02	0.10	Input
De	Rebaixamento final	m	23.00	40.00	29.00	18.00	Input
Te	Tempo final	h	0.08	0.27	0.07	0.23	Input
H	Dif. carga hidr poço e subaq	m	5.00	11.00	11.00	5.00	TRUE
Rd	Taxa de rebaixamento	m³/h	85.71	82.50	-220.00	-37.50	Eq. (2)
Ri	Taxa de influxo no poço	m³/h	4.29	9.92	9.92	4.29	Eq. (8 e 9)
Aw	Área do poço	m²	0.11	0.05	0.05	0.11	Eq. (11 e 12)
Ri	Taxa de influxo no poço	m³/h	4.29	9.92	9.92	4.29	Eq. (1)
E	Expoente de fluxo turbulento	-			0.54		Solver
E	Expoente de fluxo turbulento	-			0.32		Eq. (10)
Ci	Coeficiente de Influxo	-	0.84	1.47	1.47	0.84	Eq. (13)
Ri	Taxa de influxo no poço	m³/h	4.29	9.92	9.92	4.29	Eq. (6)
Ri	Taxa de influxo no poço	-	2.00	5.36	5.36	2.00	Eq. (3)
dS/dt	Taxa de armazenamento no poço	m³/h	9.80	3.72	3.72	9.80	Eq. Geral

Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.2 Avaliação estatística dos métodos

A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros estatísticos descritivos dos valores de T obtidos pelos métodos de Thrailkill (1988), Agarwal (1980) e Moench (1984). Foram avaliados os valores mínimo, máximo, média aritmética, média geométrica, mediana,

desvio-padrão e variância, permitindo uma análise comparativa da distribuição dos resultados produzidos por cada metodologia.

Os testes de normalidade indicaram que os conjuntos de dados não seguem distribuição normal, apresentando valores de p inferiores ao nível de significância adotado no teste de Shapiro-Wilk (1965). Esse resultado demonstra que os valores de T apresentam distribuição assimétrica, com ocorrências que influenciam as medidas de tendência central. O teste não paramétrico de Kruskal-Wallis (1952) indicou diferenças estatísticas entre os grupos, evidenciando que os conjuntos de dados não podem ser considerados provenientes de uma mesma população estatística.

Essa característica também pode ser observada pela diferença entre média aritmética, média geométrica e mediana. Para os três métodos analisados, as médias aritméticas apresentaram valores superiores às medianas, indicando distribuições com assimetria positiva. Da mesma forma, as médias geométricas mostraram-se inferiores às médias aritméticas, evidenciando a influência de valores elevados sobre a distribuição dos dados e sugerindo comportamento próximo ao log-normal.

A amplitude observada entre os valores mínimos e máximos também foi expressiva para todos os métodos. Os desvios-padrão e variâncias calculados reforçam esse comportamento, indicando considerável variabilidade entre os valores estimados de T.

Tabela 3 — Transmissividade (m²/s) obtida para os 3 métodos propostos.

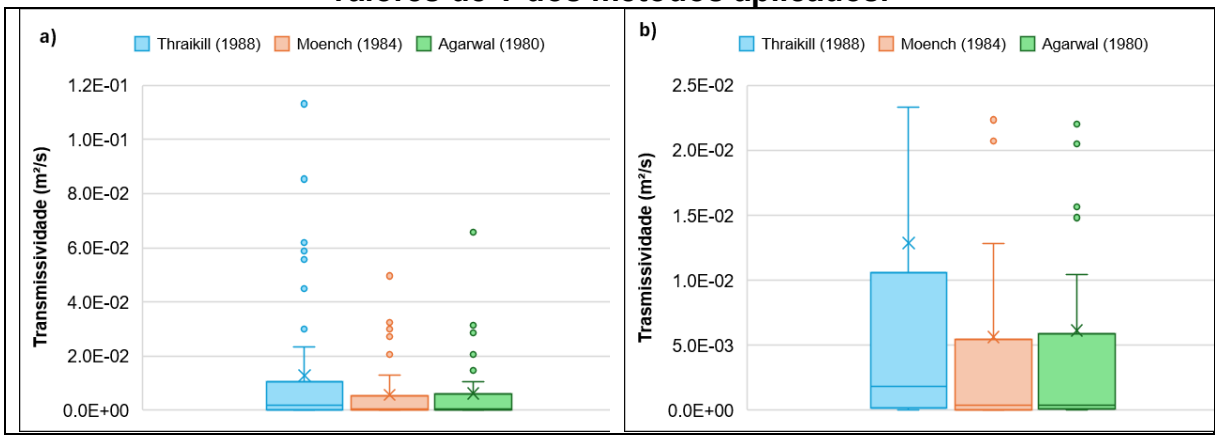
Estatística T (m²/s)	Thrailkill (1988)	Moench (1984)	Agarwal (1980)
Média	1.29E-02	5.64E-03	6.15E-03
Mediana	1.82E-03	4.02E-04	4.05E-04
Média Geométrica	1.40E-03	4.05E-04	6.02E-04
Máximo	1.13E-01	4.96E-02	6.59E-02
Mínimo	1.04E-05	8.68E-07	5.42E-06
Desvio Padrão	2.43E-02	1.09E-02	1.21E-02
Variância	5.89E-04	1.18E-04	1.47E-04
Poços analisados	51	51	51

Fonte: Elaborado pela autora.

O gráfico *boxplot* da Figura 12, evidencia que Thrailkill (1988), de forma sistemática, apresentou os maiores valores de T, resultando também nas maiores médias,

medianas e amplitudes. esse comportamento. Diferentemente das abordagens clássicas, Thrailkill (1988) não depende de hipóteses rígidas de homogeneidade do aquífero e permite a segmentação da curva de rebaixamento em diferentes intervalos temporais. Essa característica, somada à condição do método ter sido elaborado para ambientes carbonáticos, tende a identificar respostas hidráulicas distintas ao longo do teste de bombeamento, incluindo transições entre fluxo predominantemente fissural e fluxo controlado por condutos de elevada permeabilidade. Estima-se que, como consequência, estatisticamente o método demonstra maior sensibilidade às anisotropias e zonas de fluxo preferencial associadas aos condutos dissolvidos do sistema aquífero, permitindo distinguir de forma mais consistente a influência de zonas preferenciais de fluxo. Essa característica é particularmente relevante em aquíferos cársticos, onde T pode variar significativamente em função do grau de desenvolvimento dos condutos dissolvidos (Pessoa, 2005; De Paula *et. al.,* 2020; Pena *et. al.,* 2024).

Figura 12 — Variação estatística completa (a) e em escala reduzida (b) dos valores de T dos métodos aplicados.



Fonte: Elaborado pela autora.

O método de Agarwal (1980) apresentou desempenho consistente e resultados estatisticamente semelhantes aos determinados por Thrailkill (1988) (Figura 12). Embora não represente explicitamente os processos associados aos condutos cársticos em função das premissas do método, sua aplicação sobre dados de recuperação reduz a influência de instabilidades observadas durante o bombeamento e tende a produzir estimativas robustas de T efetiva do entorno do poço. Dessa forma, mostrou-se uma alternativa mais passível de correlação matemática com o método de Thrailkill (1988).

Por outro lado, o método de Moench (1984) apresentou tendência à obtenção de valores mais conservadores e estatisticamente mais diferentes aos obtidos por Thraikill (1988) (Figura 12). Embora apresente consistência matemática, sua formulação não permite discriminar, de forma explícita, os efeitos associados ao fluxo preferencial em condutos dissolvidos, fraturas e matriz rochosa. Essa limitação pode introduzir incertezas na interpretação das condições hidráulicas locais, mesmo que estudos anteriores mostrem que a contribuição da matriz, no contexto da APA Carste, seja secundária em relação às estruturas de maior permeabilidade (Pessoa, 2005; Pena *et al.*, 2024).

5.1.3 Distribuição espacial da transmissividade

De maneira geral, Thrailkill (1988) e Agarwal (1980) apresentaram padrões espaciais semelhantes (Figura 13), indicando coerência regional entre as interpretações e reforçando a influência dos principais controles geológicos e estruturais sobre a distribuição de T. Apesar das diferenças observadas nas magnitudes dos valores estimados, as áreas classificadas como de maior e menor potencial hidráulico permaneceram espacialmente consistentes entre os dois métodos.

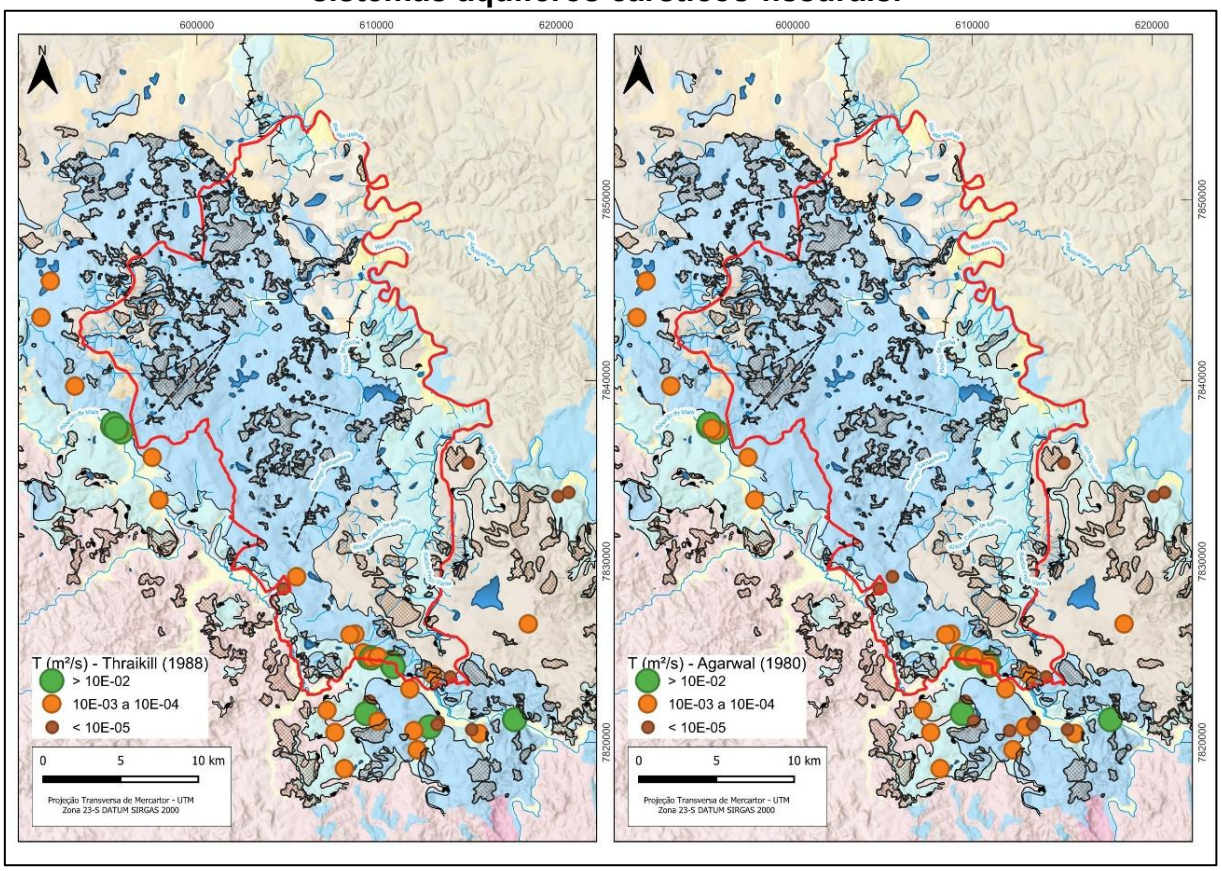
Os maiores valores concentram-se predominantemente sobre as unidades carbonáticas da Formação Sete Lagoas, com destaque para os domínios associados ao Membro Lagoa Santa e, localmente, ao Membro Pedro Leopoldo. Essas regiões coincidem com setores reconhecidamente mais carstificados da APA, caracterizados pela elevada densidade de cavidades naturais, ocorrência de sumidouros, presença de rotas de fluxo subterrâneo comprovadas por traçadores e expressiva conectividade hidráulica regional (Auler, 1994; Velásquez *et al.,* 2018; Teodoro *et al.,* 2019; Dantas *et al.,* 2024).

Observa-se ainda que diversos poços com os maiores valores de T encontram-se próximos aos principais maciços carbonáticos mapeados nas porções oeste e sul da área de estudo, com destaque para as bacias Jaguara e Jaguara-Samambaia (Figura 8). Nesses setores, a dissolução preferencial ao longo de descontinuidades estruturais favoreceu o desenvolvimento de condutos de elevada capacidade hidráulica, capazes de transmitir grandes volumes de água subterrânea (De Paula, 2019).

Além da influência litológica, os resultados evidenciam importante controle estrutural sobre a distribuição espacial de T. Destaca-se, particularmente, a presença de uma

estrutura linear de direção predominante norte-sul na porção oeste da APA, coincidente com o alinhamento do Ribeirão da Mata e sua conexão com o Córrego do Urubu (Figura 7). Os maiores valores de T observados no estudo concentram-se justamente ao longo desse corredor estrutural, sugerindo que falhas e zonas de fraturamento exerceram papel fundamental na condução dos processos de carstificação e no desenvolvimento das principais rotas de fluxo subterrâneo.

Figura 13 — Mapas de distribuição de transmissividade a partir dos métodos de Thraikill (1988) e Agarwal (1980), em poços que interceptam exclusivamente sistemas aquíferos cársticos-fissurais.



Fonte: Elaborado pela autora.

Esse comportamento é consistente com modelos conceituais de aquíferos cársticos estruturados, nos quais a evolução dos condutos ocorre preferencialmente ao longo de descontinuidades geológicas preexistentes (De Paula, 2019; Dantas *et. al.,* 2024). Nessas condições, T passa a refletir não apenas as características litológicas da rocha carbonática, mas também o grau de conectividade promovido pelas estruturas tectônicas e pelos processos de dissolução associados.

Por outro lado, os menores valores de T concentram-se principalmente em áreas periféricas da APA, associadas a setores menos carstificados ou com menor

densidade de estruturas favoráveis à circulação subterrânea. Nessas regiões, o fluxo tende a ocorrer predominantemente por meio da rede de fraturas de menor abertura, resultando em menor conectividade hidráulica e menor capacidade de transmissão de água subterrânea.

Em conjunto, os resultados indicam que a distribuição espacial de T na APA Carste de Lagoa Santa é controlada por uma combinação de fatores litológicos, estruturais e cársticos, destacando-se a influência das unidades carbonáticas da Formação Sete Lagoas, das zonas de fraturamento regional e dos principais corredores de circulação subterrânea identificados por estudos de traçadores. Tais evidências reforçam a interpretação de que os maiores valores de T estão diretamente associados ao desenvolvimento de condutos cársticos e à presença de zonas preferenciais de fluxo estruturalmente controladas.

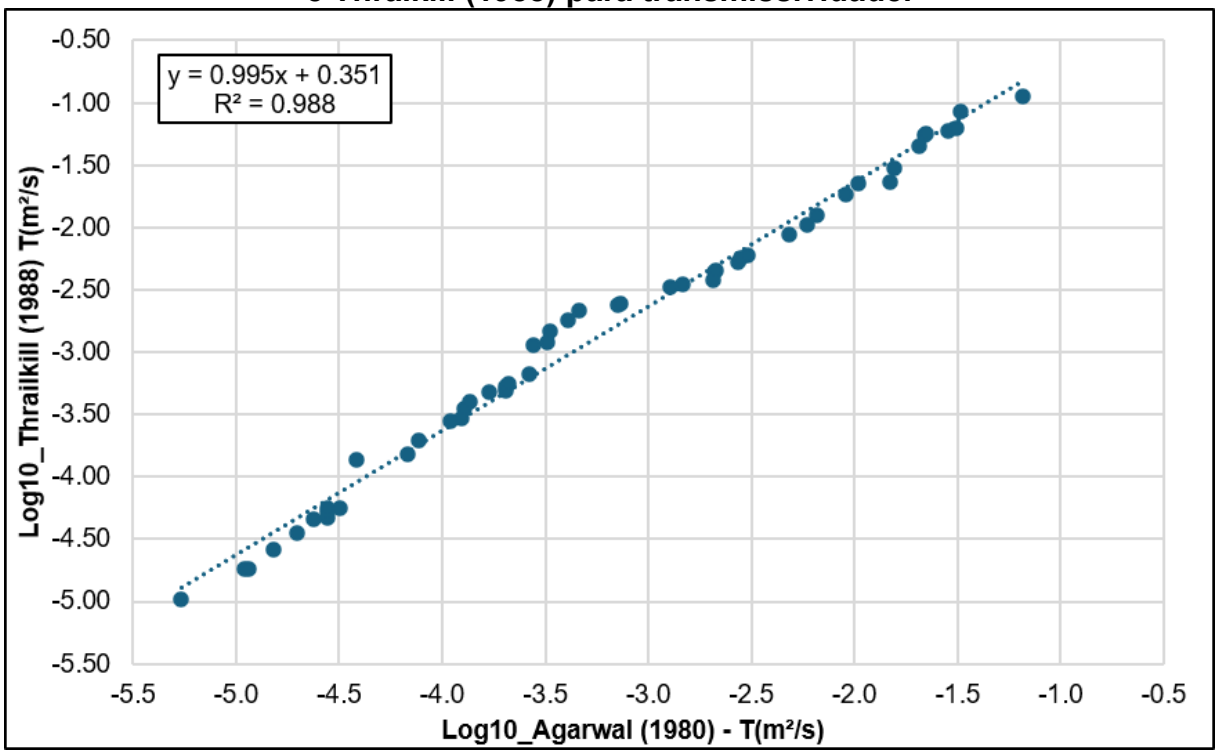
5.1.4 Correlação entre os métodos e proposição de equação de conversão

Considerando a melhor aderência hidrogeológica observada para o método de Thrailkill (1988) e o desempenho estatístico consistente apresentado pelo método de Agarwal (1980), procedeu-se à avaliação da relação matemática entre ambos os conjuntos de resultados. Para essa análise foram utilizados os valores transformados em escala logarítmica, procedimento que proporcionou melhor ajuste estatístico e reduziu a influência dos valores extremos, característica comum em parâmetros hidráulicos de aquíferos cársticos.

A regressão log-log indicou forte relação linear entre os métodos, apresentando coeficiente de correlação (r) igual a 0.98 e coeficiente de determinação (R^2) próximo de 0.99 (Figura 14). Esses resultados demonstram elevada coerência entre as estimativas produzidas pelos dois métodos, indicando que ambos respondem, de maneira geral, aos mesmos controles hidrogeológicos regionais.

Entretanto, apesar da forte correlação observada, os resultados não são diretamente equivalentes. Ao longo de toda a distribuição dos dados, verificou-se que os valores obtidos por Agarwal (1980) permanecem sistematicamente inferiores aos estimados por Thrailkill (1988), evidenciando a existência de um viés metodológico associado às diferentes premissas conceituais empregadas por cada abordagem.

Figura 14 — Análise de regressão log-log entre os métodos de Agarwal (1980) e Thraikill (1988) para transmissividade.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com base no ajuste obtido, foi proposta a Equação (19), destinada à conversão dos valores de T estimados pelo método de Agarwal (1980) em valores equivalentes aos obtidos por Thrailkill (1988) para as condições hidrogeológicas da APA Carste de Lagoa Santa.

$$T_{Corrigido} = 0.995 * \left(T_{Agarwal}\right) + 0.351 \qquad \text{Equação (19)}$$

A elevada qualidade do ajuste sugere que as diferenças entre os métodos possuem caráter predominantemente sistemático e previsível, possibilitando a utilização da equação como ferramenta de calibração regional. Dessa forma, resultados dos métodos clássicos podem ser convertidos para valores compatíveis com abordagens desenvolvidas especificamente para sistemas cársticos, ampliando o potencial de integração entre bases de dados produzidas por diferentes metodologias.

Contudo, a aplicação dessa equação deve ser realizada com cautela. Um dos parâmetros fundamentais do método de Thrailkill (1988) corresponde à área de conduto (Aw), variável diretamente relacionada ao grau de desenvolvimento da carstificação. No presente estudo, os valores de Aw foram obtidos por meio de calibração e baseada nos dados apresentados por Rodrigues (2023), resultando em intervalos variando entre 0 e 350 m² para os 51 poços analisados (Apêndice A).

Dessa forma, recomenda-se que a aplicação da equação de conversão permaneça restrita a aquíferos e condições hidrogeológicas compatíveis com aquelas avaliadas neste trabalho, especialmente dentro do intervalo de valores de Aw utilizado durante o processo de calibração. A extrapolação para sistemas cársticos com características significativamente distintas pode introduzir incertezas adicionais e comprometer a representatividade das estimativas obtidas.

5.2 Coeficiente de Armazenamento (S)

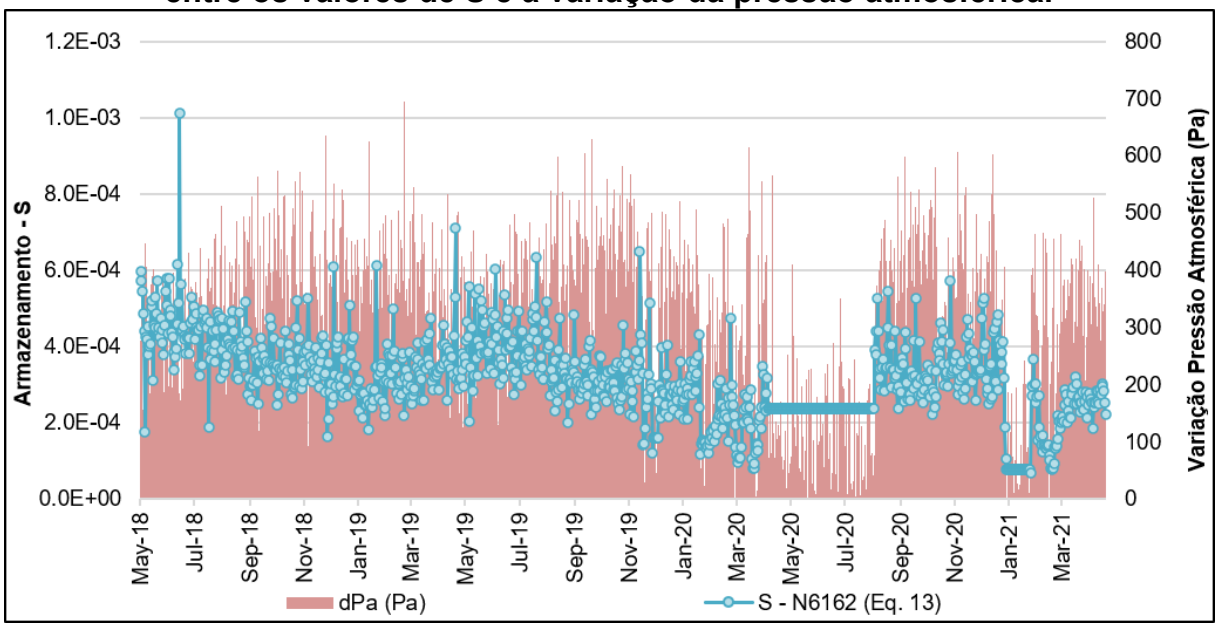
Os resultados da aplicação dos métodos de Moench (1984), Agarwal (1980), Thrailkill (1988) e Bernard & Delay (2008), para S, encontram-se apresentados no Apêndice B.

5.2.1 Aplicação do método de Bernard & Delay (2008)

A aplicação do método de Bernard & Delay (2008), conforme recomendado pelo autor e detalhado no item referente à fundamentação teórica (Bernard & Delay (2008)), utilizou uma etapa adicional de tratamento dos dados, envolvendo *softwares* específicos.

O gráfico da Figura 15 apresenta um exemplo da aplicação do método no poço N6162, localizado no município de Funilândia, o qual evidencia um comportamento inversamente proporcional entre as variações da pressão atmosférica (dPa) e os valores de S estimados. Dessa forma, estima-se que aquíferos confinados ou semiconfinados podem apresentar resposta mensurável às oscilações barométricas, permitindo a obtenção de parâmetros hidráulicos a partir da análise dessa interação.

Figura 15 — Exemplo da aplicação do método de Bernard & Delay (2008) em um dos poços compilados na área de estudo, com destaque para a correlação entre os valores de S e a variação da pressão atmosférica.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.2 Avaliação estatística dos métodos

Assim como observado para T, os testes de normalidade aplicados aos valores de S indicaram que os dados não seguem distribuição normal para nenhum dos métodos avaliados, conforme demonstrado pelo teste de Shapiro-Wilk (1965). Complementarmente, o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis (1952) indicou diferenças estatisticamente significativas entre os métodos analisados, evidenciando que os resultados não podem ser considerados provenientes de uma mesma população estatística.

Os parâmetros descritivos apresentados na Tabela 4 revelam diferenças expressivas entre média, mediana e média geométrica para a maior parte dos métodos avaliados, indicando distribuições assimétricas e forte influência de valores extremos. Esse comportamento é compatível com o padrão esperado para aquíferos cársticos, nos quais S é controlado por uma combinação complexa de fraturas, condutos dissolvidos e, em menor escala, pela matriz rochosa (De Paula, 2019).

Importante destacar que o método de Bernard & Delay (2008) apresentou menor discrepância entre as medidas de tendência central e menor dispersão estatística em relação a Thraikill (1988). Apesar da menor quantidade de observações disponíveis para Bernard & Delay (2008), observa-se que seus resultados se concentram predominantemente em torno da ordem de grandeza de 10^{-4}, com a menor dispersão

estatística e reduzida influência de valores extremos. Por outro lado, Thraikill (1988) apresenta valores significativamente menores, frequentemente próximos a 10^{-10}. Essa diferença sugere que o método baseado em séries históricas de longo prazo tende a produzir estimativas mais suavizadas e possivelmente mais representativas do comportamento hidráulico regional do aquífero. No entanto, entre 10^{-4} e 10^{-3}, ambos os métodos se apresentam muito semelhantes.

Tabela 4 — Armazenamento (S) obtido a partir de 4 métodos.

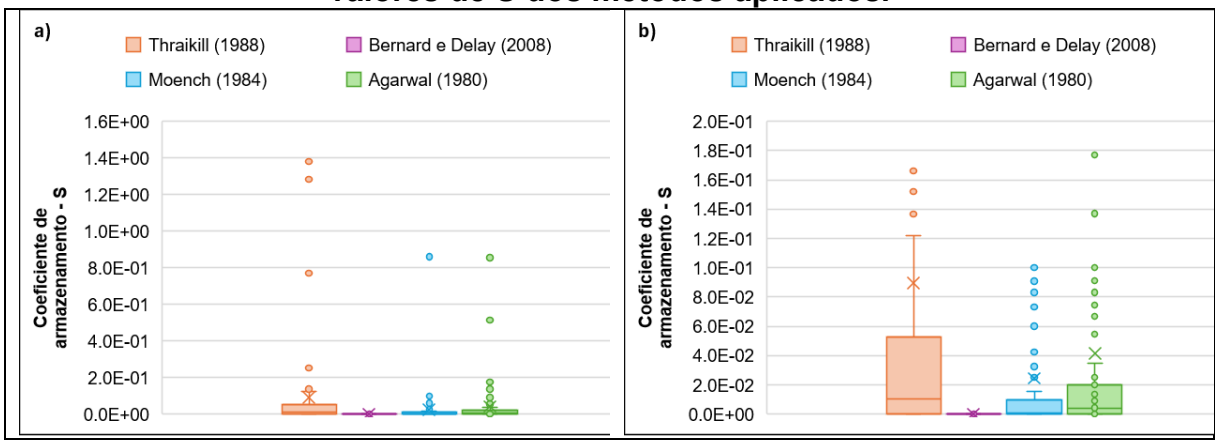
Estatística T (m²/s)	Thrailkill (1988)	Bernard & Delay (2008)	Moench (1984)	Agarwal (1980)
Média	1.11E-01	4.01E-04	3.02E-02	5.13E-02
Mediana	1.84E-02	2.17E-04	1.18E-03	7.35E-03
Média Geométrica	2.88E-03	2.17E-04	1.09E-04	5.85E-04
Máximo	1.38E+00	1.54E-03	8.60E-01	8.54E-01
Mínimo	1.50E-10	1.40E-05	1.00E-16	1.00E-10
Desvio Padrão	2.74E-01	4.38E-04	1.20E-01	1.39E-01
Variância	7.49E-02	1.92E-07	1.44E-02	1.93E-02
Poços analisados	51	12	51	51

Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, estima-se que os valores abaixo de 10^{-5} nos métodos baseados exclusivamente em testes de bombeamento podem refletir maior sensibilidade às condições específicas do ensaio, às características construtivas dos poços e às heterogeneidades locais do sistema aquífero.

O gráfico da Figura 16 apresenta a distribuição dos valores de S no formato de *boxplot*. O método de Agarwal (1980) apresentou maior dispersão estatística, refletindo sensibilidade às heterogeneidades locais e às anisotropias do sistema. Entretanto, seus resultados permaneceram relativamente próximos aos obtidos por Thrailkill (1988) e Bernard & Delay (2008) ao longo da maior parte da série analisada. Essa característica sugere que o método é capaz de representar adequadamente as condições de S associadas ao meio carbonático, mesmo não tendo sido originalmente concebido para aquíferos cársticos. A diferença observada entre média e mediana reforça a presença de distribuições assimétricas e a ocorrência de valores extremos, enquanto a ampla amplitude entre valores mínimos e máximos evidencia a forte influência da heterogeneidade estrutural do sistema aquífero. Esse comportamento é compatível com ambientes onde S ocorre predominantemente em fraturas e condutos dissolvidos, os quais apresentam distribuição espacial altamente irregular (De Paula, 2019).

Figura 16 — Variação estatística completa (a) e em escala reduzida (b) dos valores de S dos métodos aplicados.



Fonte: Elaborado pela autora.

Por outro lado, embora o método de Moench (1984) tenha apresentado maior estabilidade estatística, sua interpretação hidrogeológica exige cautela. O modelo de dupla porosidade não permite distinguir explicitamente quais compartimentos estão contribuindo para S observado. Embora estudos anteriores indiquem que, no contexto do aquífero cárstico do Grupo Bambuí, S na matriz seja pouco significativo em comparação com fraturas e condutos (Pena *et al.,* 2024), não é possível afirmar com segurança que os valores estimados representem efetivamente a interação entre esses dois domínios hidráulicos.

5.2.3 Distribuição espacial do armazenamento

Apesar de Bernard & Delay (2008) ter apresentado valores médios mais estáveis, optou-se por considerar Thrailkill (1988) como principal referência para a interpretação regional de S. Essa escolha fundamenta-se na maior quantidade de dados disponíveis e a proximidade observada entre os resultados de ambos os métodos na faixa de valores mais representativa do aquífero.

Vale reforçar, no entanto, que os resultados de Bernard & Delay (2008) indicam elevado potencial para aplicações em monitoramento hidrogeológico de longo prazo. Isso ocorre porque a metodologia se baseia na resposta do aquífero às variações da pressão atmosférica, permitindo estimativas menos influenciadas pelas perturbações locais associadas aos testes de bombeamento.

Considerando conjuntamente os resultados estatísticos, a quantidade de dados disponíveis, os fundamentos conceituais dos métodos e sua coerência com o modelo hidrogeológico regional, entende-se que Agarwal (1980) representa a abordagem

clássica mais representativa de correlação com Thrailkill (1988) para a estimativa de S na APA Carste de Lagoa Santa.

A distribuição espacial dos valores de S pelos métodos de Agarwal (1980) e Thrailkill (1988) evidencia elevada variabilidade ao longo da área de estudo, refletindo a complexidade hidráulica característica dos sistemas aquíferos cársticos e cárstico-fissurais da região central de Minas Gerais (Figura 17).

As diferenças observadas entre valores mínimos e máximos reforçam a interpretação de que S apresenta comportamento espacialmente heterogêneo (De Paula, 2019), refletindo a distribuição irregular das estruturas responsáveis pela acumulação e circulação da água subterrânea.

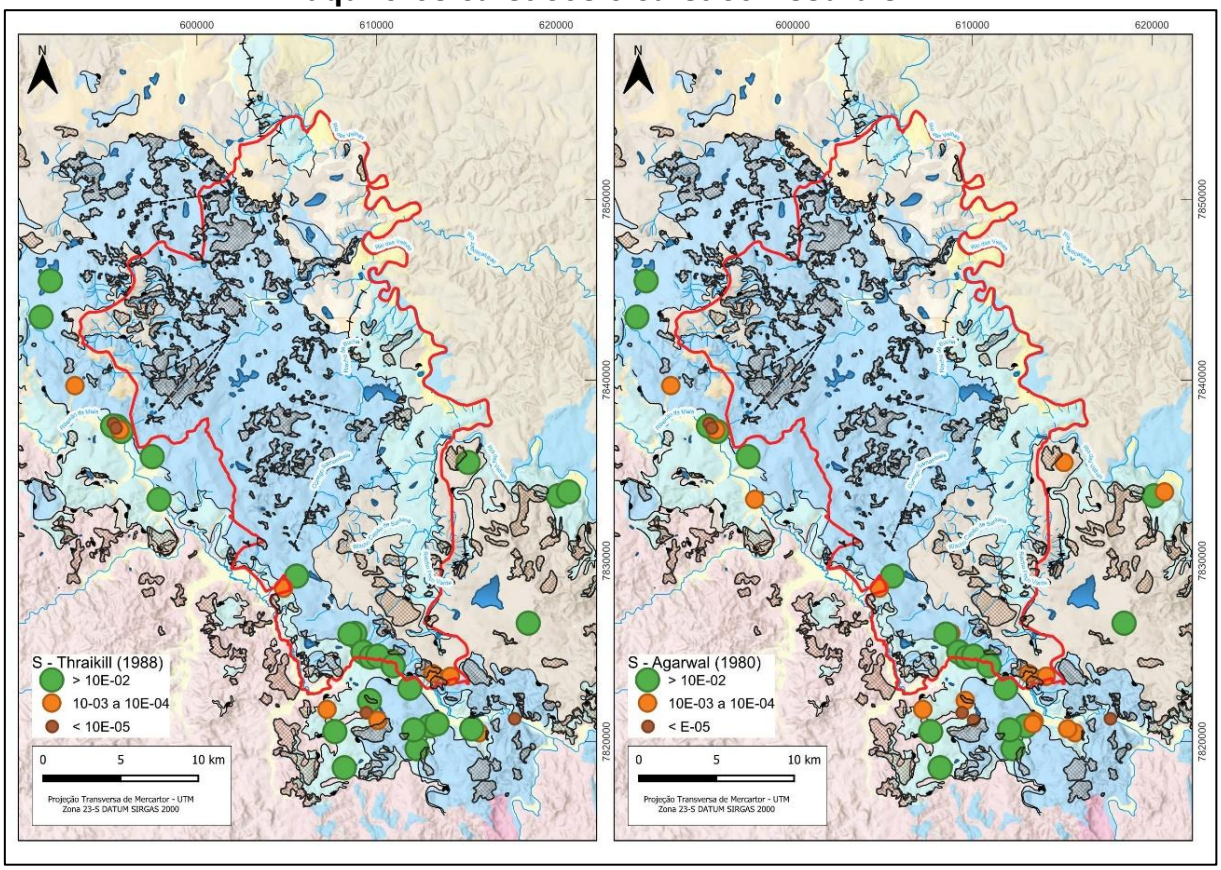
De forma geral, os métodos apresentaram padrões espaciais semelhantes, com predominância dos maiores valores associados às unidades carbonáticas da Formação Sete Lagoas e aos setores caracterizados por maior densidade de feições cársticas. Observa-se forte correspondência espacial entre os maiores valores de S, a ocorrência de cavidades naturais, sumidouros e as principais trajetórias de fluxo subterrâneo previamente identificadas por estudos de traçadores.

Os maiores valores concentram-se principalmente nos setores centrais próximos a Matozinhos, na porção sul e sudeste da área de estudo, abrangendo regiões de Lagoa Santa, Vespasiano e São José da Lapa, bem como nas proximidades das principais drenagens regionais. Esse comportamento sugere maior S associada a zonas de intensa carstificação e elevada conectividade estrutural, onde ocorre maior desenvolvimento de vazios secundários e condutos dissolvidos.

A coincidência espacial entre elevados valores de S e rotas de traçadores reforça a hipótese de forte conectividade hidráulica subterrânea nesses setores, indicando que parcela significativa de S está associada à interação entre fraturas interconectadas e condutos cársticos.

Os menores valores concentram-se predominantemente em áreas periféricas da APA, em setores menos carstificados e em domínios associados ao embasamento cristalino e às coberturas detríticas. Nesses locais, a menor conectividade hidráulica limita os valores de S do sistema aquífero.

Figura 17 — Mapas de distribuição de S a partir dos métodos de Thraikill (1988) e Agarwal (1980), em poços que interceptam exclusivamente sistemas aquíferos cársticos e cárstico-fissurais.



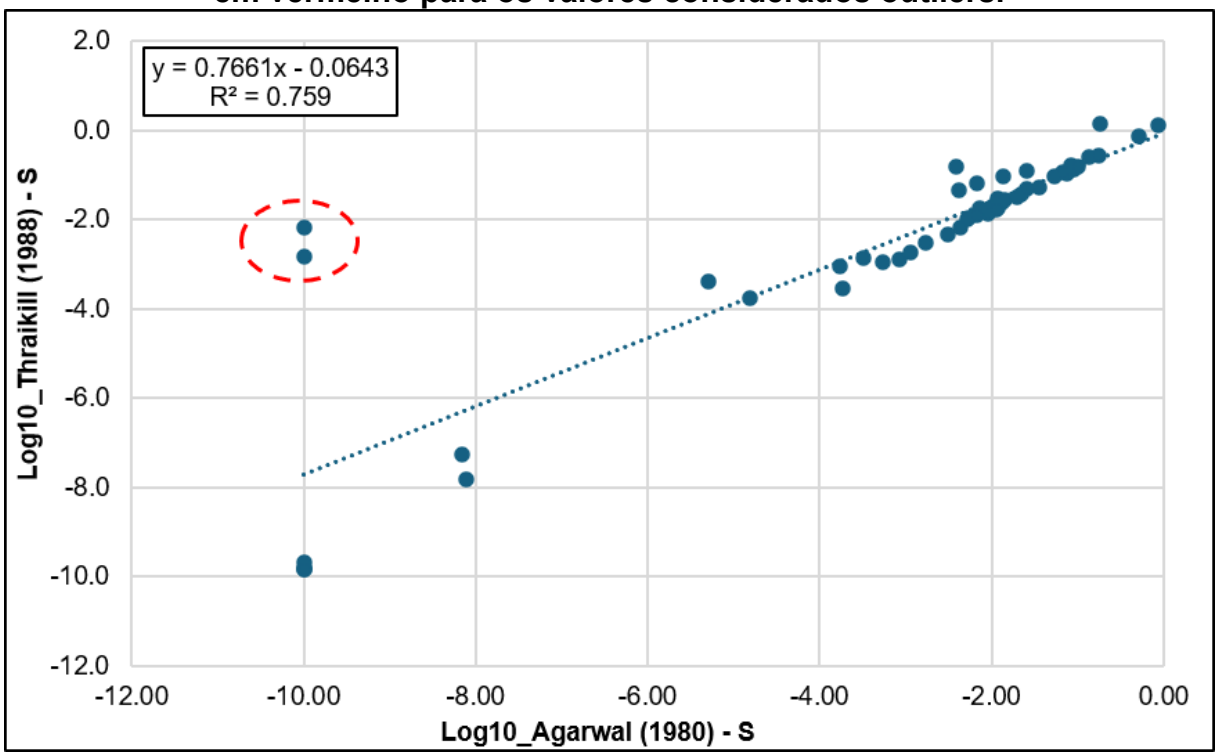
Fonte: Elaborado pela autora.

Comparativamente, o método de Thrailkill (1988) apresentou distribuição espacial mais heterogênea e maior amplitude dos valores estimados, destacando com maior intensidade as áreas associadas às zonas de maior desenvolvimento cárstico. Esse comportamento reforça a maior sensibilidade do método frente às heterogeneidades hidráulicas e aos sistemas de fluxo preferencial característicos dos aquíferos carbonáticos da APA Carste de Lagoa Santa.

5.2.4 Correlação entre os métodos e proposição de equação de conversão

A correlação inicial entre os valores reais de S apresentou coeficiente de correlação positivo (r = 0.83), enquanto a regressão log-log resultou em coeficiente de determinação (R^2) de aproximadamente 0.76 (Figura 18). Entretanto, a análise gráfica revelou a presença de valores discrepantes, representados pelos *outliers* destacados em vermelho, que se afastavam em pelo menos uma ordem de grandeza da tendência principal observada.

Figura 18 — Análise de regressão log-log antes das análises e remoção de *outliers* entre os métodos de Agarwal (1980) e Thraikill (1988) para S. Destaque em vermelho para os valores considerados outliers.



Fonte: Elaborado pela autora.

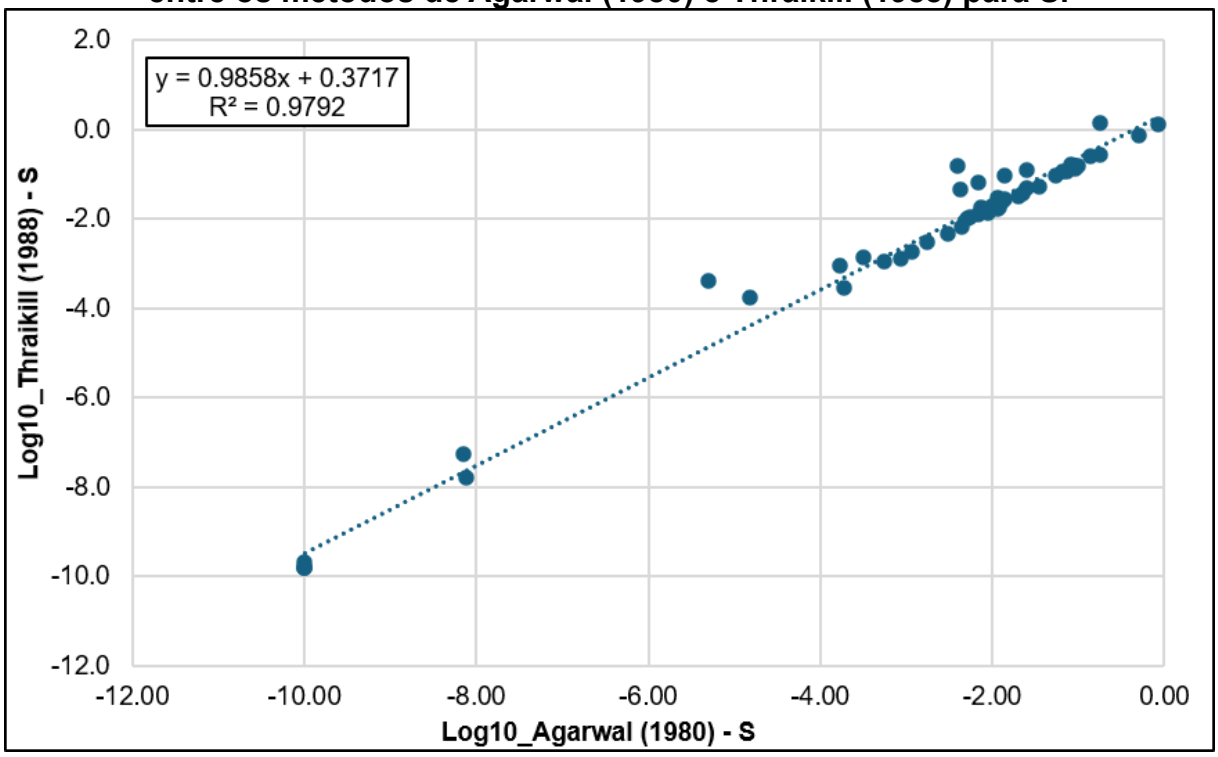
Esses desvios podem estar associados a interferências hidráulicas entre poços, problemas operacionais durante os testes de bombeamento, características construtivas específicas ou, mais provavelmente, à influência de compartimentos locais de S associados a fraturas isoladas. Observa-se que a maior parte desses desvios ocorre justamente nas menores ordens de grandeza de S, onde pequenas variações nas condições locais tendem a produzir diferenças significativas nos resultados estimados.

Após a remoção desses valores, a regressão apresentou melhora substancial do ajuste, mantendo coeficiente de correlação próximo de 0.83 e elevando o coeficiente de determinação para aproximadamente 0.98 (Figura 19). Esse resultado evidencia elevada coerência regional entre os métodos, indicando que ambos respondem aos mesmos controles hidrogeológicos predominantes na área de estudo.

Diferentemente do observado para T, S apresentou maior sensibilidade às heterogeneidades locais do sistema aquífero. Essa característica decorre do fato de que o parâmetro está diretamente relacionado aos mecanismos de S distribuídos entre fraturas, cavidades e condutos dissolvidos, tornando-se mais suscetível às

diferenças conceituais existentes entre as soluções analíticas empregadas pelos diferentes métodos. Já T, por sua vez, relaciona-se diretamente à velocidade de circulação da água nesses condutos, de modo que a combinação entre ambos os parâmetros permite compreender como o carste responde às variações de recarga e descarga, justificando a necessidade de métodos específicos para ambientes altamente heterogêneos.

Figura 19 — Análise de regressão log-log após análises e remoção de *outliers* entre os métodos de Agarwal (1980) e Thraikill (1988) para S.



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da regressão ajustada foi proposta a Equação (20), destinada à conversão regional dos valores de S obtidos por Agarwal (1980) para valores equivalentes aos estimados por Thrailkill (1988).

$$S_{Corrigido} = 0.9858 * S_{Agarwal} + 0.3717 \qquad \text{Equação (20)}$$

Ressalta-se, ainda, que diferente da correlação dos dados de T, a equação proposta para S não depende diretamente da calibração dos valores da área do conduto (Aw).

6 CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que os parâmetros hidrodinâmicos apresentam comportamento estatístico compatível com a elevada heterogeneidade e anisotropia características dos sistemas cársticos. Tanto para T quanto para S, os testes de normalidade indicaram distribuições não normais, evidenciando que a variabilidade observada está diretamente relacionada à influência de fraturas, condutos dissolvidos e diferentes graus de carstificação presentes no aquífero.

Para T, os resultados indicaram que o método de Thrailkill (1988), com intervalo entre 10^{-2} e 10^{-3}, foi o mais representativo. Sua capacidade de identificar diferentes respostas hidráulicas ao longo dos testes de bombeamento permitiu maior sensibilidade às anisotropias do sistema e melhor representação das zonas de fluxo preferencial associadas aos condutos cársticos. Entre os métodos clássicos avaliados, Agarwal (1980) apresentou a melhor aderência aos resultados de Thrailkill (1988), demonstrando elevada coerência estatística e hidrogeológica. A forte correlação observada entre ambos possibilitou a proposição de uma equação de correção regional, permitindo a conversão de valores por um método clássico em estimativas compatíveis com uma abordagem desenvolvida especificamente para ambientes cársticos.

Para S, os resultados evidenciaram maior complexidade interpretativa, refletindo a influência simultânea de fraturas, condutos dissolvidos e, em menor escala, da matriz rochosa. O método de Bernard & Delay (2008) apresentou resultados consistentes, com intervalo médio de 10^{-4}, e destacou o potencial da utilização de séries históricas de monitoramento associadas à resposta barométrica dos aquíferos como ferramenta complementar para estimativa desse parâmetro. Entretanto, considerando a quantidade de dados disponíveis, a aplicabilidade regional e a coerência conceitual com o comportamento do sistema aquífero estudado, o método de Thrailkill (1988) mostrou-se a alternativa mais adequada para representar S em ambientes cársticos. Novamente, o método de Agarwal (1980) apresentou os resultados mais compatíveis entre as abordagens clássicas, possibilitando o estabelecimento de uma equação de conversão regional para esse parâmetro.

As análises espaciais reforçaram as interpretações estatísticas e hidrogeológicas. Os maiores valores de T e S concentraram-se predominantemente sobre as unidades

carbonáticas da Formação Sete Lagoas, em áreas associadas à elevada densidade de feições cársticas, cavidades naturais, sumidouros e trajetórias de fluxo subterrâneo previamente identificadas por estudos com traçadores.

Os resultados demonstram que métodos desenvolvidos especificamente para sistemas cársticos tendem a representar de forma mais adequada a realidade hidrogeológica da região quando comparados às abordagens clássicas tradicionalmente empregadas. Contudo, a elevada correlação observada entre os métodos permitiu demonstrar que técnicas convencionais amplamente utilizadas podem ser ajustadas por meio de equações de calibração regional, ampliando sua aplicabilidade em áreas carbonáticas e possibilitando o aproveitamento de bases de dados históricas produzidas sob diferentes metodologias. Além disso, é importante observar que os métodos utilizados foram aplicados considerando algumas premissas, como intervalos de condutos, os quais devem ser considerados como fator importante nos dados obtidos e, eventualmente, em possíveis replicações.

Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros ampliem a base de dados utilizada, incorporem novas séries temporais de monitoramento e explorem a aplicação das metodologias avaliadas em outras regiões cársticas do Grupo Bambuí. A expansão desse conhecimento permitirá refinar as equações propostas, reduzir incertezas associadas aos parâmetros hidrodinâmicos e fortalecer a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos em ambientes carbonáticos.

7 REFERÊNCIAS

Agarwal, R.G., 1980. A new method to account for producing time effects when drawdown type curves are used to analyze pressure buildup and other test data. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 20 pp. https://doi.org/10.2118/9289-MS.

Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, 7, 349-364.

Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A., 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais. SBG, Belo Horizonte, pp. 9-30.

Alkmim F.F. 2004. O que faz de um cráton um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: V. Mantesso-Net; A. Bartorelli; C.D.R. Carneiro; B.B. Brito Neves (orgs.) Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, p. 17–35.

Amaral, D. G. P. Análise do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas da região da APA Carste Lagoa Santa (MG). 2018. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

Amaral, D.G.P, Velásquez, L.N.M., Rodrigues, P.C.H. 2019. Comportamento hídrico das depressões cársticas da região de Lagoa Santa, MG. Rev. Águas Subterrâneas, 33, 2, 196-209.

Andrade, I. B.; Barbosa, J. A.; Ribeiro, C. G.; De Paula, R. S.; Velásquez, L. N. Relação hidráulica entre o Complexo Belo Horizonte e o Grupo Bambuí na porção sul da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Geonomos, p. 38–45, 2019.

Aragão, F.; Velásquez, L. N. M.; Galvão, P.; Castro Tayer, T.; Lucon, T. N.; Azevedo, Ú. R. Natural background levels and validation of the assessment of intrinsic vulnerability to contamination in the Carste Lagoa Santa Protection Unit, Minas Gerais, Brazil. Environmental Earth Sciences, v. 79, 2020.

Auler, A., 1994. Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos Pedro Leopoldo Karst, Brazil. Master's Thesis, Western Kentucky University, 110 p.

Bair, S., G.S. Roadcap. 1992. Comparison of flow models used to delineate capture zones of wells: Leaky-confined fractured-carbonate aquifer. Ground Water 30, no. 2: 199–211.

Barbosa, D.M.D., De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., Pena, M.A.C., 2024. Hydrogeochemistry of aquifers in the northern portion of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area and surroundings, state of Minas

Gerais, Brazil. Journal of South American Earth Sciences, 144, 105042. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105042.

Barker, J. A. A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock. Water resources research, Washington, v. 24, p. 1796-1804, 1988.

Bäumle, R., 2003. Geohydraulic Characterisation of Fractured Rock Flow Regimes: Regional Studies in Granite and Dolomite. PhD Thesis, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany, 149 p.

Batista, R. C. B. Caracterização hidrogeológica do entorno do Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo (CNPMS) em Sete Lagoas – MG. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. 127 p.

Berbert-Born, M.L.C. 1998. Geoquímica dos Sedimentos Superficiais da Região Cárstica de Sete Lagoas-Lagoa Santa (MG), e os indícios de Interferências Antrópicas. DEGEO/UFOP. Dissertação de Mestrado.

Berbert-Born, M.L.C., 2002. Carste de Lagoa Santa, MG: Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In: Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil, vol. 1, Brasília.

Bernard, S., Delay, F., 2008. Determination of porosity and storage capacity of a calcareous aquifer (France) by correlation and spectral analyses of time series. Hydrogeology Journal, 16, 1299–1309.

Bogli, A. Geomorfologia cárstica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org.). Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994. p. 309–334.

Bredehoeft, J.D., 1967. Response of well-aquifer systems to earth tides. J. Geophys. Res., 72, 3075–3087.

Cabral, J.A.L. 1994. Informações Básicas para a Gestão Territorial; Inventário de Cavidades Naturais Região de Matozinhos Mocambeiro. Vol.1. Belo Horizonte, 121 p.

Carneiro, F. A. Modelagem hidrogeoquímica do sistema aquífero pelito carbonático existente no CNPMS da Embrapa Sete Lagoas, MG, Brasil. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. 338 p.

Cooper Jr., H. H.; Bredehoef, J. D., Papadopulos, S.S.; Bennett, R. R. 1965. The response of well-aquifer systems to seismic waves. Journal of Geophysical Research. https://doi.org/10.1029/JZ070i016p03915.

CPRM/IBAMA, 1998. Gestão ambiental – APA Carste de Lagoa Santa; organizado por Gisela Herrmann, Heinz Charles Kohler, Júlio César Duarte, Patrícia Garcia da S. Carvalho. – Belo Horizonte: IBAMA/Fund. BIODIVERSITAS/CPRM, 1998.

Custódio, E., Llamas, M.R., 1983. Hidrologia Subterrânea, 2nd ed. Omega, Barcelona.

Dantas, J.C.M., Velásquez, L.N.M., De Paula, R.S., 2023. Horizontal and vertical compartmentalization in the fissure and karstic aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area and surroundings, Minas Gerais, Brazil. Journal of South American Earth Sciences, 123, 104219.

Dantas, J.C.M., De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., Pereira, B.A., 2024. Groundwater flow modelling in Neoproterozoic carbonate karst based on dye tracer pathways. Journal of Hydrology. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131182.

Dardenne, M. A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. Anais. Recife: SBG, 1978. v. 2, p. 597–610.

Darnault, C. (2008). Overexploitation and contamination of shared groundwater resources. B.V.: Springer Science+business media.

Davis, S.N., DeWiest, R.J.M. 1966. Hydrogeology. New York: John Wiley, 463 p. Feitosa, F.A.C. 2008. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 3 ed. rev e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 812p.

De Paula, R. S. 2012. Modelagem Numérica De Fluxo Do Aquífero Cárstico-Fissural Do Grupo Bambuí, Bacia Do Riacho Boi Morto No Município De São Francisco, Norte De Minas Gerais. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. 140 p.

De Paula, R.S. 2019. Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. PhD Thesis, Federal University of Minas Gerais, 279 p. https://hdl.handle.net/1843/IGCC-BDFR23.

De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., 2019. Balanço hídrico em sistema hidrogeológico carstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais. Águas Subterrâneas, 33(2), 119–133. https://doi.org/10.14295/ras.v33i2.29252.

De Paula, R. S.; Velásquez, L. N. M. 2020. Method to complete flow rate data in automatic fluviometric stations in the karst system of Lagoa Santa area, MG, Brazil. Doi: https://doi.org/10.1590/2317-4889202020190031.

De Paula, R.S., Teixeira, G.M., Ribeiro, C.G., Silva, P.H.P., Silva, T.G.A., Vieira, L.C.M., Velásquez, L.N.M., 2020. Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero Carstico-Fissural da Região de Lagoa Santa, Minas Gerais. Águas Subterrâneas, 34(2), 221–235. https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29812.

Dias, F. S. Estudo do aquífero carbonático da cidade de Barroso (MG): uma contribuição à gestão do manancial subterrâneo. 2009. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. 94 p.

Diniz, H. N & Michaluate, W. J. (2002). Interpretação de testes de produção em poços tubulares profundos – dimensionamento e especificações de bombas submersas. Instituto Geológico. São Paulo. Bol. Inst. Geol n° 16. ISSN 0100-431X.

Feathers, J., Kipnis, R., Piló, L., Arroyo-Kalin, M., Coblentz, D., 2010. How old is Luzia? Luminescence dating and stratigraphic integrity at Lapa Vermelha, Lagoa Santa, Brazil. Geoarchaeology, 25(4), 395-436. https://doi.org/10.1002/gea.20316.

Feitosa, F. A. C., Manuel Filho, J., Feitosa, E. C., & Demetrio, J. G. A. (2008). Hidrogeologia: conceitos e aplicações (3rd ed.). CPRM: LABHID.

Field, M. S. The QTRACER2 program for tracer-breakthrough curve analysis for tracer tests in karstic aquifers and other hydrologic systems. Washington, D.C.: Environmental Protection Agency, 2002. 179 p.

Ford, D. C.; Williams, P. W. Karst geomorphology and hydrology. London: Unwin Hyman, 1989.

Ford, D. C., Williams, P. W. (1991). Karst geomorphology and hydrology. London: Chapman-Hall.

Ford, D.C., Williams, P.W., 2007. Karst Geomorphology and Hydrology, 2nd ed. John Wiley & Sons, Chichester, 562 p. https://doi.org/10.1002/9781118684986.

Freeze, R.A. & Cherry, J.A. 1979. Groundwater.Englewood Cliffs [Estados Unidos]: Prentice-Hall, xvi, 604 p.

Galvão, P.H.F., 2015. Modelo hidrogeológico conceitual de sete lagoas (mg) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões carsticas. PhD Thesis, Institute of Geosciences, USP, São Paulo.

Galvao, P., Todd, H., & Hirata, R. (2015). The karst permeability scale effect of Sete Lagoas, MG, Brazil. Journal of Hydrology, 532, 149–162.https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.026.

Goldscheider N.; Drew, D. (2007). Methods in Karst Hydrogeology. International Contributions to Hydrogeology, 26, Londres: Tay-lor & Francis.

Guerra, A. 1993. Dicionário geológico – geomorfológico (Vol. 8). Rio de Janeiro: IBGE.

Guareschi, V. D. Feições de carste sobre a Formação Serra Geral no município de São Martinho da Serra – RS. 2012. Dissertação (Mestrado em Geografia e Geociências) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

Hardt, R. Caracterização morfológica das cavernas Aroê-Jari, Lago Azul e Kiogo Brado – MT. In: Congresso Brasileiro De Espeleologia, 30., 2009. Anais (CD-ROM). São Paulo: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2009.

Herrmann, G.; Kohler, H. C.; Duarte, J. C.; Carvalho, P. G. S. (1998). APA Carste de Lagoa Santa – Gestão Ambiental. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, 57p.

IBGE, I. B. 2006. Mapa de unidades de relevo do Brasil. Escala 1:5.000.000. Brasília: IBGE

IEF – INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS. Plano de manejo do Parque Estadual do Sumidouro. Belo Horizonte: SEMAD, 2010.

Jones, W. K.; Hobbs, H. H. Iii; Wicks, C. M.; Currie, R. R.; Hose, L. D.; Kerbo, R. C.; Goodbar, J. R.; Trout, J. Recommendations and guidelines for managing caves on protected lands. Charles Town: Karst Waters Institute, 2003. (Special Publication, n. 8).

Karamouz M., Ahmadi A., Akhbari M. 2011. Groundwater Hydrology: Engineering, Planning, and Management. CRC Press. Taylor & Francis Group. 649 p.

King, L.C. 1956. A Geomorfologia do Brasil Oriental. Revista Brasileira de Geografia, 18, 2, 147–266.

Kohler, H.C.1978. A Evolução Morfogenética da Lagoa Santa - MG. Anais 30º Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, 1, 147-153.

Kohler, H.C., 1989. Geomorfologia Carstica na Região de Lagoa Santa - MG. PhD Thesis, FFLCH-USP, São Paulo, 113 p.

Köppen, W.; Geiger, R. Klimate der Erde. Gotha: Verlag Justus Perthes, 1928.

Kruseman, G. P.; Ridder, N. A. (1979). Analysis and evaluation of pumping test data. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Holanda. Bulletin 11, 200p.

Kruseman, G. P.; De Ridder, N. A. Analysis and evaluation of pumping test data. 2. Ed. Wageningen, The Netherlandas: international intitute for land reclamation and improvement, 1994. [400 p.]. Publication, 47).

Kruskal, W.H., Wallis, W.A., 1952. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. Journal of the American Statistical Association, 47(260), 583–621. https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441.

Legrand, H. E.; Lamoreaux, P. E. Hydrogeology and hydrology of karst. In: BURGER, A.; DUBERTRET, L. (ed.). Hydrogeology of karstic terrains. Paris: International Association of Hydrogeologists, 1975.

Machado, D.A. 2011. Caracterização hidrogeológica e vulnerabilidade natural das águas subterrâneas no entorno do Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo – Sete Lagoas/MG. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 230 p.

Magalhães, L. 1988. Análise Estrutural Qualitativa dos sedimentos do Grupo Bambuí, região da bacia do São Francisco (Faixa Sete Lagoas-Serra do Cipó). DEGEO/EM/UFOP, Ouro Preto. Dissertação de Mestrado, 109 p.

Manoel Filho, J. 2008. Ocorrência das águas subterrâneas. In: Feitosa, F. A. C. e Filho, J. M. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 3ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, p.53-75.

Mawlood, D. K., Ismail S. O. (2019). Comparison between Neuman and Dupuits for pumping test in water Tabel aquifer. ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences 31(3), 385–391.

Meneses, I. C. R. R. C. de. Análise geossistêmica na Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, MG. 2003. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003. 187 p.

Mesquita, D. C., Dantas, J. C. M., De Paula, R. S., Guerra, K. J. (2017). Estudo Dos Parâmetros Hidrodinâmicos Obtidos Em Ensaios De Campo Em Itabiritos Brandos Da Porção Sudoeste Do Quadrilátero Ferrífero, MG. Geonomos - v.25, n.2 (2017)

Milanović, P. Water resources engineering in karst. Boca Raton: CRC Press, 2004.

Moench, A.F., 1984. Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. Water Resour. Res., 20(7), 831-846.

Monroe, W. H. (comp.). A glossary of karst terminology. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, 1970. (Geological Survey Water-Supply Paper, 1899-K). 26 p.

Monteiro, R. C.; Ribeiro, L. F. B. Espeleogênese de cavernas areníticas: algumas considerações aplicadas à Província Espeleológica da Serra de Itaqueri, Estado de São Paulo, Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 13., 2001. Anais. Brasília: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2001.

Morais, F. Contexto geológico das cavernas em arenito do Estado do Tocantins. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30., 2009. Anais (CD-ROM). São Paulo: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2009.

Mourão, M. A. A.; Cruz, W. B.; Gonçalves, R. L. F. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da bacia hidrográfica do São Francisco. In: Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais. Belo Horizonte: SBG, 2001. p. 327–349.

Muldoon, M., Bradbury, K.R. (2005). Site characterization in densely fractured dolomite: comparison of methods. Ground Water. Nov-Dec;43(6):863-76. doi: 10.1111/j.1745-6584.2005.00091.x. PMID: 16324008.

Neto, W.M., De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., Meira, G., Pena, M.A.C., 2023a. Characterization and classification of lakes based on geospatial analyses in the karst hydrogeological system of the Bambuí group, Lagoa Santa, Minas Gerais, Brazil. Journal of South American Earth Sciences. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104662.

Neto, W.M., Teixeira, G.M., Pena, M.A.C., Da Silva, P.H.P., Uhlein, G.J., Menegasse, L.N.V., De Paula, R.S., 2023b. Avaliação da conectividade hidráulica entre os aquíferos cársticos na região APA Carste de Lagoa Santa e suas imediações, MG. Estudos Geológicos, 33(1), 18 p. https://hdl.handle.net/1843/76229.

Nimer, E. Climatologia do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 421 p.

Noce, C.M., Teixeira, W., Machado, N., 1997. Geoquímica dos gnaisses TTG e granitoides neoarqueanos do Complexo Belo Horizonte, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Revista Brasileira de Geociências, 27(1), 25-32. https://doi.org/10.25249/0375-7536.19972532.

Palmer, A. N. 1991. Origin and morphology of limestone caves. Geological Society of America Bulletin, Boulder, v. 103, n. 1, p. 1-21.

Pankow, J. F., Johnson R. L., Hewetson J. P., Cherry J. A. (1986). An evaluation of contaminant migration patterns at two waste disposal sites on fractured porous media in terms of the equivalent porous medium (EPM) model. J. Contaminant Hydrology 1(1):65–76.

Papadopulos, S.S.; Cooper Jr., H. H. Drawdown in a well of large diameter. Water Resources Research, v. 3, n. 1, p. 263-269, 1967. https://doi.org/10.1029/WR003i001p00263.

Pena, M.A.C., De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., Neto, W.M.P., 2024. Estimating transmissivity and storativity in a karst aquifer by direct and indirect methods. Hydrological Processes. https://doi.org/10.1002/hyp.15116.

Peñaranda Salgado, J.R., 2016. Condicionamento estrutural e litológico da porosidade cárstica da formação Sete Lagoas, Município de Sete Lagoas (MG). Master's Thesis, IGc-USP, São Paulo.

Pessoa, P.F.P. 1996. Caracterização Hidrogeológica da Região Cárstica de Sete Lagoas, MG: Potencialidades e Riscos. Universidade de São Paulo, São Paulo. Dissertação de Mestrado, 101 p.

Pessoa, P.F.P., 2005. Hidrogeologia dos Aquíferos Carsticos Cobertos de Lagoa Santa, MG. PhD Thesis, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, 375 p.

Piló, L.B. 1998. Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal Macacos-Baú, carste de Lagoa Santa, MG. Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo. Tese de Doutorado, 269 p.

Piló, L. B. Geomorfologia cárstica. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 1, n. 1, p. 88–102, 2000.

Podgorney, R.K., R.W. Ritzi JR. (1997). Capture zone geometry in a fractured carbonate aquifer. Ground Water 35, no. 6: 1040–1049.

Ribeiro, J.H., Tuller, M.P., Filho, A.D., Padilha, A.V., Córdoba, C.V., 2003. Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas. 2nd ed. CPRM, Belo Horizonte, 54 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. Undergraduate Thesis, Federal University of 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 de fluxos nos aquíferos carstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Águas Subterrâneas, 33(1), 12-21. http://dx.doi.org/10.14295/ras.v33i1.29148.

Ribeiro, C.; Velásquez, L. N. M.; Fleming, P. Origin of spring waters employing a multiparametric approach with special focus on stable isotopes ^{2}H and ^{18}O in the Lagoa Santa Karst region, Southern Brazil. Isotopes in Environmental and Health Studies, v. 56, n. 2, p. 158–169, 2020.

Rodrigues, A.S., 2023. Avaliação do monitoramento de água subterrânea em poços tubulares na região de entorno da área de proteção ambiental Carste de Lagoa Santa. Master's Thesis, Federal University of Minas Gerais. https://hdl.handle.net/1843/64098.

Scanlon, B.R., Mace, R.E., Barrett M.E., Smith B. (2003). Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. Journal of Hydrology 276:137–158.

Schobbenhaus, C.; Campos, D.A.; Derza, G.R.; Asmus, G.E. 1984. Geologia do Brasil. Texto Explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais, escala 1:2500000. 501p. Ilustrado.

Shapiro, S.S., Wilk, M.B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika, 52(3–4), 591–611. https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591.

Shinzato, E. 1998. O Carste da Área de Proteção Ambiental de Lagoa Santa (MG) e sua influência na formação dos solos. UENF/CCTA, Campo dos Goytacazes. Dissertação de Mestrado.

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

Silva, J.C.S., 2003. Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na região carstica de Lagoa Santa, MG. Master's Thesis, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, 303 p.

Silva, A. B. da. Hidrogeologia de meios cársticos. In: FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. (org.). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM; LABHID, 2008. p. 153–174.

Silva, T. G. A. Análise da aplicação de métodos europeus de vulnerabilidade intrínseca ao carste tropical da região da APA Carste de Lagoa Santa. 2022. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

Souza R. T. & Sampaio J. L. D. 2021. Características do solo na APA Carste de Lagoa Santa (MG) e seu papel na infiltração de potenciais contaminantes. Caderno de Geografia, v.31, n.64, 2021.

Sweeting, M. M. Karst landforms. London: Macmillan, 1972. 250 p.

Tayer, T. D. C.; Velásquez, L. N. M. Assessment of intrinsic vulnerability to the contamination of karst aquifer using the COP method in the Carste Lagoa Santa Environmental Protection Unit, Brazil. Environmental Earth Sciences, v. 76, p. 1–13, 2017.

Teixeira, G.M., De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., Andrade, I.B., Neto, W.M.P., 2023. Evaluation of recharge estimation methods applied to fissure and karst aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area, Brazil. Hydrological Processes. https://doi.org/10.1002/hyp.14971.

Teodoro, M.I.P., Velásquez, L.N.M., Fleming, P.M., Paula, R.S., Souza, R.T., Doi, B.B., 2019. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. Águas Subterrâneas, 33(4). http://dx.doi.org/10.14295/ras.v33i4.29532.

Teodoro, M.I.P. 2020 Hidrodinâmica das zonas cárstica e cárstica-fissural do sistema de aquífero da Formação Sete Lagoas por meio de traçadores corantes e da análise das estruturas rúpteis na Região de Lagoa Santa, Minas Gerais [manuscrito] / Maria Isabel Pereira Teodoro.

Theis, C.V., 1935. The Relation between the Lowering of the Piezometic Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Groundwater Storage. Transactions, American Geophysical Union, 16, 518-524.

Thrailkill, J., 1985a. Well evaluation in shallow conduit-flow carbonate aquifers by drawdown interval analysis (DIA) [Abstract]. Eos Trans. AGU, 66, 275.

Thrailkill, J., 1985b. Flow in a limestone aquifer as determined from water tracing and water levels in wells. J. Hydrol., 78, 123-136.

Thrailkill, J., 1988. Drawdown Interval Analysis: A Method of Determining the Parameters of Shallow Conduit Flow Carbonate Aquifers From Pumping Tests. Water Resources Research, 24(8), 1423-1428.

Trabucchi, M., Ramírez, J., Fernàndez-Garcia, D., 2018. Generalizing Agarwal's Method for the Interpretation of Recovery Tests Under Non-Ideal Conditions. Water Resources Research. https://doi.org/10.1029/2018WR022684.

Travassos, L. E. P. Contribuições científicas do professor Dr. Heinz Charles Kohler para a geomorfologia cárstica tropical brasileira. Sociedade & Natureza, v. 22, p. 625 637, 2010.

Troppmair, H.; Tavares, A. C. Observações geomorfológicas e biogeográficas na região espeleológica de Altinópolis. Boletim de Geografia Teorética, v. 15, n. 29–30, p. 329–336, 1985.

Tuller, M.P., Ribeiro, J.H., Signorelli, N., Féboli, W.L., Pinho, J.M.M., 2010. Projeto Sete Lagoas - Abaeté. CPRM, Belo Horizonte, 160 p.

Uhlein, A., Caxito, F.A., Sanglard, J.C.D., Uhlein, G.J., Suckau, G.L., 2018. Stratigraphy and tectonics of the Neoproterozoic belts of the northern portion of the São Francisco Craton. Geonomos, 19(2), 8–31. https://doi.org/10.18285/geonomos.v19i2.38.

Van Beynen, P. E. Karst management. Dordrecht: Springer, 2011. 489 p.

Van Camp, M., Vauterin, P., 2005. Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and earth tides. Comput. Geosci., 31, 631–640.

Velásquez, L. N. M.; Andrade, I. B.; Ribeiro, C. G.; Amaral, D. G. P.; Vieira, L. C. M.; Cardoso, F. A.; De Paula, R. S.; Silva, P. H. P.; Souza, R. T.; Almeida, S. B. S. 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. Belo Horizonte: FUNDEP/GERDAU/UFMG, 2018. (Processo n. 22.317). Plano de Ação Nacional para a Conservação do Patrimônio Espeleológico nas áreas cársticas da Bacia do São Francisco.

Viana, H.S., Kohler, H.C., Tavares, V.P. (Orgs.), 1998. APA Carste de Lagoa Santa - Meio Físico, vol. 1. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, 301 p.

Vieira, L. C. 2007. A Formação Sete Lagoas (Grupo Bambuí) e as variações paleoambientais no final do Proterozóico. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo.

Vieira, L. C. M. Hidrogeoquímica dos aquíferos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. 2018. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

Vieira, L. C. M.; Dussin, T. M.; Velásquez, L. N. M. Geoquímica e condições paleoambientais de deposição das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas na região da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, MG. Geochimica Brasiliensis, v. 32, n. 1, 2018.

Waltham, A. C.; Fookes, P. G. Engineering classification of karst ground conditions. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, v. 36, n. 2, p. 101–118, 2003.

Warren L.V., Quaglio F., Riccomini C., Simões M.G., Poiré D.G., Strikis, N.M., Anelli L.E., Strikis P.C. 2014. The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil Cloudina reveals an old proto-Gondwana seaway. Geology, 42, 391–394.

Waterloo Hydrogeologic Inc – Aquifertes. versão 13.0.

Wenzel, H.G., 1995. ETERNA package. Available at: http://www.eas.slu.edu/GGP/ETERNA (Accessed 22 May 2025).

Wernick, E.; Pastore, E. L.; Pires Neto, A. Cavernas em arenito. Notícia Geomorfológica, v. 13, p. 55–67, 1973.

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

White, W. B. Conceptual models for karstic aquifers. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, v. 1, n. 1, p. 2, 2003.

Willems, L.; Rodet, J.; Pouchet, A.; Melo, S.; Rodet, M.; Compère, P.; Hatert, F.; Auler, A. S. Karst in sandstones and quartzites of Minas Gerais, Brazil. Cadernos do Laboratório Xeolóxico de Laxe, v. 33, p. 127–138, 2008.

Williams, P. W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. Journal of Hydrology, v. 61, p. 45–67, 1983.

Zalán, P. V.; Romeiro-Silva, P. C. Bacia do São Francisco. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15, p. 561–571, 2007.

8 APÊNDICE

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DE T.

Ponto	Coordenadas UTM - SIRGAS 2000 / 23 S			Município	Profundidade (m)	Cota NE (m)	NE (m)	Cota ND (m)	ND (m)	Q Estabilização (m^3/h)	Q Específica ($m^3/h/m$)	Espessura Saturada (m)	Raio do poço (mm)	Aw (m^2) - Thraikill (1988)	Thraikill (1988)	Moench (1984)	Agarwal (1980)
	UTM-E	UTM-N	Cota (m)												T (m^2/s)	T (m^2/s)	T (m^2/s)
00406-2005	595603.7	7837414.4	791	Matozinhos	80	787	4	764	27	8.24	0.36	76	76	0.02	3.52E-05	1.13E-05	1.97E-05
00501-2003	612915.8	7823817.7	710	Lagoa Santa	84	707	3	691	19	21.07	1.31	81	76	1.14	4.75E-04	1.55E-04	2.65E-04
00823-2003	597748.0	7833550.0	754	Matozinhos	110	742	12	720	34	259.20	11.78	98	76	7.64	1.82E-03	1.12E-03	2.79E-04
01747-2008	615461.0	7820545.0	734	Vespasiano	93	679	55	671	63	39.60	4.95	38	75	7.84	2.47E-03	1.08E-03	1.28E-03
02018-2006	608597.0	7826075.0	745	Confins	120	705	40	697	48	10.44	1.30	80	76	0.52	3.52E-04	9.72E-05	2.03E-04
04586-2006	613888.0	7823673.0	792	Lagoa Santa	136	705	87	692	100	2.09	0.16	49	75	0.08	5.15E-05	1.97E-05	2.78E-05
05010-2007	614952.0	7835490.0	681	Lagoa Santa	80	657	24	632	49	2.00	0.08	56	76	0.09	1.04E-05	4.51E-06	5.42E-06
05098-2006	595429.0	7837599.0	786	Matozinhos	105	778	8	761	25	144.00	8.32	97	125	1.12	1.48E-03	7.41E-04	7.29E-04
05571-2008	591770.7	7845673.0	747	Prudente de Morais	90	739	8	737	10	22.00	11.00	82	76	0.60	5.56E-04	1.04E-04	3.36E-04
05839-2010	611629.5	7823026.5	707	Vespasiano	75	657	50	654	53	8.20	2.73	25	75	0.26	4.86E-04	3.47E-05	1.11E-04
12938-2014	613201.4	7821195.3	683	Vespasiano	37	676	7	647	36	3.60	0.12	30	76	0.12	1.80E-05	1.83E-05	1.16E-05
13253-2008	605377.0	7829263.0	749	Confins	85	717	32	691	58	15.80	0.61	53	76	1.12	1.36E-04	6.81E-05	6.77E-05
14752-2010	607963.1	7818652.8	782	Vespasiano	25	782	0	775	7	10.38	1.57	25	76	0.69	2.95E-04	1.52E-04	1.35E-04
15835-2012	612016.1	7819673.0	695	Vespasiano	100	692	3	688	7	20.36	5.22	97	76	1.70	1.14E-03	1.03E-03	4.58E-04
17064-2017	612722.8	7820929.1	685	Vespasiano	100	682	3	677	8	147.30	32.23	97	125	5.52	1.25E-02	5.43E-03	6.53E-03
17738-2011	604644.5	7828602.5	796	Pedro Leopoldo	100	752	44	726	70	4.66	0.17	56	75	0.26	5.64E-05	1.74E-05	3.18E-05
19937-2016	608323.8	7826039.7	743	Confins	63	696	47	694	49	5.00	2.50	16	76	0.22	1.97E-04	2.27E-05	1.24E-04
20301-2016	619941.4	7833609.8	664	Lagoa Santa	80	648	16	604	60	14.20	0.32	64	76	0.12	2.59E-05	6.39E-06	1.52E-05
20302-2016	620525.6	7833821.1	685	Lagoa Santa	80	671	14	645	40	13.50	0.52	66	76	0.08	4.62E-05	2.06E-05	2.40E-05
20414-2013	611836.9	7820724.6	771	Vespasiano	96	750	21	724	47	26.00	1.02	75	76	0.19	1.53E-04	2.67E-05	7.70E-05
2273-2005	609383.2	7822364.1	739	São José da Lapa	100	736	3	714	25	17.60	0.80	97	76	0.00	1.84E-05	3.47E-06	1.11E-05
30535-2015	613131.2	7821049.4	684	Vespasiano	75	677	7	667	18	4.63	0.43	68	75	0.27	5.57E-05	2.79E-05	2.78E-05
31070-2015	615059.7	7820760.4	697	Vespasiano	100	658	39	652	45	8.70	1.45	61	76	0.06	4.70E-05	1.06E-05	2.78E-05
3847-2006	617442.1	7821298.2	697	Lagoa Santa	61	691	6	687	10	111.28	31.35	55	75	40.18	1.13E-01	2.07E-02	6.59E-02
4687-2006	609204.4	7821688.8	722	São José da Lapa	80	707	15	704	19	90.00	24.52	65	100	75.12	4.50E-02	2.23E-02	2.05E-02
4726-2008	607021.8	7821886.5	748	São José da Lapa	80	731	18	709	40	27.15	1.23	63	75	0.11	6.68E-04	3.89E-04	1.70E-04
5771-2016	609842.3	7821260.3	714	São José da Lapa	33	705	9	698	16	33.00	4.82	24	75	1.32	2.17E-03	8.68E-07	3.83E-05
5895-2006	609369.0	7824792.8	687	Confins	80	680	7	672	15	327.24	41.21	73	125	350.61	1.86E-02	5.69E-03	1.05E-02
5896-2006	610619.5	7824508.4	686	Lagoa Santa	126	676	10	674	12	235.69	87.62	116	175	4.94	5.89E-02	3.18E-02	2.23E-02
5897-2006	609864.3	7824820.5	716	Confins	109	708	8	688	28	102.85	5.18	101	125	0.76	4.55E-03	4.76E-04	2.74E-03
5898-2006	610676.6	7824323.6	679	Vespasiano	80	669	10	665	14	201.00	60.91	70	125	5.50	5.56E-02	3.24E-02	3.29E-02
5900-2006	618234.1	7826580.9	784	Lagoa Santa	210	754	30	751	33	59.98	21.19	180	100	1.28	6.00E-03	2.91E-03	3.03E-03
9196-2008	607451.1	7820654.2	743	São José da Lapa	76	725	18	720	23	45.00	8.20	58	100	0.00	3.30E-03	3.15E-04	2.09E-03
9409-2018	597384.8	7835907.7	780	Matozinhos	76	721	59	720	60	26.00	26.00	17	130	5.28	5.27E-03	2.82E-03	2.06E-03
C-01-ALS(1)	609042.0	7825037.0	686	Confins	94	680	6	659	27	90.00	4.39	88	125	0.00	1.21E-03	6.71E-04	4.05E-04
C-01-ALS(2)	609042.0	7825037.0	690	Confins	94	682	8	673	17	90.00	10.17	86	125	0.24	5.70E-03	3.69E-03	3.24E-04
C-01-SACB	593108.0	7839867.0	787	Capim Branco	80	785	2	765	22	51.44	2.58	78	75	50.24	3.47E-03	1.54E-03	2.12E-03
C-01-SM	595669.0	7837312.0	767	Matozinhos	70	763	4	760	7	180.00	73.47	66	100	76.19	2.99E-02	1.28E-02	1.56E-02

Ponto	Coordenadas UTM - SIRGAS 2000 / 23 S			Município	Profundidade (m)	Cota NE (m)	NE (m)	Cota ND (m)	ND (m)	Q Estabilização (m^3/h)	Q Específica ($m^3/h/m$)	Espessura Saturada (m)	Raio do poço (mm)	Aw (m^2) - Thraikill (1988)	Thraikill (1988)	Moench (1984)	Agarwal (1980)
	UTM-E	UTM-N	Cota (m)												T (m^2/s)	T (m^2/s)	T (m^2/s)
C-02-CP	591247.0	7843667.0	773	Prudente de Morais	95	737	36	723	50	20.02	1.41	59	75	7.04	4.04E-04	1.47E-04	2.03E-04
C-03-ALS(1)	609497.0	7824756.0	687	Confins	70	680	7	674	13	180.00	27.03	63	125	22.56	2.23E-02	1.07E-02	1.48E-02
C-03-ALS(3)	609497.0	7824756.0	687	Confins	70	677	10	648	39	97.20	3.33	60	125	0.47	2.39E-03	4.02E-04	1.46E-03
C-04-SM	595195.0	7837623.0	766	Matozinhos	34	764	2	760	6	240.12	52.20	32	100	191.10	6.19E-02	3.00E-02	3.13E-02
C-05-SM	595600.0	7837400.0	791	Matozinhos	84	785	6	750	41	26.68	0.76	78	100	2.06	5.34E-04	2.86E-04	2.11E-04
C-07-ALS(1)	610619.0	7824505.0	699	Lagoa Santa	126	689	10	687	12	235.69	87.62	116	175	118.31	8.54E-02	4.96E-02	2.20E-02
C-07-ALS(2)	610619.0	7824505.0	699	Lagoa Santa	126	687	12	677	22	119.99	11.48	114	175	3.87	3.79E-03	1.97E-03	7.06E-04
C-08-ALS(1)	609865.0	7824818.0	716	Confins	109	708	8	688	28	102.85	5.18	101	125	0.57	4.41E-03	4.26E-04	2.80E-03
C-08-ALS(2)	609865.0	7824818.0	716	Confins	109	708	8	691	25	55.37	3.31	101	125	0.05	2.82E-04	1.46E-04	1.27E-04
C-09-ALS	610721.0	7824268.0	678	Vespasiano	20	668	10	664	14	723.60	219.27	10	125	6.37	2.33E-02	1.25E-02	9.14E-03
C-12-SM(2)	595232.0	7837761.0	794	Matozinhos	61	773	21	765	29	239.98	31.53	40	125	47.29	5.64E-02	2.71E-02	2.86E-02
C-13-SM(2)	595386.0	7837511.0	777	Matozinhos	105	771	6	761	16	102.85	10.70	99	125	18.30	1.06E-02	5.44E-03	4.81E-03
E-06-ACB	593112.0	7839866.0	787	Matozinhos	47	784	3	782	5	45.00	16.61	44	75	20.98	8.84E-03	4.09E-05	5.88E-03

APÊNDICE B – RESULTADOS DOS MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DE S.

Ponto	Coordenadas UTM - SIRGAS 2000 / 23 S			Município	Profundidade (m)	Tipo de Aquifero	Cota NE (m)	NE (m)	Cota ND (m)	ND (m)	Q Estabilização (m³/h)	Q Específica (m³/h/m)	Espessura Saturada (m)	Raio do poço (mm)	dPa (Pa) - Bernard & Delay (2008)	Thraikill (1988)	Bernard & Delay (2008)	Moench (1984)	Agarwal (1980)
	UTM-E	UTM-N	Cota (m)													S	S	S	S
00406-2005	595603.7	7837414.4	791	Matozinhos	80	Carstico	787	4	764	27	8.24	0.36	76	76	-	1.73E-04	-	1.10E-04	1.53E-05
00501-2003	612915.8	7823817.7	710	Lagoa Santa	84	Carstico	707	3	691	19	21.07	1.31	81	76	-	3.10E-03	-	1.00E-03	1.73E-03
00823-2003	597748.0	7833550.0	754	Matozinhos	110	Carstico	742	12	720	34	259.20	11.78	98	76	-	1.52E-01	-	1.00E-01	3.91E-03
01747-2008	615461.0	7820545.0	734	Vespasiano	93	Carstico	679	55	671	63	39.60	4.95	38	75	-	2.83E-04	-	1.80E-06	1.88E-04
02018-2006	608597.0	7826075.0	745	Confins	120	Carstico	705	40	697	48	10.44	1.30	80	76	-	1.01E-02	-	4.72E-03	5.17E-03
04586-2006	613888.0	7823673.0	792	Lagoa Santa	136	Carstico	705	87	692	100	2.09	0.16	49	75	-	1.36E-03	-	8.00E-04	3.22E-04
05010-2007	614952.0	7835490.0	681	Lagoa Santa	80	Carstico	657	24	632	49	2.00	0.08	56	76	-	4.56E-02	-	2.90E-02	4.21E-03
05098-2006	595429.0	7837599.0	786	Matozinhos	105	Carstico	778	8	761	25	144.00	8.32	97	125	-	1.36E-02	-	2.90E-04	9.00E-03
05571-2008	591770.7	7845673.0	747	Prudente de Morais	90	Carstico	739	8	737	10	22.00	11.00	82	76	-	1.12E-01	-	1.18E-03	7.43E-02
05839-2010	611629.5	7823026.5	707	Vespasiano	75	Carstico	657	50	654	53	8.20	2.73	25	75	-	9.69E-02	-	6.00E-02	1.38E-02
12938-2014	613201.4	7821195.3	683	Vespasiano	37	Carstico	676	7	647	36	3.60	0.12	30	76	-	1.80E-03	-	1.54E-04	1.15E-03
13253-2008	605377.0	7829263.0	749	Confins	85	Carstico	717	32	691	58	15.80	0.61	53	76	-	3.70E-02	-	6.79E-03	2.24E-02
14752-2010	607963.1	7818652.8	782	Vespasiano	25	Carstico	782	0	775	7	10.38	1.57	25	76	-	9.58E-02	-	2.80E-02	5.45E-02
15835-2012	612016.1	7819673.0	695	Vespasiano	100	Carstico	692	3	688	7	20.36	5.22	97	76	-	3.14E-02	-	3.38E-03	1.98E-02
17064-2017	612722.8	7820929.1	685	Vespasiano	100	Carstico	682	3	677	8	147.30	32.23	97	125	-	2.92E-02	-	1.56E-02	1.16E-02
17738-2011	604644.5	7828602.5	796	Pedro Leopoldo	100	Carstico	752	44	726	70	4.66	0.17	56	75	-	8.81E-04	-	5.30E-04	1.71E-04
19937-2016	608323.8	7826039.7	743	Confins	63	Carstico	696	47	694	49	5.00	2.50	16	76	-	2.59E-02	-	1.33E-02	1.19E-02
20301-2016	619941.4	7833609.8	664	Lagoa Santa	80	Carstico	648	16	604	60	14.20	0.32	64	76	-	2.45E-02	-	9.91E-03	1.30E-02
20302-2016	620525.6	7833821.1	685	Lagoa Santa	80	Carstico	671	14	645	40	13.50	0.52	66	76	-	1.76E-02	-	9.27E-03	7.35E-03
20414-2013	611836.9	7820724.6	771	Vespasiano	96	Carstico	750	21	724	47	26.00	1.02	75	76	-	1.99E-02	-	9.80E-03	1.00E-02
2273-2005	609383.2	7822364.1	739	São José da Lapa	100	Carstico	736	3	714	25	17.60	0.80	97	76	-	1.12E-02	-	5.69E-03	5.42E-03
30535-2015	613131.2	7821049.4	684	Vespasiano	75	Carstico	677	7	667	18	4.63	0.43	68	75	-	6.71E-02	-	4.25E-02	6.77E-03
31070-2015	615059.7	7820760.4	697	Vespasiano	100	Carstico	658	39	652	45	8.70	1.45	61	76	-	1.24E-02	-	4.51E-03	6.77E-03
3847-2006	617442.1	7821298.2	697	Lagoa Santa	61	Carstico	691	6	687	10	111.28	31.35	55	75	-	2.00E-10	-	1.00E-10	1.00E-10
4687-2006	609204.4	7821688.8	722	São José da Lapa	80	Carstico	707	15	704	19	90.00	24.52	65	100	-	1.50E-10	-	1.00E-16	1.00E-10
4726-2008	607021.8	7821886.5	748	São José da Lapa	80	Carstico	731	18	709	40	27.15	1.23	63	75	-	4.61E-03	-	1.48E-05	3.07E-03
5771-2016	609842.3	7821260.3	714	São José da Lapa	33	Carstico	705	9	698	16	33.00	4.82	24	75	-	4.23E-04	-	2.80E-04	5.06E-06
5895-2006	609369.0	7824792.8	687	Confins	80	Carstico	680	7	672	15	327.24	41.21	73	125	-	1.38E+00	-	8.60E-01	1.79E-01
5896-2006	610619.5	7824508.4	686	Lagoa Santa	126	Carstico	676	10	674	12	235.69	87.62	116	175	-	1.28E-03	-	7.70E-07	8.51E-04
5897-2006	609864.3	7824820.5	716	Confins	109	Carstico	708	8	688	28	102.85	5.18	101	125	-	1.49E-03	-	9.91E-04	1.00E-10
5898-2006	610676.6	7824323.6	679	Vespasiano	80	Carstico	669	10	665	14	201.00	60.91	70	125	-	1.37E-01	-	2.20E-05	9.11E-02
5900-2006	618234.1	7826580.9	784	Lagoa Santa	210	Carstico	754	30	751	33	59.98	21.19	180	100	-	2.51E-01	-	9.08E-02	1.37E-01
9196-2008	607451.1	7820654.2	743	São José da Lapa	76	Carstico	725	18	720	23	45.00	8.20	58	100	-	5.02E-02	-	2.50E-02	2.51E-02
9409-2018	597384.8	7835907.7	780	Matozinhos	76	Carstico	721	59	720	60	26.00	26.00	17	130	-	1.66E-01	-	8.31E-02	8.31E-02
C-01-ALS(1)	609042.0	7825037.0	686	Confins	94	Carstico	680	6	659	27	90.00	4.39	88	125	-	2.80E-02	-	1.40E-02	1.40E-02
C-01-ALS(2)	609042.0	7825037.0	690	Confins	94	Carstico	682	8	673	17	90.00	10.17	86	125	-	5.25E-02	-	2.25E-06	3.50E-02
C-01-SACB	593108.0	7839867.0	787	Capim Branco	80	Carstico	785	2	765	22	51.44	2.58	78	75	-	1.53E-10	-	6.00E-12	1.00E-10
C-01-SM	595669.0	7837312.0	767	Matozinhos	70	Carstico	763	4	760	7	180.00	73.47	66	100	-	7.70E-01	-	1.37E-03	5.13E-01
C-02-CP	591247.0	7843667.0	773	Prudente de Morais	95	Carstico	737	36	723	50	20.02	1.41	59	75	-	1.84E-02	-	1.00E-03	1.19E-02

Ponto	Coordenadas UTM - SIRGAS 2000 / 23 S			Município	Profundidade (m)	Tipo de Aquifero	Cota NE (m)	NE (m)	Cota ND (m)	ND (m)	Q Estabilização (m^3/h)	Q Específica ($m^3/h/m$)	Espessura Saturada (m)	Raio do poço (mm)	dPa (Pa) - Bernard & Delay (2008)	Thraikill (1988)	Bernard & Delay (2008)	Moench (1984)	Agarwal (1980)
	UTM-E	UTM-N	Cota (m)													S	S	S	S
C-03-ALS(1)	609497.0	7824756.0	687	Confins	70	Carstico	680	7	674	13	180.00	27.03	63	125	-	5.60E-08	-	3.50E-08	7.00E-09
C-03-ALS(3)	609497.0	7824756.0	687	Confins	70	Carstico	677	10	648	39	97.20	3.33	60	125	-	2.66E-01	-	2.75E-04	1.77E-01
C-04-SM	595195.0	7837623.0	766	Matozinhos	34	Carstico	764	2	760	6	240.12	52.20	32	100	-	1.71E-02	-	5.00E-09	1.14E-02
C-05-SM	595600.0	7837400.0	791	Matozinhos	84	Carstico	785	6	750	41	26.68	0.76	78	100	-	6.56E-03	-	1.31E-05	4.37E-03
C-07-ALS(1)	610619.0	7824505.0	699	Lagoa Santa	126	Carstico	689	10	687	12	235.69	87.62	116	175	-	1.28E+00	-	1.00E-10	8.54E-01
C-07-ALS(2)	610619.0	7824505.0	699	Lagoa Santa	126	Carstico	687	12	677	22	119.99	11.48	114	175	-	1.16E-01	-	3.25E-02	6.66E-02
C-08-ALS(1)	609865.0	7824818.0	716	Confins	109	Carstico	708	8	688	28	102.85	5.18	101	125	-	6.90E-03	-	4.60E-03	1.00E-10
C-08-ALS(2)	609865.0	7824818.0	716	Confins	109	Carstico	708	8	691	25	55.37	3.31	101	125	-	1.54E-01	-	7.30E-03	1.00E-01
C-09-ALS	610721.0	7824268.0	678	Vespasiano	20	Carstico	668	10	664	14	723.60	219.27	10	125	-	1.22E-01	-	7.30E-02	2.53E-02
C-12-SM(2)	595232.0	7837761.0	794	Matozinhos	61	Carstico	773	21	765	29	239.98	31.53	40	125	-	1.50E-10	-	2.75E-16	1.00E-10
C-13-SM(2)	595386.0	7837511.0	777	Matozinhos	105	Carstico	771	6	761	16	102.85	10.70	99	125	-	1.55E-08	-	7.79E-09	7.70E-09
E-06-ACB	593112.0	7839866.0	787	Matozinhos	47	Carstico	784	3	782	5	45.00	16.61	44	75	-	1.08E-03	-	5.40E-04	5.43E-04
00681-2004[1] [2]	605991	7837506	736.0	Pedro Leopoldo	600	Cárstico-fissural	682.00	54.00	-	-	-	-	-	-	150.73	-	1.54E-03	-	-
03056-PT[1]	609273	7830523	741.0	Confins	30	Cárstico	740.60	0.40	-	-	-	-	-	-	203.52	-	1.39E-04	-	-
17613-PT[1] [2]	612769	7822934	679.0	Vespasiano	95	Cárstico	675.77	3.23	-	-	-	-	-	-	139.30	-	1.10E-04	-	-
C-02-ALS	609797	7824646	685.0	Lagoa Santa	29	Cárstico	677.80	7.20	-	-	-	-	-	-	149.90	-	1.40E-05	-	-
E-06-ACB[1]	593112	7839866	787.0	Capim Branco	109	Cárstico-fissural	772.74	14.26	-	-	-	-	-	-	214.20	-	1.13E-04	-	-
HP1	614497	7831346	750.0	Lagoa Santa	177	Cárstico-fissural	716.30	33.70	-	-	-	-	-	-	222.50	-	1.04E-03	-	-
N10	614806	7821330	671.0	Vespasiano	600	Cárstico	666.10	4.90	-	-	-	-	-	-	154.10	-	3.62E-04	-	-
N39	596838	7854464	713.0	Funilândia	80	Cárstico-fissural	708.04	4.96	-	-	-	-	-	-	149.20	-	1.05E-04	-	-
N-40-COP	607245	7817965	800.0	Vespasiano	110	Cárstico-fissural	795.30	4.70	-	-	-	-	-	-	186.00	-	5.40E-04	-	-
N6162[1]	603842	7852136	707.0	Funilândia	109	Cárstico	692.74	14.26	-	-	-	-	-	-	321.40	-	2.94E-04	-	-
N63	605086	7854885	637.0	Funilândia	198	Cárstico-fissural	616.80	20.20	-	-	-	-	-	-	153.50	-	4.40E-04	-	-
P5	607489	7841487	715.0	Matozinhos	62	Cárstico-fissural	704.90	10.10	-	-	-	-	-	-	147.70	-	1.07E-04	-	-