

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

Rafael Magno Oliveira

FATORES HIDROGEOLÓGICOS, ESPELEOLÓGICOS E ESTRUTURAIS
NO DESENVOLVIMENTO DE ZONAS PREFERENCIAIS DE CARSTIFICAÇÃO,
NORDESTE DO MUNICÍPIO DE SETE LAGOAS, MG

Belo Horizonte
2024

Rafael Magno Oliveira

**FATORES HIDROGEOLÓGICOS, ESPELEOLÓGICOS E ESTRUTURAIS
NO DESENVOLVIMENTO DE ZONAS PREFERENCIAIS DE CARSTIFICAÇÃO,
NORDESTE DO MUNICÍPIO DE SETE LAGOAS, MG**

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

Orientador: Prof. Dr. Paulo Galvão

Belo Horizonte
2024

O48f
2024

Oliveira, Rafael Magno.

Fatores hidrogeológicos, espeleológicos e estruturais no desenvolvimento de zonas preferenciais de carstificação, nordeste do município de Sete Lagoas, MG [manuscrito] / Rafael Magno Oliveira. – 2024.

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

Orientador: Paulo Galvão.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2024.

Bibliografia: f. 90-97.

1. Carste – Teses. 2. Hidrogeologia – Teses. 3. Espeleologia – Teses. 4. Geologia estrutural – Teses. 5. Geofísica – Teses. I. Galvão, Paulo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 556.3(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DO IGC/UFMG



FOLHA DE APROVAÇÃO

Fatores Hidrogeológicos, Espeleológicos e Estruturais no Desenvolvimento de Zonas Preferenciais de Carstificação, Nordeste do Município de Sete Lagoas, MG

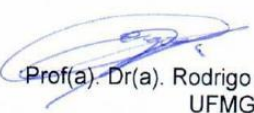
RAFAEL MAGNO OLIVEIRA

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

Aprovada em 11 de setembro de 2024, pela banca constituída pelos membros:


Prof(a). Dr(a). Paulo Henrique Ferreira Galvão – Orientador(a)
UFMG


Prof(a). Dr(a). Humberto Luis Siqueira Reis
UFOP


Prof(a). Dr(a). Rodrigo Sérgio de Paula
UFMG


Dr(a). Lucas Padoan de Sá Godinho
UFMG

Belo Horizonte, 11 de setembro de 2024.

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Carlos e Enedir, por sempre acreditarem e comprarem os meus sonhos, por sempre terem me mostrado que vale a pena acreditar que é possível realizá-los e que a educação é o bem mais precioso do ser humano.

Agradeço à minha família e aos meus amigos por serem a minha força. Agradeço à minha irmã, avó, primos e tias que sempre acreditaram em mim. Agradeço aos meus amigos de longa data, Pedro e Vítor, pelo apoio incondicional ao longo dos 20 anos de amizade. Agradeço a todos os amigos da geologia que seguem comigo, em especial a Giovanna, Júlia, Caio e Beatriz. Agradeço ao lugar e às pessoas que posso chamar de casa em Belo Horizonte: Vitória, Pedro e Juliana.

Agradeço, em especial, ao meu orientador Paulo Galvão por não medir esforços para que eu pudesse chegar longe e pela disponibilidade em sempre me ajudar a ser um profissional melhor e mais dedicado, buscando sempre pela excelência. Junto a ele, agradeço ao Pedro Assunção e à Camila Schuch por estarem comigo em todos os momentos, nos campos, nas análises dos dados e nos momentos difíceis, sempre me fazendo acreditar que vale a pena seguir em frente.

Agradeço ao professor Todd Halihan e sua família, Martha, Susan, McLain e Remy por terem me recebido tão bem e terem sido minha família durante o meu período de estudos na Oklahoma State University (OSU). Agradeço aos amigos que fiz nos Estados Unidos, Maria Júlia, Nicolle, Vinícius e demais brasileiros por me fazerem sentir em casa. Agradeço à equipe do Laboratório de Geofísica do Noble Research Center, especialmente ao Jordan Massey e ao Mason Martinez por serem um ponto de apoio incondicional e por todo o conhecimento compartilhado. Jamais imaginei que pudesse viver momentos inesquecíveis como os que vivi em Oklahoma.

Agradeço ao Fernando Villanova por todo o apoio durante o meu período de mestrado, compartilhando conhecimentos que levarei comigo por toda a minha vida, como ser humano e como geólogo. Agradeço à Ana Cláudia por ter sido uma pessoa fundamental durante grande parte desse processo.

Agradeço à Pró-reitoria de Pós-graduação da UFMG e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (PPGEOL/UFMG), em especial ao secretário William Campos pela disponibilidade, humanidade e apoio. Agradeço à equipe do Laboratório de Estudos Hidrogeológicos da UFMG (LEHID) por todo o conhecimento compartilhado e pelo esforço em engrandecer os estudos em

hidrogeologia. Agradeço ao Laboratório de Topografia e Geodésia da UFMG, em especial ao prof. Plínio da Costa e o técnico Vinícius Tadeu por não medirem esforços em me ajudar no projeto. Agradeço ao prof. Paulo Aranha pela disposição em me auxiliar nos levantamentos geofísicos do projeto.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio durante minha jornada acadêmica.

Agradeço à Companhia de Bebidas das Américas (Ambev) e ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), parceiros no projeto de pesquisa “Estudo Hidráulico entre a Lagoa Grande e o Aquífero Cárstico: Proposta de uma Gestão Hídrica Subterrânea no Município de Sete Lagoas (MG)”.

Agradeço à minha excelente formação na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), que me permitiu enxergar a necessidade de voltar meu conhecimento acadêmico para estudos que beneficiem a terra onde nasci: Sete Lagoas, MG. Agradeço, então, aos moradores da cidade que me receberam tão bem durante as campanhas de campo em busca de um único objetivo comum: a preservação da água subterrânea na cidade!

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mapa de localização do município de Sete Lagoas em relação ao estado de Minas Gerais com as principais indústrias e rodovias. Retirado de Alves (2020).	15
Figura 2.2 - Mapa de Uso e Ocupação do Solo na cidade de Sete Lagoas, ano 2022. Dados do Mapbiomas (2022).	16
Figura 2.3 - Mapa do domínio tectônico no qual se encontra a cidade de Sete Lagoas. Retirado de Cruz e Alkmim (2006).	19
Figura 2.4 – Na porção superior, o mapa simplificado da bacia do São Francisco meridional com os principais elementos estruturais das faixas de foreland Brasília e Araçuaí, a oeste e a leste, respectivamente. Modificado de Reis et al. (2017). A ampliação, abaixo, exemplifica os domínios de deformação no qual a cidade de Sete Lagoas e a área de estudo estão inseridas (domínio 2). Retirado de CPRM (2003).	21
Figura 2.5 - Coluna estratigráfica com a geologia local da área de estudo. Modificado de Tuller et al. (1992).	22
Figura 2.6 - Geologia no município de Sete Lagoas e na área de estudo. Modificado de Galvão et al. (2015).	24
Figura 2.7 - Modelo Hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas. Retirado de Galvão (2015).	26
Figura 3.1 - Bloco diagrama com as principais feições cársticas no ambiente. Retirado de Larousse (2018).	29
Figura 3.2 - Modelos conceituais de classificação de dolinas conforme mecanismos genéticos. Fonte: (2019).	30
Figura 3.3 – A) Variação da superfície do geoide e do esferoide de referência em relação a uma massa local. B) Deformação em maior escala. Retirado de Telford et al. (1990).	32
Figura 3.4 - A – O campo magnético da Terra (F) comparado a um dipolo de um ímã em que a direção forma um ângulo agudo (Dec) com o eixo de rotação, que corresponde ao norte geográfico. Esse ângulo pode variar conforme a região, envolvendo o polo norte geomagnético (GNP), o polo sul geomagnético (GSP), o equador magnético (ME), além do polo norte geográfico (NP) e do polo sul geográfico (SP). B – A decomposição do campo geomagnético (F) é realizada em suas componentes horizontal e vertical. O vetor do campo geomagnético é determinado pelos ângulos de inclinação (Inc) e declinação (Dec), além da intensidade do componente vertical do campo magnético (VMI). Retirado de Dentith e Mudge (2014) e modificado por CPRM (2021).	34

Figura 3.5 - Histograma com os valores médios de susceptibilidade magnética dos tipos mais comuns de rocha. Retirado de Keary et al. (2009).	36
Figura 3.6 - Espectro correspondente à faixa de radiação gama natural na superfície terrestre com as janelas espectrais para os canais dos elementos potássio, urânio e tório. Retirado de IAEA (2003) e modificado por CPRM (2021).	38
Figura 3.7 - Composição de cores RGB com as possibilidades de correlação com unidades litológicas. Retirado de CPRM, 2021.	40
Figura 3.8 - Disposição dos eletrodos no arranjo dipolo-dipolo. Retirado de Braga, 2006.	42
Figura 4.1 - Localização da área de estudo em relação aos dados utilizados do aerolevantamento da CODEMIG na área 10. Modificado de CPRM (2021).	47
Figura 4.2 - Imagens sobrepostas do MDE com iluminação e imagem de satélite, além dos lineamentos traçados para uma iluminação, em vermelho.	49
Figura 4.3 - Imagem do levantamento topográfico de um poço tubular próximo de onde foi levantada uma seção de eletrorresistividade.	51
Figura 4.4 - Acima, imagem de satélite da dolina mapeada S4 e dos pontos referentes aos eletrodos das seções geofísicas levantados com o GNSS. Abaixo, imagem de drone com a mesma dolina e as seções geofísicas.	52
Figura 4.5 - Localização das seções geológicas traçadas com os poços tubulares e geologia da área.	53
Figure 5.1 - Location map of the study area in relation to the municipality of Sete Lagoas with information on the lithology in the study area, drainage, tubular wells, and the urban-industrial area of the city (modified from Schuch et al., 2023).	63
Figure 5.2 – A) Hypsometric map of the northern portion of the municipality of Sete Lagoas with lineaments plotted at scales of 1:60,000 (blue) and 1:150,000 (black). B) Roses showing the preferred directions of the lineaments plotted at the two different scales. C) Cumulative lengths of the lineaments by azimuths in increments of 10 degrees.	68
Figure 5.3 - A) Gravimetric map of the Bouguer anomaly of the state of Minas Gerais with the location of Sete Lagoas, the study area, the Santa Helena ridge, and the Sete Lagoas central graben. The lower left corner shows a zoom in of this map highlighting the Araçuaí Belt and the São Francisco Craton. B) Magnetometric map of the Analytical Signal Amplitude (ASA) with lineaments and a rosette diagram showing the azimuths. C) Ternary radiometric map of the study area with RGB color legend for the uranium, thorium, and potassium channels.	70

Figure 5.4 – A) Map of the study area showing lithologies, drainages, and karst features identified in the field, as well as the water springs. B) Stereograms with azimuths of bedding planes, foliation, and intersection lineaments.....	72
Figure 5.5 - Location of the ERI transects data with informations of geology, drainages, sinkholes locations and the potentiometric data collection points. Below, the location of the data collection points in relation to Sete Lagoas boundary.	73
Figure 5.6 - Map showing the ERI transects (1-4) with the geo-electrical discontinuities and the geological interpretation below.	75
Figure 5.7 - Map showing the ERI transects (4-8) with the geo-electrical discontinuities and the geological interpretation below.	76
Figure 5.8 - A) Representative potentiometric surface map from 1980's prior to the urban-industrial expansion (modified from Schuch et al. 2023), and maps for the rainy and dry seasons of 2023, respectively. B) Map showing the difference between the potentiometric surface of the 1980s and the rainy season of 2023 on the left, and a map showing the difference between this surface for the rainy and dry seasons of 2023 on the right.....	78
Figure 5.9 - Geological cross-sections with a NW-SE direction (1 to 5) and their locations in relation to the municipality of Sete Lagoas and identification of lithotypes, karstified zones, tubular wells and streams.	80
Figure 5.10 - Geological cross-sections with a NW-SE direction (6 to 10) and their locations in relation to the municipality of Sete Lagoas and identification of lithotypes, karstified zones, tubular wells and streams.	81
Figure 5.11 - Block diagram showing inferred faults, sinkholes, karst springs, lakes, Basement elevation and Sete Lagoas Formation thickness.....	83
Figure 5.12 - Block diagram of the study area with 3 cross-sections (A, B and C) showing the center graben, it's relation with the karstified features, the basement morphology and the potentiometric surface.	87

RESUMO

O desenvolvimento de terrenos cársticos é influenciado pela interação de diversos fatores, que variam da escala regional à local. Em escala regional, processos tectônicos podem dar origem a estruturas geológicas, como zonas de cisalhamento, horsts e grabens. Em uma escala mais local, essas estruturas se transformam em zonas de descontinuidade em rochas solúveis, como os calcários, onde a percolação da água meteórica pode ampliar fraturas, falhas, planos de acamamento ou dobras, resultando na formação de redes cársticas. Este estudo investigou os principais fatores que propiciaram o desenvolvimento de zonas preferenciais de carstificação e apresentou um modelo geológico 3D da área ao nordeste do município de Sete Lagoas, que tem apresentado expressivo crescimento urbano e industrial nas últimas décadas. Para alcançar esses objetivos, foram utilizados métodos de análise regional, como hipsometria e lineamentos morfoestruturais, além de técnicas geofísicas regionais, como a gravimetria, magnetometria e radiometria. Os métodos locais incluíram mapeamento geológico, espeleológico e estrutural, com a coleta de dados sobre o nível da água de poços tubulares, nascentes cársticas e lagoa, além de levantamentos geofísicos em zonas de interesse através do imageamento de resistividade elétrica (ERI). Os resultados regionais indicam que as zonas de carstificação preferenciais apresentam direções NE-SW e NW-SE, ligadas a esforços tectônicos que formam grabens e horsts no embasamento, bem como zonas de fraqueza nas rochas de calcário e metapelito das formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena. A superfície potenciométrica mostra um fluxo regional em direção ao NE, com cones de rebaixamento evidentes em, ao menos, três regiões, destacando-se a porção industrializada ao norte de Sete Lagoas. Desde o início da industrialização na década de 1980, observou-se uma redução de cerca de 30 m no nível d'água, atingindo até 100 m na área industrializada. Localmente, as seções geofísicas por eletrorresistividade apontaram continuidades laterais e verticais das zonas de carstificação regionais, correlacionadas a características cársticas de superfície, como entradas de cavernas, sumidouros, lagoas e nascentes. A análise dos dados, compilados em um modelo geológico 3D, contribui para a compreensão hidrogeológica da porção nordeste da cidade de Sete Lagoas e serve como base para futuros estudos de gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Carste; água subterrânea; geologia estrutural; levantamento geofísico; espeleologia.

ABSTRACT

The development of karst terrains is influenced by the interaction of various factors, ranging from regional to local scale. At the regional scale, tectonic processes can lead to the formation of geological structures such as shear zones, horsts, and grabens. At a more local scale, these structures transform into discontinuity zones in soluble rocks, such as limestones, where the percolation of meteoric water can preferentially enlarge fractures, faults, bedding planes, or folds, resulting in the formation of karst networks. This study investigated the main factors that enabled the development of preferential karstification zones and presented a 3D geological model of the area northeast of the municipality of Sete Lagoas, which has experienced significant urban and industrial growth in recent decades. To achieve these objectives, regional analysis methods were employed, including hypsometry and morphostructural lineaments, as well as regional geophysical techniques such as gravimetry, magnetometry, and radiometry. Local methods included geological, speleological, and structural mapping, along with the collection of groundwater level data from tubular wells, karst springs, and lakes, as well as geophysical surveys in areas of interest using electrical resistivity imaging (ERI). Regional results indicate that the preferential karstification zones follow NE-SW and NW-SE directions, linked to tectonic forces that form grabens and horsts in the basement, as well as weakness zones in the limestone and metapelite rocks of the Sete Lagoas and Serra de Santa Helena formations. The potentiometric surfaces show a regional flow direction towards the NE, with evident drawdown cones in at least three regions, particularly in the industrialized portion north of Sete Lagoas. Since the onset of industrialization in the 1980s, there has been a reduction of about 30 m in the water level, reaching up to 100 m in the industrialized area. Locally, geophysical sections from electrical resistivity indicated both lateral and vertical continuities of regional karstification zones, correlated with surface karst features such as cave entrances, sinkholes, lakes, and springs. The analysis of the data, compiled into a 3D geological model, contributes to the hydrogeological understanding of the northeastern part of the city of Sete Lagoas and serves as a basis for future studies in water resource management.

Keywords: Karst; groundwater; structural geology; geophysical survey; speleology.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Apresentação	12
1.2	Objetivos.....	13
1.3	Estrutura da dissertação	14
2	CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	15
2.1	Localização da Área	15
2.2	Atividades Econômicas e Uso e Ocupação do Solo	15
2.3	Aspectos Fisiográficos.....	17
2.4	Contexto Geológico	18
2.4.1	Contexto Geotectônico	18
2.4.2	Geologia da Área de Estudo	22
2.5	Hidrogeologia da Área de Estudo.....	24
2.6	Gestão da Água em Sete Lagoas	26
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
3.1	Hidrogeologia Cárstica	28
3.2	Geofísica Regional	31
3.2.1	Gravimetria.....	31
3.2.2	Magnetometria.....	34
3.2.3	Radiometria	37
3.3	Geofísica Terrestre.....	40
3.3.1	Eletrorresistividade.....	40
3.4	Modelagem Geológica.....	42
4	MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1	Aquisição e tratamento de dados	44
4.2	Mapeamento Geológico.....	45
4.3	Processamento dos Dados Regionais	46
4.4	Lineamentos Morfoestruturais.....	48
4.5	Levantamento e Processamento de Dados Terrestres	49
4.6	Seções Geológicas	52
4.7	Modelo 3D.....	54
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	57
	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O carste é responsável pelo armazenamento da água que abastece cerca de 20-25% da população mundial (FORD e WILLIAMS, 2007). Neste sentido, a crescente demanda pelo suprimento de água e a escassez desse recurso em diversas regiões são fatores que, associados à complexidade dos terrenos cársticos, corroboram a importância de estudos que têm como objetivo conhecer de maneira mais aprofundada esses sistemas.

Goldscheider e Drew (2007) explicam que a dificuldade no estudo de regiões cársticas se dá, entre diversas razões, pela constante evolução dos aquíferos com o tempo, a heterogeneidade e anisotropia espacial e fatores como o efeito de escala de condutividade hidráulica e a dualidade de recarga e infiltração da água – que pode ser de origem também cárstica (autogênica) ou de regiões adjacentes não-cársticas (alogênica).

A evolução dos aquíferos cársticos acontece a medida em a água acidificada por CO₂ dissolve as rochas carbonáticas e torna maiores as estruturas já presentes nelas, como fraturas e zonas de intersecção de planos – reforçando a importância da geologia estrutural no entendimento desses sistemas (FORD e WILLIAMS, 2007). Em geral, pode-se dizer que a evolução temporal desses aquíferos gera sistemas de drenagens subterrâneas mais complexos.

Devido à grande complexidade, os terrenos cársticos são comumente estudados a partir de dados diretos associados aos dados indiretos, como a geofísica. As informações diretas – dados de campo a respeito das rochas, cursos d'água e feições de carstificação – são fundamentais no entendimento da área, enquanto a geofísica entra como uma ferramenta a ser utilizada de maneira complementar para entender as regiões com pobreza de dados diretos; motivo pelo qual é utilizada neste trabalho. Autores como Cardoso Pereira e Morais (2012), Oliveira *et al.* (2020) e Alves *et al.* (2021) realizaram levantamentos geofísicos em terrenos cársticos e obtiveram resultados satisfatórios na identificação de feições, como cavidades, condutos, sumidouros e fraturas.

A cidade de Sete Lagoas, localizada na região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais, está inserida no contexto geológico cárstico do Grupo Bambuí, sobre rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas. O abastecimento de água da cidade depende, principalmente, da exploração de águas subterrâneas que, associada ao crescimento urbano e industrial sem planejamento adequado, tem criado diversos obstáculos para a administração pública local, como a falta de água em períodos de seca e problemas geotécnicos nas áreas de maior exploração (SILVA, 1988; GALVÃO, 2015; SCHUCH, 2022).

Um ponto importante na cidade é a mudança do regime de algumas lagoas a partir do fim de década de 1990, que, devido à expansão urbana e aumento do consumo da água subterrânea, passaram de perenes a intermitentes, tendo água apenas nos períodos de chuva – entre dezembro e maio. Assunção (2019) constatou a direta relação entre um grande cone de rebaixamento, ocasionado pela grande exploração na zona urbana central, com a atual condição hídrica intermitente da lagoa do Matadouro, localizada em uma área mais periférica. Galvão *et al.* (2017) utilizam, também para confirmar essa conexão, isótopos ambientais associados à hidroquímica.

A lagoa Grande, um importante corpo hídrico da cidade, possui 1 km² e localiza-se a nordeste do município, em uma região que tem passado, nos últimos 15 anos, por um intenso processo de urbanização e industrialização. Alves *et al.* (2021) mostram que a lagoa vem apresentando uma diminuição considerável de seu volume de água sem sinais de recuperação; nos últimos 34 anos, a lagoa apresentou uma diminuição de 77% da área de seu espelho d'água. As investigações promovidas por Alves *et al.* (2021) foram precursoras na identificação dos fatores que estão levando à diminuição do volume de água da lagoa.

A motivação para este mestrado surge da necessidade de entender os fatores que levaram a um acentuado processo de carstificação na área da cidade que tem passado por grande crescimento. A combinação de uma abordagem geológico-geofísica na construção de um modelo 3D para o aquífero representará um avanço no estudo dos complexos terrenos cársticos. A compreensão da geologia local, associada ao comportamento hidráulico nessa região da cidade, ainda servirá como norteador para um futuro plano de gestão e preservação dos recursos hídricos da cidade.

1.2 Objetivos

O objetivo principal é entender como os fatores geológico-estruturais, na área nordeste da cidade de Sete Lagoas, estão relacionados com o desenvolvimento do carste nessa região. Os objetivos específicos incluem a identificação das rochas e as estruturas cársticas em campo, além da geração de mapas que facilitem o entendimento dessas em um contexto mais amplo e associadas com os métodos geofísicos propostos neste trabalho.

A hipótese levantada é de que as condições geológicas da área são fundamentais no processo de desenvolvimento de zonas preferenciais de redes de condutos cársticos. Diante disso, pretende-se responder as seguintes perguntas científicas norteadoras:

- Quais são as espessuras médias do aquífero na área de estudo?

- Quais são os principais fatores condicionantes das zonas de carstificação?
- Quais áreas a nordeste da cidade de Sete Lagoas são mais carstificadas?
- Qual as variações dos níveis de água do aquífero entre as estações chuvosa e seca?

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada de maneira a conter 5 capítulos. Após a apresentação do Capítulo 1, com a introdução e objetivos do trabalho, introduz-se o Capítulo 2, que contextualiza a área de estudo conforme os aspectos mais relevantes para a pesquisa. Nele, são abordadas desde a localização da área estudada em relação ao município de Sete Lagoas, as principais atividades econômicas e ocupação do solo, aspectos fisiográficos, até a geologia da região.

O Capítulo 3 contém a revisão das principais bibliografias acerca dos temas abordados neste trabalho. São abordados conceitos de carste de uma maneira mais ampla e como as feições de carstificação superficiais estão relacionadas ao complexo desenvolvimento desses sistemas em profundidade. Além disso, são abordados os métodos geofísicos utilizados, que partem de métodos geofísicos regionais, que objetivam entender como as estruturas regionais estão relacionadas com as estruturas locais identificadas na área. O método geofísico terrestre, a eletrorresistividade, aparece, ainda, como alternativa à identificação local de feições de carstificação em profundidades de até 60 m, como condutos.

O Capítulo 4 tem o objetivo de elucidar a aplicação dos métodos empregados no trabalho de maneira detalhada. O Capítulo 5, referente à discussão dos resultados e conclusões, é apresentado em formato de artigo científico, em língua inglesa e submetido a uma revista internacional.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização da Área

A cidade de Sete Lagoas está a cerca de 70 km de distância da capital do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, dentro do chamado Colar Metropolitano da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), que também inclui 15 outros municípios. A região norte da cidade foco deste trabalho inclui o parque industrial que tem apresentado grande crescimento nas últimas décadas; ele pode ser acessado por meio da rodovia MG-238 (Figura 2.1).

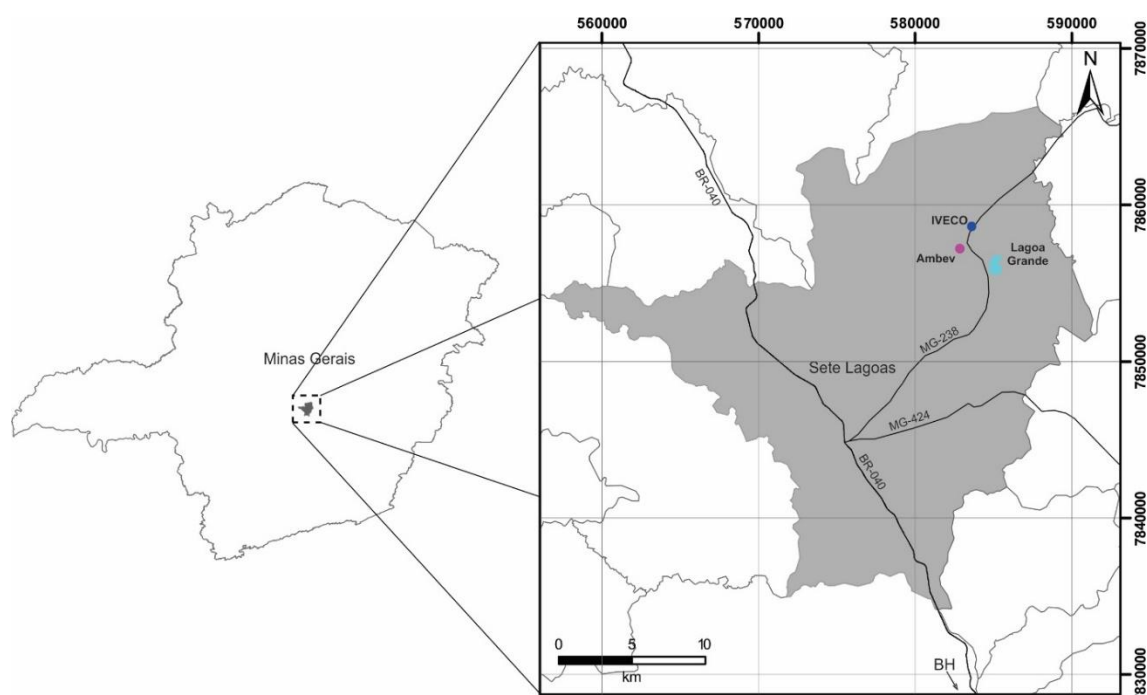


Figura 2.1 - Mapa de localização do município de Sete Lagoas em relação ao estado de Minas Gerais com as principais indústrias e rodovias. Retirado de Alves (2020).

2.2 Atividades Econômicas e Uso e Ocupação do Solo

Os dados do último censo do Instituto Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento (IBGE) de 2022 indicam uma população estimada de 227.397 habitantes, com densidade demográfica de 423,51 pessoas por quilômetro quadrado. Sete Lagoas é considerada, portanto, uma cidade de médio porte, cujo desenvolvimento econômico está associado aos setores agropecuário, de serviços e, principalmente, ao industrial. Embora ainda abaixo das médias do estado de Minas Gerais, a cidade apresenta destaque na produção de leite, cana-de-açúcar e soja. Além disso, o município ainda conta com uma unidade da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

(EMBRAPA), que fomenta a pesquisa e desenvolvimento agrícola nos produtos milho e sorgo, principalmente.

O crescimento industrial do município se deu por volta da década de 50, na qual houve a implantação da zona metalúrgica de Minas Gerais – polo de produção de ferro-gusa consolidado com a Sider sete, primeira siderúrgica do município. A partir dos anos 60, diversas indústrias foram transferidas para a Região de Sete Lagoas, criando-se um parque industrial expressivo. Posteriormente, empresas como Itambé, Bombril, Elma Chips, Iveco e AmBev impulsionaram e ainda representam os principais agentes responsáveis pelo crescimento urbano-industrial da cidade (LANDAU *et al.*, 2011).

O mapa de uso e ocupação do solo (Figura 2.2), gerado a partir dos dados do Mapbiomas (2022), é dividido em 5 diferentes classes: 1) Florestas; 2) Formações Naturais não Florestais; 3) Agropecuária; 4) Áreas não vegetadas e 5) Corpos D'água. Dentro de cada uma dessas classes, existem subdivisões mais específicas, que incluem, por exemplo, as atividades relacionadas à agropecuária desenvolvidas na cidade, como a silvicultura, pastagens, soja e demais lavouras.

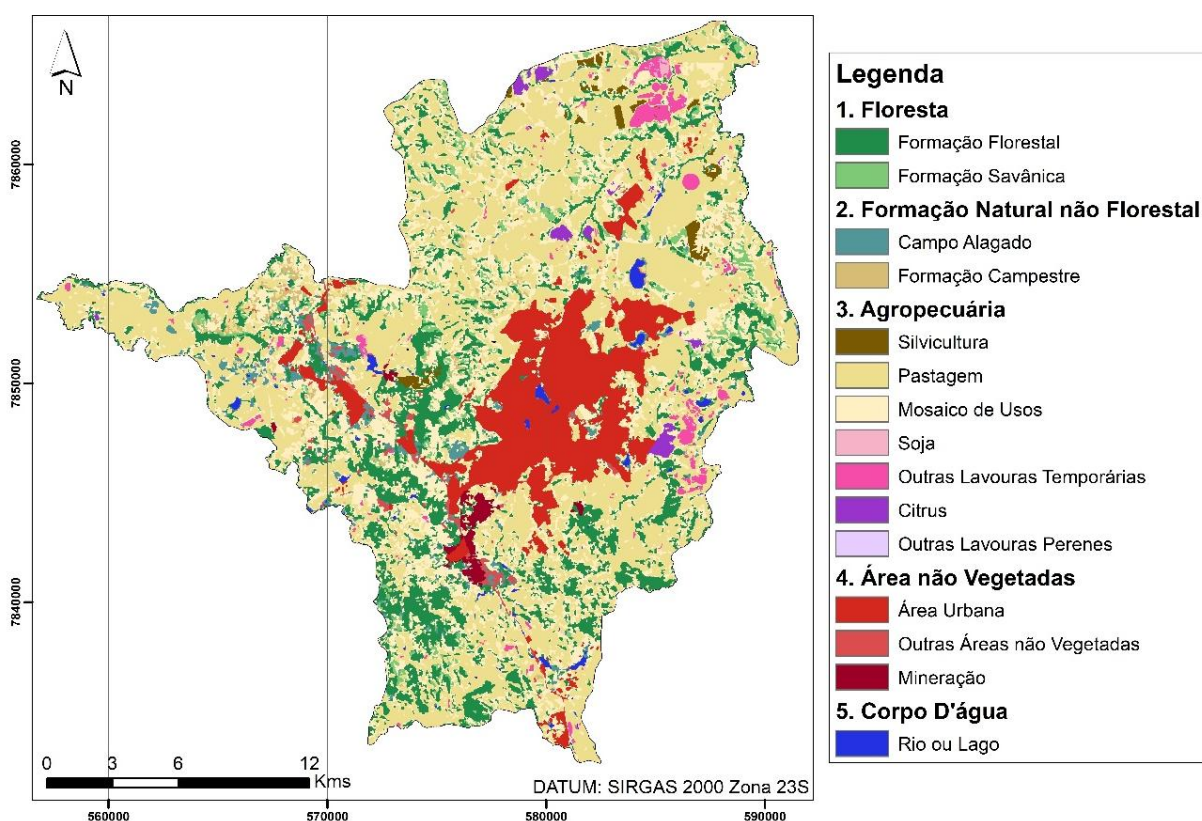


Figura 2.2 - Mapa de Uso e Ocupação do Solo na cidade de Sete Lagoas, ano 2022. Dados do Mapbiomas (2022).

Percentualmente, a área de cada classe está discriminada conforme a Tabela 2.1. A agropecuária é o destaque e representa 66,64% da área total do município, de 536,93 km², seguida das áreas com vegetação, com 16,8% do total, e das áreas não vegetadas, com 12,83%. As áreas não vegetadas incluem a porção urbanizada, que representa 11.25% do total, e as áreas sob domínio das minerações de calcário, que somam 0.68%.

Tabela 2.1 - Classes de Uso e Ocupação na cidade de Sete Lagoas em 2022.

Classe	Código no Mapa	Área (km²)	Área Percentual (%)
Floresta	1	90,25	16,81
Formação Natural não Florestal	2	15,97	2,97
Agropecuária	3	357,81	66,64
Área não Vegetada (total)	4	4,85	12,84
Área Urbanizada	4	60,44	11,26
Mineração	4	3,65	0,68
Corpo D'água	5	3,54	0,66

Fonte: Tabela gerada pelo autor com dados de Mapbiomas (2022).

2.3 Aspectos Fisiográficos

A altitude na área de estudo varia de 578 a 1211 m, diminuindo de sudoeste para nordeste. As maiores elevações estão localizadas na Serra de Santa Helena. O relevo do município é moldado pela relação dos padrões estruturais com as rochas calcáreas. As fraturas, falhas, altos e baixos estruturais do embasamento e a o processo de dissolução dos calcários são os principais condicionantes do padrão geomorfológico da área. Esse tipo de interação também propiciou a formação de cavernas, paredões de calcário, dolinas, sumidouros e bacias de drenagem fechadas (PESSOA, 1996, LEÃO, 2008; TULLER *et al.*, 2010; GALVÃO, 2015).

Um dos tipos de relevo presente na área é o relevo ondulado, colinoso e rebaixado, que se desenvolve sobre as rochas pelíticas de baixa permeabilidade da Formação Serra de Santa Helena. Essa área é caracterizada por vales abertos, e a drenagem geralmente segue um padrão dendrítico. Na região sul, onde se encontram as rochas do Complexo Belo Horizonte, o relevo se apresenta em uma forma geomorfológicamente arrasada, com morros ondulados (CPRM, 1994; TULLER *et al.*, 2010).

As lagoas que dão nome ao município são características do processo de carstificação típico deste domínio geomorfológico e foram formadas por dolinamento. Na região, também

são encontrados condutos e galerias alimentados por sumidouros (CPRM, 1994). Muitos desses sumidouros estão situados no fundo das lagoas, conforme identificado por Assunção (2019) e Alves (2021). As grutas, que são bastante comuns na área, representam também feições de carstificação de destaque. Algumas delas incluem a Gruta do Esquecimento, as Grutas Pendentes, a Gruta Torre e, a mais conhecida, a Gruta Rei do Mato. Esta última foi reconhecida como uma Unidade de Conservação Estadual de Proteção Integral em 2009 e faz parte do Circuito das Grutas de Minas Gerais e da Rota Lund, juntamente com as Grutas da Lapinha e Maquiné. Com uma extensão total de 998 metros, sendo 220 m acessíveis ao público, a Gruta Rei do Mato possui salões com desnível de 30 m, onde podem ser encontradas estalagmites e estalactites raras (Associação do Circuito Turístico das Grutas – ACTG, 2019).

O clima na região é classificado como tropical semiúmido, caracterizando-se por verões quentes e chuvosos, e invernos secos (TULLER *et al.*, 2010). A precipitação média anual alcança 1321 mm. A região apresenta duas estações bem definidas: a estação seca, que vai de abril a setembro, apresenta uma precipitação mínima de 5 mm em junho, enquanto a estação úmida, de outubro a março, concentra 91% da precipitação anual, com um pico máximo de 324 mm em dezembro. A temperatura média na região é de 21,7°C, sendo fevereiro o mês mais quente, com uma média de 23,7°C, e junho o mês mais frio, com uma média de 18,3°C (INMET, 2021).

2.4 Contexto Geológico

2.4.1 Contexto Geotectônico

A área de estudo está localizada no extremo sudeste do Cráton do São Francisco (Figura 2.3), caracterizado como uma unidade tectônica consolidada ao fim da orogenia brasiliana, no neoproterozoico, e limitado conforme as zonas de sutura nas proximidades da faixa Brasília a sul e a oeste, Rio Preto a noroeste, Riacho do Pontal e Sergipana a norte e Araçuaí a sudeste (ALMEIDA, 1977; ALKMIM *et al.*, 1993; TULLER *et al.*, 2010).

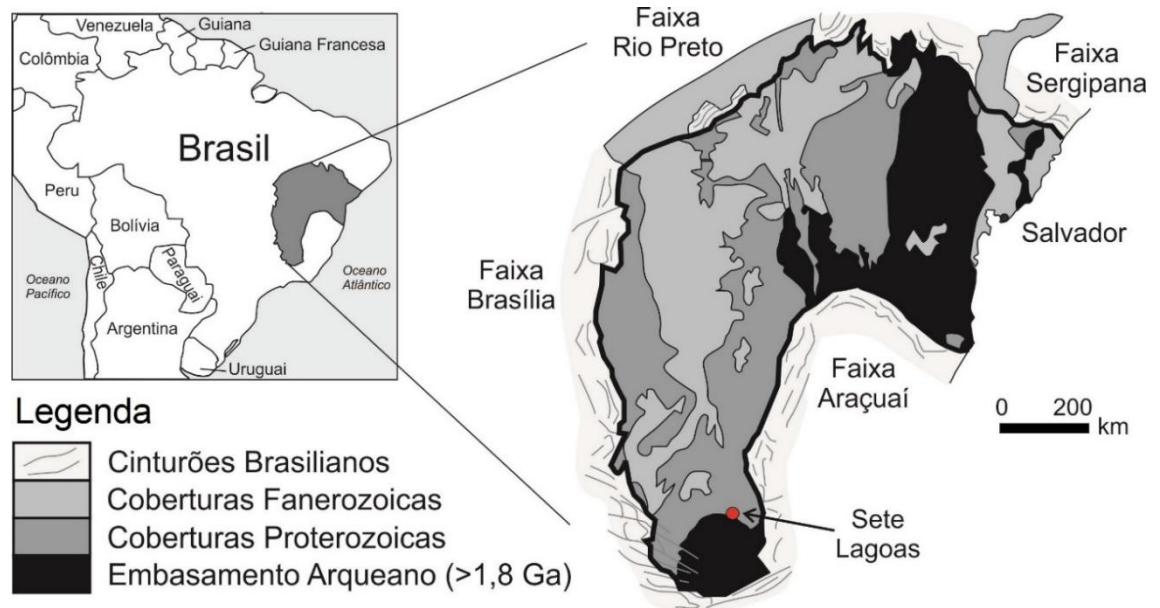


Figura 2.3 - Mapa do domínio tectônico no qual se encontra a cidade de Sete Lagoas. Retirado de Cruz e Alkmim (2006).

O embasamento do cráton é constituído por terrenos *granito-greenstone* arqueanos, cinturões supracrustais do Proterozoico Inferior e terrenos de médio e alto grau de metamorfismo do Proterozoico Inferior (CORDANI e BRITO NEVES, 1982). As feições tectônicas encontradas nessas porções são mais antigas que 1,8 Ga e afloram em duas porções: entre a cidade de Belo Horizonte e o sudoeste do estado de Minas Gerais e no centro-leste da Bahia (ALKMIM, 2004; TEIXEIRA, 1985).

A cobertura do cráton é constituída, em grande parte, por unidades morfotectônicas pré-cambrianas e fanerozoicas, formadas pela Bacia do São Francisco, o Aulacógeno do Paramirim e grande parte do Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá. O Aulacógeno do Paramirim é a feição morfotectônica da porção norte do cráton sendo preenchido pelos supergrupos Espinhaço e São Francisco. O Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá representa um ramo não evoluído do sistema de riftes que deu origem ao Atlântico Sul (ALKMIM, 2004).

A Bacia do São Francisco ocupa quase todo o segmento meridional do cráton nos estados de Minas Gerais, Bahia e Goiás (ALKMIM e MARTINS-NETO, 2001). Os seus limites oeste, noroeste e leste coincidem com os limites do cráton; o limite sul é de natureza erosiva; um trecho do limite nordeste é também marcado pelo contato embasamento-cobertura, e, na parte restante, a bacia se justapõe ao Aulacógeno do Paramirim (ALKMIM, 2004).

A intensidade de deformação na área é centrífuga, sempre aumentando a partir do interior do cráton em direção às faixas móveis (TULLER *et al.* 2010). Segundo a CPRM (2003),

foram identificadas três etapas de deformação: uma distensiva, uma compressiva e outra distensiva. Antes da deposição da Bacia do São Francisco, destacam-se a foliação gnáissica presente em quase todo o Complexo Basal e feixes de diques de rochas básicas, visíveis em fotos aéreas com orientação NNW-SSE, além de veios de quartzo em direção ENE-WSW. A primeira etapa é caracterizada por falhamentos extensionais de alto ângulo (NNW-SSE) que ocorreram durante a sedimentação das sequências pelítico-carbonáticas do Grupo Bambuí. A segunda etapa envolve cisalhamento compressivo de baixo ângulo, orientado N-S, marcado por falhas de empurrão sub-horizontais, zonas de cisalhamento interestratais e dobras, definindo uma tectônica epidérmica do tipo *thin-skinned*. A etapa final é composta por movimentos extensivos dos blocos do embasamento, resultando em antiformes e sinformes orientados E-W, além de falhas normais.

Foram ainda identificadas fraturas associadas a zonas de cisalhamento rúpteis, que cruzam várias camadas em direções N10-20W, N50-60E e E-W, além de fraturas no Grupo Bambuí orientadas N50-60W, N20-40E e N0-20W. De acordo com a CPRM (2003) e Tuller *et al.* (2010), Sete Lagoas está inserida em um domínio transicional (Figura 2.4) com intensidade de deformação que varia de moderada a fraca, permitindo o reconhecimento de estruturas sedimentares e feições mesoscópicas (como dobras, falhas e boudins) envolvendo poucos estratos.

As dobras na região são apertadas e assimétricas, contrastando com as isoclinais recumbentes observadas mais a leste. As rochas do embasamento aparecem em pequenas janelas estruturais ao sul do domínio. A Formação Serra de Santa Helena exhibe dobras assimétricas com vergência para oeste, ainda influenciadas por deslizamentos interestratais. A base do Membro Pedro Leopoldo apresenta intensa deformação, marcada pelo descolamento basal, enquanto nas litofácies do Membro Lagoa Santa, a foliação S1 é observada localmente, com predominância de zonas de cisalhamento interestratais (CPRM, 2003).

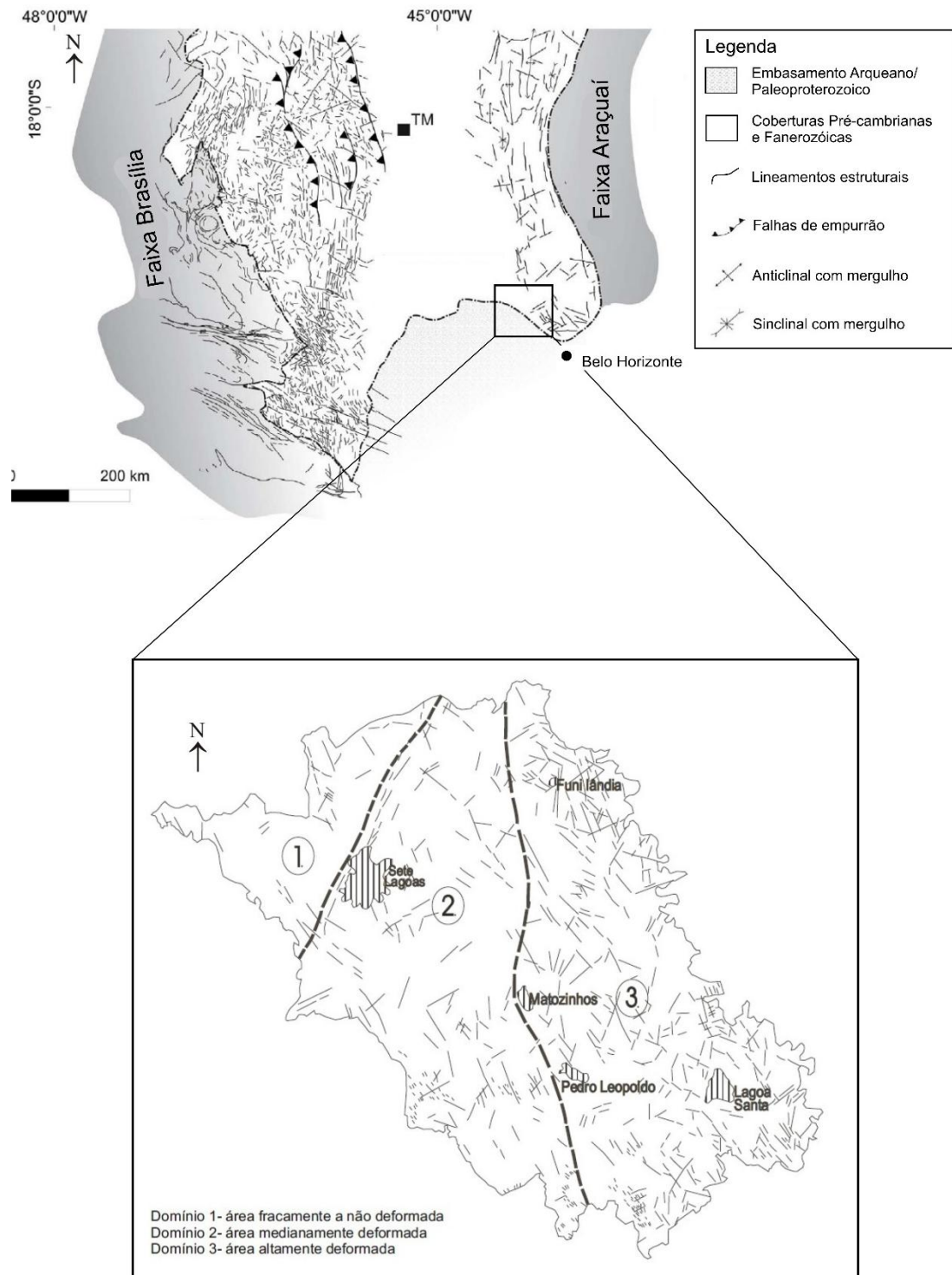


Figura 2.4 – Na porção superior, o mapa simplificado da bacia do São Francisco meridional com os principais elementos estruturais das faixas de *foreland* Brasília e Araçuaí, a oeste e a leste, respectivamente. Modificado de Reis *et al.* (2017). A ampliação, abaixo, exemplifica os domínios de deformação no qual a cidade de Sete Lagoas e a área de estudo estão inseridas (domínio 2). Retirado de CPRM (2003).

2.4.2 Geologia da Área de Estudo

Na região norte da cidade de Sete Lagoas, a sequência estratigráfica é proposta por Tuller *et al.* (2010), detalhada por Galvão (2015) em mapa geológico na escala 1:25.000 e segue, da base para o topo, a seguinte ordem: embasamento cristalino, Formação Sete Lagoas, Formação Serra de Santa Helena e cobertura inconsolidada cenozoica (Figura 2.5).

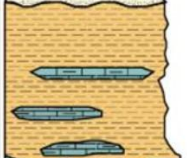
Super-grupo	Grupo	Formação	Membro	Idade (Ma)	Espessura (m)	Local Tipo	Coluna Estratigráfica	Litologia	Ambiente Depositional
São Francisco	Bambul				0 - 40			Aluviões com areias de granulometria variada e cascalhos.	
					0 - 30			Cobertura detrítica areno-argilosa com camadas lateríticas delgadas.	
		Serra de Santa Helena		600	200	Serra de Santa Helena		Metapelitos em camadas tabulares de espessura média a espessa, de cor cinza-esverdeado a preta. Apresentando marcas onduladas suaves, estruturas de carga e estratificação cruzada, se são. Intercalados por camadas tabulares de metassiltitos calcíferos, de espessura delgada a média e de cor esverdeada a acinzentada.	Transgressão marinha, afogamento platfomal.
		Sete Lagoas	Lagoa Santa	a	80	Pedreira de Carvão		Metacalcissiltitos em camadas tabulares de espessura delgada a média, coloração de cinza claro azulado e esverdeado, com intercalações, de camadas muito finas a delgadas de metargilitos. Lamitos algálicos.	Marinho, plataforma externa para plataforma rasa. No topo, marinho raso, borda de plataforma.
			Pedro Leopoldo	800	100	Pedreira Canaã e Ilcom		Metacalcarenitos, finos a grosseiros, em camadas tabulares de espessura média a espessa, coloração de preto a cinza no topo.	
	Complexo Gnáissico-Migmatítico (Embasamento cristalino)							Gnaisses indiferenciados, migmatitos com estruturas dobradas, nebulíticos, dictoníticos, schiliren, estilolíticos e surreíticos. Poções graníticas com granulação média a grosseira.	

Figura 2.5 - Coluna estratigráfica com a geologia local da área de estudo. Modificado de Tuller *et al.* (1992).

O embasamento cristalino arqueano é composto pelo Complexo Belo Horizonte, caracterizado, segundo Ribeiro *et al.* (2003), como um agrupamento de rochas gnáissicas associadas com granitoides e zonas migmatizadas, com feições polimetamórficas que correspondem ao Cráton São Francisco; representando 20% dos litotipos que afloram no município, principalmente na região sul. Este complexo ainda sofreu injeções básicas que acarretaram o aparecimento de diques de rochas básicas (RIBEIRO, 2003). Pessoa (1996) ressalta que as porções migmatizadas deste complexo apresentam alto grau de fraturamento, com preenchimento por calcita, veios quartzo-feldspáticos e pegmatoides. Galvão (2015) e Magnabosco (2020), por meio da análise altimétrica de poços tubulares, identificaram

evidências de basculamento em blocos, além de um contato discordante e brusco com as rochas supracrustais.

A Formação Sete Lagoas constitui a principal unidade aquífera do município de Sete Lagoas e encontra-se aflorante, principalmente nas porções centrais e oeste da cidade, constituindo cerca de 27% da superfície (GALVÃO, 2015). Diferenciada por Costa e Branco (1961) e redefinida por Schöll (1976), Dardenne (1978), Grossi Sad e Quade (1985), essa formação é constituída por rochas carbonáticas-siliciclásticas e dividida em dois membros: o inferior, Membro Pedro Leopoldo, e o superior, Membro Lagoa Santa (RIBEIRO *et al.*, 2003; TULLER *et al.*, 2010; GALVÃO, 2015).

O Membro Pedro Leopoldo é identificado em 3 litofácies diferentes nas imediações de Sete Lagoas; são elas: litofácies 1, composta por calcilitos de coloração cinza claro a bege com intercalações de pelito amarelo; litofácies 2, que é caracterizada por calcilitos com cristais de aragonita e acamamento tabular e laminado; e litofácies 3, com dolomitos em camadas sobrepostas com espessura métrica a submétrica (VIEIRA *et al.*, 2007; GALVÃO, 2015).

O Membro Lagoa Santa é definido como um calcário cinza-escuro a preto em camadas tabulares e pouco espessas. Esse membro possui duas litofácies: litofácies 5, composta por calcarenitos e calcisiltitos pretos com laminação plano-paralela, truncamento de ondas e estratificação cruzada de médio porte (Figura 3); e litofácies 6, com estromatólitos bem preservados de ambiente plano de maré (VIEIRA *et al.*, 2007; GALVÃO, 2015).

A Formação Serra de Santa Helena abrange cerca de 40% do município de Sete Lagoas e ocorre, principalmente, na serra de mesmo nome, na porção centro meridional da cidade (DARDENNE, 1978). Essa formação é composta por litotipos de origem siliciclástica com raros sedimentos carbonáticos. As rochas mais comuns são argilitos e siltitos intercalados com lentes de margas e calcarenitos muito finos com espessuras variadas. Tuller *et al.* (2010) ainda afirmam que podem ocorrer arenitos finos a muito finos, micáceos e friáveis que, embora escassos, aparecem geralmente em camadas descontínuas intercaladas aos pelitos. As principais estruturas planares nesta formação são falhas, foliações e fraturas; as falhas são, principalmente, normais e de empurrão, com direção principal NNW-SSE (DANDERFER FILHO, 1991; TULLER *et al.*, 2010). De maneira geral, esses pelitos são encontrados em elevado estágio de alteração em superfície e ocorrendo, também, como maciços de ardósia esverdeada (PESSOA, 1996).

Os sedimentos inconsolidados cenozoicos são diferenciados entre coberturas detríticas areno-argilosas com níveis de cascalhos, terraços aluviais e aluviões ao longo dos rios das Velhas e Paraopeba. Esses sedimentos recobrem a Formação Sete Lagoas e localizam-se em grande parte da área de malha urbana (Figura 2.6), além das drenagens e terraços dos rios, abarcando cerca de 10% do território setelagoano (GALVÃO, 2015).

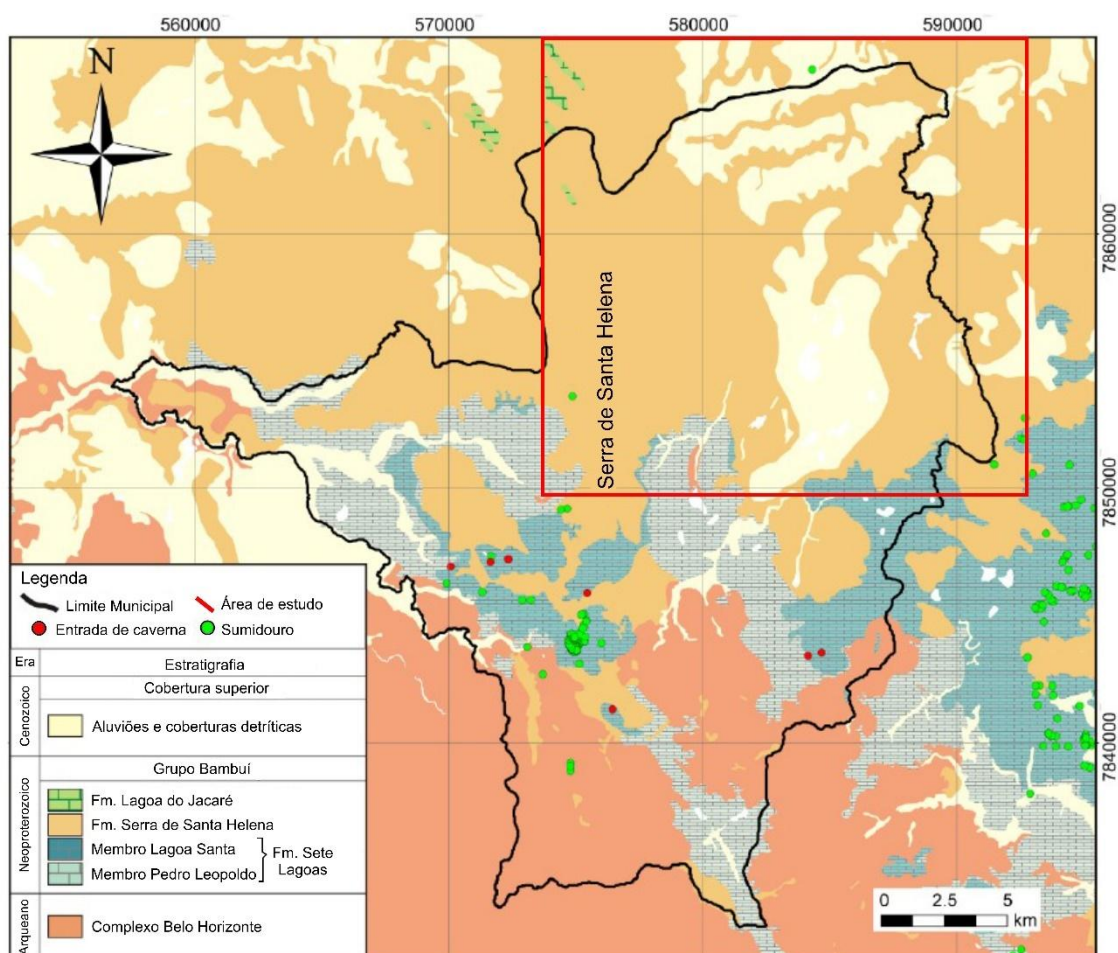


Figura 2.6 - Geologia no município de Sete Lagoas e na área de estudo. Modificado de Galvão *et al.* (2015).

2.5 Hidrogeologia da Área de Estudo

Sete Lagoas tem sido estudada por autores como Pessoa (1996), Galvão (2015), Magnabosco (2019) e Alves *et al.* (2021) que desenvolveram modelos hidrogeológicos conceituais, analisaram as características hidrogeológicas da região e suas implicações na área urbana. São identificados, na região, 3 tipos de aquífero: o aquífero fissural, representado pelas rochas do embasamento cristalino; o aquífero poroso, associado aos sedimentos cenozoicos

inconsolidados; e o aquífero cárstico, formado pelas rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas. A Formação Serra de Santa Helena atua como um aquífero.

O aquífero cárstico também pode estar conectado aos demais aquíferos já que, em contato com o embasamento, os condutos cársticos e as fraturas das rochas cristalinas têm a possibilidade de se interligarem, formando o que é denominado aquífero cárstico-fissural. Além disso, os sedimentos podem ser depositados diretamente sobre os carbonatos em razão de lapsos na sedimentação ou da erosão dos pelitos presentes na Formação Serra de Santa Helena. A circulação da água subterrânea ocorre predominantemente ao longo dos condutos que seguem os planos de acamamento do Membro Pedro Leopoldo, além das fraturas verticais, o que aumenta a interconexão e a permeabilidade do aquífero (GALVÃO, 2015).

A matriz rochosa apresenta uma porosidade e condutividade hidráulica extremamente baixas, cerca de 3% (PEÑARANDA, 2016) e 10^{-9} m/s (GALVÃO *et al.*, 2016). Isso se deve à recristalização da calcita em resposta às forças tectônicas associadas ao evento Brasiliano, além do preenchimento das fraturas por calcita e veios de quartzo. O Membro Lagoa Santa abriga antigos condutos, que se apresentam na forma de cavernas e grutas secas, que serviam de vias para o antigo fluxo de água. A região central do município é a mais susceptível ao processo de carstificação, com sedimentos não consolidados sobre o calcário, o que favorece a infiltração de águas acidificadas pelo ácido húmico oriundo dos sedimentos (GALVÃO, 2015).

A descarga do aquífero cárstico ocorre quase exclusivamente por poços, sendo que, conforme Pessoa (1996), apenas 4 das 36 nascentes do município e mais de 80% dos poços são originários deste aquífero. Magnabosco *et al.* (2020) estimou que anualmente são explotados cerca de $2,41 \times 10^7$ m³ de água, o que representa 15,8% da precipitação total.

A recarga do aquífero cárstico se dá de forma tanto direta quanto indireta (Figura 2.7). A recarga autogênica acontece por meio de dolinas, sumidouros, cavernas, grutas e afloramentos, representando entre 35 e 75% da precipitação; já a recarga alogênica ocorre por meio dos sedimentos inconsolidados e das fraturas do embasamento, contabilizando 25 a 55% da precipitação (MAGNABOSCO, 2019). Pessoa (1996) avaliou que a taxa de recarga anual é de 19,8% da precipitação média para o aquífero cárstico, sendo que a maior parte desse total se destina ao escoamento subterrâneo (15,3%), seguida pela captação em poços tubulares (2,4%) e pela recarga do aquífero cárstico profundo (2,1%), o que equivale a 6,2% do excedente hídrico total. Em um recálculo da recarga anual, Magnabosco (2019) encontrou um valor de 18,2% da precipitação média, sendo que 2,4% é destinada à recarga profunda.

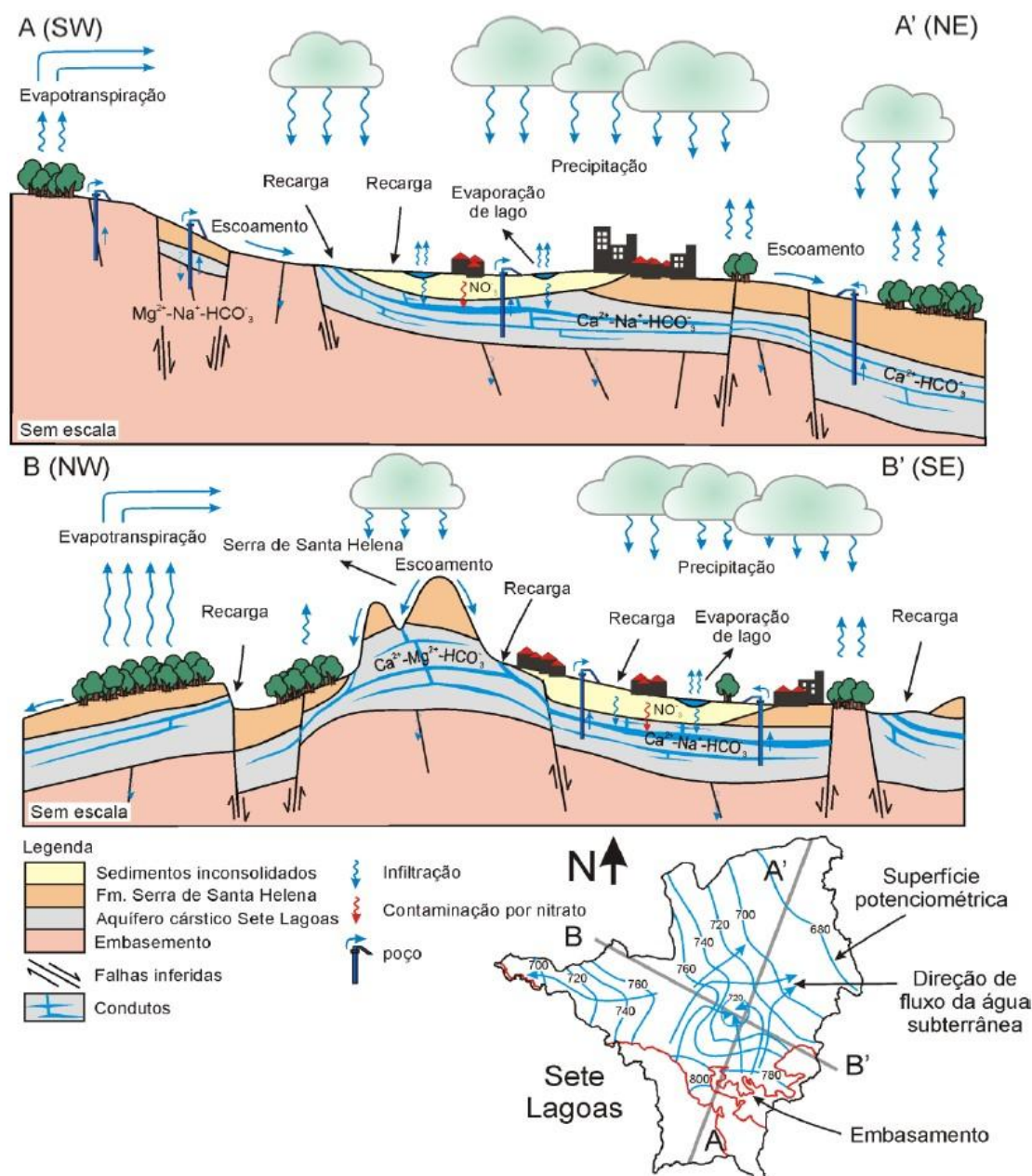


Figura 2.7 - Modelo Hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas. Retirado de Galvão (2015).

2.6 Gestão da Água em Sete Lagoas

O SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto) é responsável pela administração direta e exclusiva dos serviços públicos de água e esgoto em Sete Lagoas, conforme o Art. 3º da Lei Municipal nº 5.749. Atualmente, o SAAE garante o abastecimento de água de 99,9% da população de Sete Lagoas por meio da captação de água subterrânea por poços tubulares e da captação superficial do rio das Velhas, que atende 30% do município. A infraestrutura de abastecimento conta uma rede de 1038 km, 54 reservatórios, 2 estações de tratamento de água

(ETA), 29 unidades de tratamento simplificado (UTS), 31 estações elevatórias de água (EEA) e 105 poços (SCHUCH, 2022).

A questão hídrica é complexa em municípios que dependem principalmente de águas subterrâneas, especialmente em regiões cársticas. A Estação de Captação Rio das Velhas, que começou a operar em junho de 2016, retira cerca de 10 milhões de litros de água por dia, abastecendo um terço da população de Sete Lagoas. Com o crescimento demográfico projetado para 317.012 habitantes em 2035, haverá uma crescente demanda por infraestrutura urbana, incluindo energia, educação, saúde, moradia, lazer e, principalmente, abastecimento de água e saneamento (SANTOS, 2016).

Nunes Jr. *et al.* (2010) elucida que a oferta de água do SAAE pode não acompanhar a demanda crescente, tornando necessário maior captação de água de áreas mais distantes. O município possui, ainda, cerca 198 poços privados, totalizando 313 poços, dos quais 204 estão ativos, incluindo aqueles administrados pelo SAAE e registrados no SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, e em processos de outorga na SUPRAM (MAGNABOSCO, 2019).

O Instituto Trata Brasil, em parceria com o CEPAS/USP – Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas da Universidade de São Paulo, estimou em 2019 que 88% dos poços no país estão fora dos registros oficiais, resultando em uma significativa defasagem de informações para a gestão hídrica (HIRATA *et al.*, 2019). Em Sete Lagoas, dados do Censo de 2010 (IBGE) indicaram 1179 poços no município a partir da “declaração de forma de abastecimento de água”, embora o levantamento desse mesmo estudo identifique apenas 392 poços existentes no município até 2010 (131 regulares e 261 irregulares) com localização e/ou parâmetros conhecidos. Schuch (2022) considera 787 poços como clandestinos quando o censo de 2010 foi realizado, representando aproximadamente 67% do total.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Hidrogeologia Cárstica

Carste é um termo utilizado para definir terrenos cuja relação entre a água subterrânea e as rochas culmina na formação de paisagens com dolinas, cavernas, uvalas, sumidouros, paredões e depressões, além de um grande sistema de água subterrânea desenvolvido a partir da dissolução das rochas. As principais litologias presentes em ambientes cársticos são as carbonáticas, principalmente os calcários e dolomitos que, em contato com o CO₂ dissolvido nas águas meteóricas, passam pelo processo de dissolução em planos pré-existentes que facilitam a percolação de fluidos, como o acamamento sedimentar, falhas e fraturas (FORD e WILLIAMS, 2007).

As rochas carbonáticas representam quase um quarto da superfície terrestre e, no Brasil, o desenvolvimento do carste se dá, principalmente, em calcários e dolomitos do Proterozoico Superior e Cambriano Inferior, cobrindo cerca de 2,5% da área continental do país (AULER e FARRANT, 1996; FORD e WILLIAMS, 2007). Grande parte dessas rochas é formada em ambientes sedimentares marinhos, embora rochas metamórficas e ígneas também possam conter minerais carbonáticos. A compactação, cimentação e dolomitização são processos que podem alterar significativamente a porosidade e a permeabilidade das rochas com minerais carbonáticos, mas o principal processo pós-deposicional é a carstificação (MARGAT e GUN, 2013; SÁNCHEZ e LOBO, 2016; FREEZE e CHERRY, 2017).

O início do processo de carstificação ocorre com a absorção de CO₂ da atmosfera pela chuva, que penetra o solo, onde absorve mais CO₂, proveniente da matéria orgânica, e forma uma solução de ácido carbônico: $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{H}_2\text{CO}_3$. A água ácida infiltra no substrato e, uma vez em contato com as rochas carbonáticas, adentra as juntas, fissuras ou fraturas pré-existentes, acarretando a dissolução ($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$). A medida em que são dissolvidas, as estruturas são progressivamente alargadas, facilitando ainda mais a passagem da água. Com o fornecimento contínuo de água enriquecida em CO₂, as regiões cársticas se transformam rapidamente ao longo do tempo e espaço, permitindo a formação de uma porosidade secundária muito bem desenvolvida, com condutos subterrâneos, cavernas e demais feições de carstificação conhecidas, como ilustra a Figura 3.1 (BRITISH COLUMBIA, 2003; FORD e WILLIAMS, 2007; BONACCI, 2015).

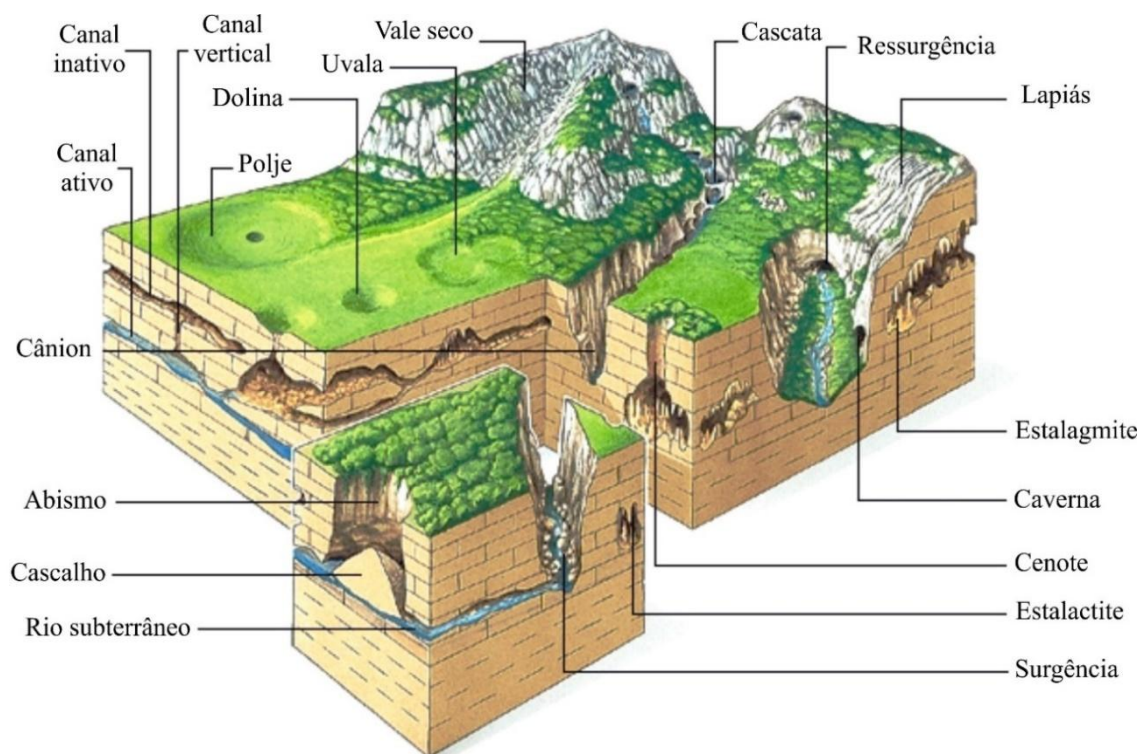


Figura 3.1 - Bloco diagrama com as principais feições cársticas no ambiente. Retirado de Larousse (2018).

O carste pode ser classificado em exocarste (subaéreo), epicarste (subcutâneo) e endocarste (subterrâneo). As feições geomorfológicas mais destacadas em superfície são principalmente as do exocarste e refletem o desenvolvimento do epicarste e outras estruturas do aquífero (GOLDSCHIEDER e DREW, 2007).

O epicarste, situado no topo da zona vadosa, é a região mais intemperizada e pode conter pouco ou nenhum solo (FORD E WILLIAMS, 2007). Esta zona é caracterizada por uma maior e mais uniforme permeabilidade devido à fissuração e carstificação. A espessura do epicarste varia entre decímetros e dezenas de metros e tem como principais funções o armazenamento de água e a concentração do fluxo (GOLDSCHIEDER e DREW, 2007).

As formas cársticas podem ser agrupadas em três tipos principais: formas de absorção epigênicas, onde ocorre a infiltração de água no carste; formas de condução hipogênicas, onde a água circula no aquífero, dentro das cavernas e condutos; e formas de emissão, nas quais a água hipogênica retorna à superfície através de surgências (FEITOSA *et al.*, 2008). Algumas das formas cársticas mais comuns são as dolinas, uvalas, poljes e cavernas.

As dolinas, consideradas por alguns autores como as feições mais típicas e representativas de paisagens cársticas, são caracterizadas por formas geométricas, circulares ou ovais, que possuem, normalmente, largura maior que a profundidade. As dolinas mais comuns

são as de dissolução, embora existam diversos outros tipos, classificadas de acordo com os mecanismos de sua gênese ou sua geometria, a depender do autor (TRAVASSOS, 2019). A Figura 3.2 ilustra as principais dolinas compiladas e sintetizadas por Ford e Williams (2007) a partir da literatura disponível: 1) as dolinas de dissolução, 2) as de colapso ou abatimento, 3) as de subsidência, 4) as encobertas ou enterradas, 5) as de cobertura e 6) as de subsidência.

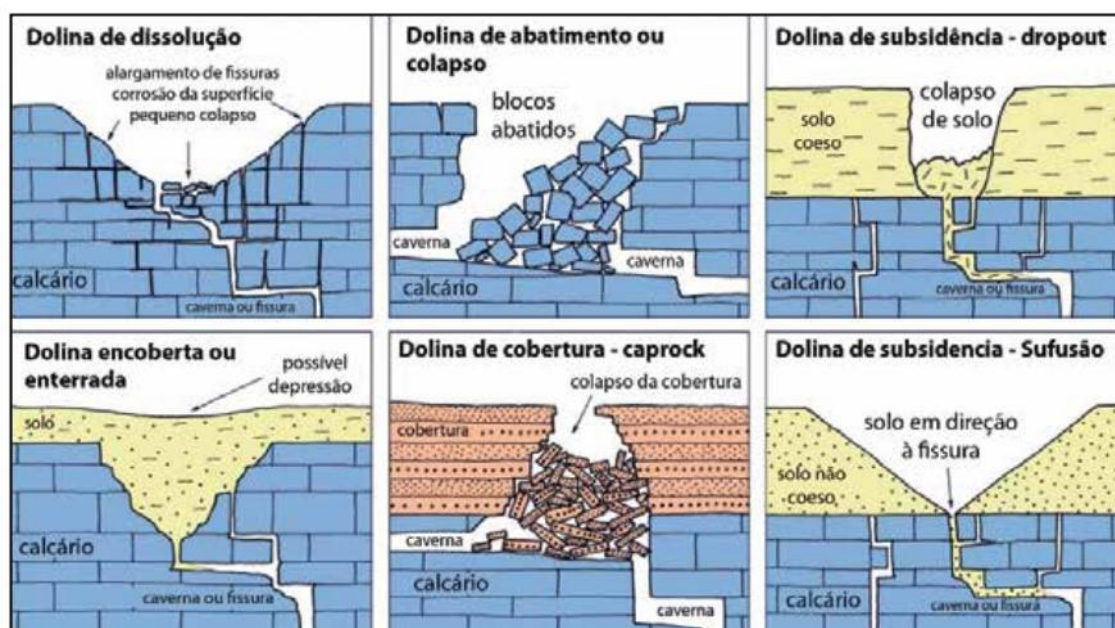


Figura 3.2 - Modelos conceituais de classificação de dolinas conforme mecanismos genéticos. Fonte: Ford e Williams (2007).

As uvalas são caracterizadas como depressões alongadas e irregulares que podem atingir extensões quilométricas e estão situadas acima do nível de base do carste regional. Seu fundo geralmente é ondulado ou irregular, devido à presença de dolinas e sumidouros associados. Em alguns casos, são aplainadas devido a sedimentos coluviais. A origem e o desenvolvimento dessa feição são fortemente influenciados por fatores estruturais, também podendo ser inundadas, apresentando assim um lago temporário (TRAVASSOS, 2019). Čalić (2009; 2011) entende que as uvalas, ao contrário das dolinas, que possuem drenagem concentrada em um único ponto, são mais complexas já que possuem diversos pontos de recarga.

Os poljes também são feições importantes, caracterizados como grandes depressões fechadas que frequentemente possuem mais de um quilômetro de extensão. Essa formação é resultante de processos poligenéticos, incluindo ações tectônicas, cársticas e fluviais. Kranjc (2013) aponta que os poljes podem estar abertos, uma vez que rios podem fluir para fora dos limites da depressão. Em poljes com nível freático, a água do lago sazonal dissolve tanto a rocha

quanto os sedimentos do fundo, promovendo um processo de aplainamento por dissolução (TRAVASSOS, 2019).

3.2 Geofísica Regional

Os métodos geofísicos são utilizados com o objetivo de obter informações acerca das propriedades físicas dos materiais que compõem a superfície terrestre de maneira indireta. Por meio das análises geofísicas é possível inferir estruturas geológicas, como falhas e fraturas, diferenciar litologias e até identificar a presença depósitos minerais associados às rochas e suas estruturas (KEARY *et al.* 2019). Os métodos potenciais referem-se a técnicas que utilizam medições dos campos físicos naturais que não dependem da propagação de ondas, como a gravidade, o magnetismo (TELFORD *et al.*, 1990).

3.2.1 Gravimetria

O método gravimétrico se baseia no estudo do gradiente da aceleração gravitacional terrestre. As causas dessas variações incluem a rotação e o achatamento da Terra, o acoplamento gravitacional com o Sol e a Lua, além de variações morfológicas e densidade resultantes de mudanças composicionais e/ou geológicas na crosta terrestre (CPRM, 2021). Autores como de Catro e Castelo Branco (1999) e Féres *et al.* (2021) usaram a gravimetria no estudo da geometria de bacias sedimentares e obtiveram bons resultados nas bacias do Vale do Cariri e na borda leste do Cráton São Francisco, respectivamente.

É sabido que a forma da Terra não é perfeitamente homogênea, da mesma maneira que a aceleração gravitacional também não é constante em toda a superfície. Essa premissa serve como base para o estudo da forma verdadeira do planeta. As medições realizadas por métodos geodésicos e os rastreamentos de satélite mostram que a Terra tem uma forma esferoidal, arredondada no equador e achatada nos polos (TELFORD *et al.*, 1990).

Com o objetivo de quantificar as anomalias, foi definida uma superfície matemática – representado por uma elipse bi-axial de revolução, em relação ao qual são referidos os cálculos geodésicos. Essa superfície é um elipsoide oblato que se aproxima do nível médio do mar e exclui a superfície terrestre acima desse nível de maneiras que a atração gravitacional em qualquer parte da figura seja perpendicular à superfície (TELFORD *et al.*, 1990).

Teoricamente, o geóide – que é a forma simplificada da Terra, permite o aumento da densidade com a profundidade, mas a mesma premissa não é válida para variações laterais, que é exatamente o objetivo dos estudos gravimétricos. Anomalias de massas locais deformam o

geoide. Além disso, ocorre deformação do geoide sobre os continentes de maneira ascendente devido à atração do material acima, enquanto nos oceanos espera-se uma deformação descendente ocasionada pela baixa densidade da água (Figura 3.3). No esferoide, entretanto, os desvios não são correlacionados com os continentes nem com as placas litosféricas, sugerindo que diferentes densidades existam abaixo da litosfera. Assim, as variações laterais do geoide e do esferoide de referência não coincidem, podendo haver um desvio de até 100m entre as duas superfícies (KAHN, 1983, *apud* TELFORD *et al.* 1990).

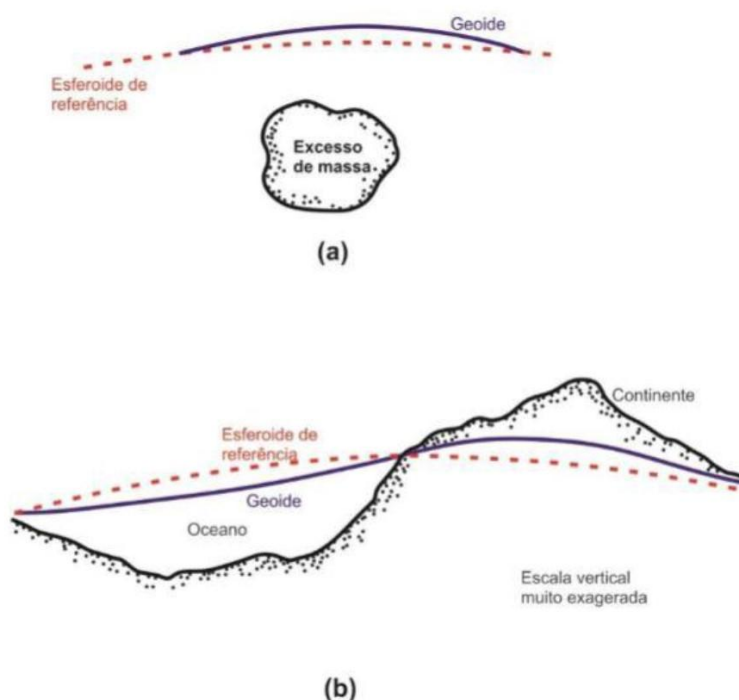


Figura 3.3 – A) Variação da superfície do geoide e do esferoide de referência em relação a uma massa local. B) Deformação em maior escala. Retirado de Telford *et al.* (1990).

A unidade de aceleração da gravidade pelo sistema internacional é m/s^2 e utiliza-se, também, o Gal (cm/s^2) em homenagem a Galileu Galilei. Todavia, como são muito sutis as alterações da aceleração da gravidade ocasionadas por variações da densidade, é mais usual a utilização do mGal (10^{-5} m/s^2).

A União de Geodésia e Geofísica Internacional (UGGI) adota, para o cálculo do valor de referência, a fórmula internacional de gravidade de 1967 (Sistema Geodésico de Referência 1967), onde ϕ é a latitude geodésica:

$$\gamma = 978031,8(1 + 0,0053024 \sin^2\phi - 0,0000059\sin^2\phi) \text{ mGal}$$

A gravidade observada (g_o) é obtida por meio da aplicação de diversas correções na gravidade medida, como as correções padrão: de maré, derivada de instrumento, de Eötvös, caso necessário, e da latitude.

A anomalia da gravidade (Δg), ou anomalia gravimétrica, é dada pela diferença entre a aceleração da gravidade observada (g_o) num ponto da superfície do planeta e um valor de referência (γ) pela equação:

$$\Delta g = g_o - \gamma$$

A variação da gravidade é inversamente proporcional ao quadrado da distância, portanto, é necessária a correção de mudanças da elevação entre a estação de medida e o *datum* estabelecido. A correção *Free-Air* não leva em conta o material entre a estação e o *datum*, ou seja, esta correção despreza a densidade das cadeias de montanhas. A anomalia *Free-Air* é a diferença entre a variação de aceleração da gravidade observada e a calculada e sua notação matemática é dada por:

$$\Delta g_{FA} = (g_{obs} + \Sigma \text{correções}) - g_{\theta}$$

na qual Δg_{FA} é a anomalia gravimétrica de *Free-Air*, g_{obs} é o valor medido da gravidade, $\Sigma \text{correções}$ é a soma dos valores das correções realizadas (latitude; elevação – apenas a correção de *free-air*, sem considerar a correção Bouguer; maré; topografia e drift,) e g_{θ} é o valor previsto da gravidade (TELFORD *et al.*, 1990).

A correção de Bouguer complementa a anomalia *Free-Air*, levando em consideração a atração dos materiais entre a estação e o *datum*. Com os dados da anomalia *Free-Air* e da superfície/massa topográfica é possível calcular a anomalia Bouguer utilizando a seguinte equação:

$$\Delta g_B = \Delta g_{FA} + CB$$

onde Δg_B representa a anomalia Bouguer, Δg_{FA} é a anomalia de *Free-Air*, e CB é a correção de Bouguer. Nesse cálculo, consideramos a superfície como uma placa plana infinita, com altura igual à altitude e densidade equivalente à densidade média das rochas.

A correção de Bouguer é definida por:

$$CB = 0,04185 \cdot \Delta \rho \cdot H$$

onde $\Delta \rho$ representa o contraste de densidade ($\Delta \rho = \rho_{preenchido} - \rho_{deslocado}$) e H é a altitude em metros.

3.2.2 Magnetometria

O método da magnetometria, de maneira semelhante a gravimetria, também utiliza de um campo natural da Terra. A magnetometria tem como base a utilização da concentração de minerais magnéticos nas rochas que causam distorções no campo magnético terrestre, o que permite a identificação de distorções locais que revelam informações sobre as rochas e estruturas geológicas (LUIZ e SILVA, 1995).

O campo magnético terrestre (F) é gerado por um momento de dipolo localizado no centro da Terra, apontando para o sul e formando um ângulo com o eixo de rotação, conhecido como declinação magnética. Os pontos onde o eixo do dipolo intercepta a superfície da Terra são chamados de polos geomagnéticos (Figura 3.4). As linhas do campo magnético atravessam a Terra, sendo paralelas à superfície perto do equador e perpendiculares nos polos magnéticos (TELFORD *et al.*, 1990).

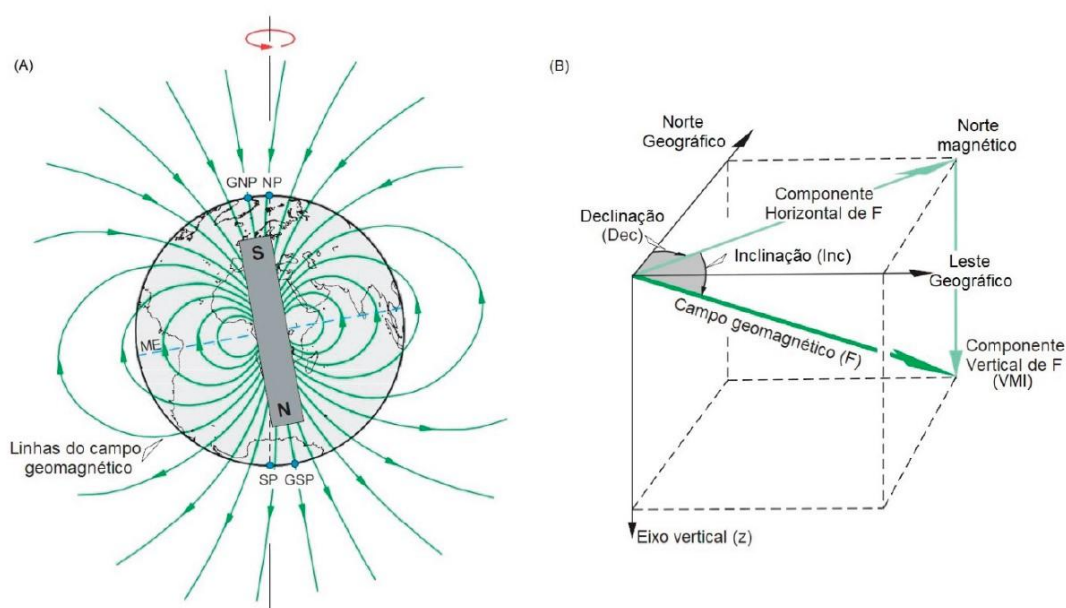


Figura 3.4 - A – O campo magnético da Terra (F) comparado a um dipolo de um ímã em que a direção forma um ângulo agudo (Dec) com o eixo de rotação, que corresponde ao norte geográfico. Esse ângulo pode variar conforme a região, envolvendo o polo norte geomagnético (GNP), o polo sul geomagnético (GSP), o equador magnético (ME), além do polo norte geográfico (NP) e do polo sul geográfico (SP). B – A decomposição do campo geomagnético (F) é realizada em suas componentes horizontal e vertical. O vetor do campo geomagnético é determinado pelos ângulos de inclinação (Inc) e declinação (Dec), além da intensidade do componente vertical do campo magnético (VMI). Retirado de Dentith e Mudge (2014) e modificado por CPRM (2021).

O campo magnético é composto por três partes: o campo principal, originado no núcleo externo da Terra; o campo externo, produzido por correntes elétricas na ionosfera que variam rapidamente; e variações do campo principal, causadas por anomalias magnéticas locais geradas por rochas e minerais magnéticos próximos à superfície (TELFORD *et al.*, 1990). O método magnetométrico mede a resultante da somatória vetorial de todos esses campos magnéticos.

De acordo com Telford *et al.* (1990), os materiais podem ser classificados em três grupos com base em suas propriedades magnéticas: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. Substâncias diamagnéticas têm susceptibilidade magnética (μ) negativa. Substâncias paramagnéticas, que não são diamagnéticas, têm susceptibilidade magnética positiva. Ferromagnéticos são materiais paramagnéticos com interação atômica tão forte que resulta no alinhamento de momentos de dipolos magnéticos.

A susceptibilidade magnética é um parâmetro adimensional que define a intensidade da magnetização induzida em uma rocha ($H=\mu.B$) e está diretamente relacionada à quantidade e dimensão dos minerais magnéticos presentes. Os principais minerais magnéticos são magnetita, ilmenita ($FeTiO_3$) e pirrotita ($Fe(1-x)S$), com x variando entre 0.0 e 0.17, sendo que a magnetita apresenta os maiores valores de susceptibilidade (TELFORD *et al.*, 1990).

A intensidade de magnetização induzida em um material é proporcional à sua susceptibilidade magnética e à estimulação magnética externa ao material. A susceptibilidade magnética refere-se à forma como a magnetização responde a um campo externo aplicado, sendo o principal parâmetro magnético utilizado na interpretação geofísica. Essa propriedade varia para o mesmo tipo de rocha e é intrínseca ao material, dependendo principalmente do seu processo de formação e da mineralogia. De modo geral, a susceptibilidade é proporcional ao conteúdo mineralógico na composição da rocha, especialmente magnetita e pirrotita (TELFORD *et al.*, 1990). A diferença de susceptibilidade de acordo com os litotipos mais comuns é ilustrada na Figura 3.5.

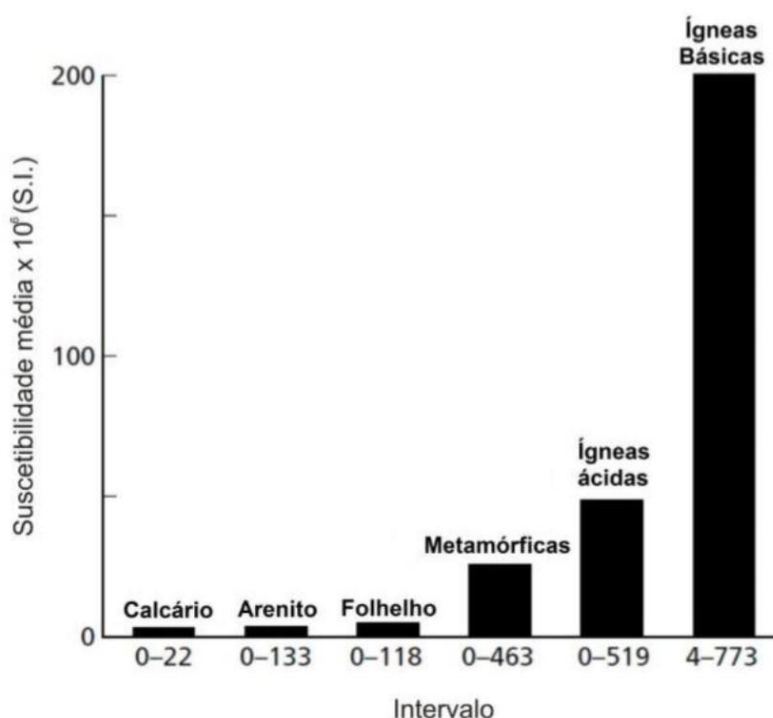


Figura 3.5 - Histograma com os valores médios de susceptibilidade magnética dos tipos mais comuns de rocha. Retirado de Keary *et al.* (2009).

Para interpretar dados magnetométricos regionais em estudos geológicos, é necessário remover o modelo de campo magnético da Terra (International Geomagnetic Reference Field - IGRF). A diferença entre os valores medidos e os calculados pelo modelo revela anomalias, utilizadas para interpretar fontes/anomalias magnéticas, domínios magnéticos, alinhamentos magnéticos e modelar os dados, integrando-os com as informações geológicas diretas (CPRM, 2021).

Segundo Isles e Rankin (2013), embora a Anomalia Magnetométrica sem transformações ou filtros possa não ser a forma mais comum de interpretação, ela deve ser sempre considerada como o ponto inicial e uma referência essencial em relação aos produtos transformados e/ou filtrados.

O Gradiente Total (GT), ou Amplitude do Sinal Analítico, é uma técnica de filtragem muito eficiente na determinação dos limites e profundidades de corpos magnéticos. Esta técnica funciona somando duas componentes reais nas direções horizontais, x e y, e uma componente imaginária na direção vertical z. O Gradiente Total é uma excelente ferramenta para a redução ao polo para a localização de fontes magnéticas em baixas latitudes. Devido ao uso de derivadas, este filtro elimina fontes profundas, mas realça e define com precisão a localização de fontes rasas, sendo

extremamente eficaz em estudos de prospecção mineral e na definição de pontos para perfuração de corpos magnéticos (CPRM, 2021).

3.2.3 Radiometria

O método radiométrico detecta a emissão natural de radiação gama resultante do decaimento radioativo de vários radioisótopos. Esse processo leva à formação de elementos mais estáveis, seguindo uma taxa de decaimento exponencial descrita pela fórmula $N = N_0 e^{-\lambda t}$, onde N é o número de átomos restantes após um tempo t , a partir de um número inicial N_0 no tempo $t = 0$, e λ é a constante de decaimento característica de cada elemento (KEAREY *et al.*, 2002).

Nas últimas décadas, a importância do método radiométrico cresceu devido à alta demanda por minerais radioativos, impulsionada pela necessidade de combustíveis nucleares (KEAREY *et al.*, 2002). No entanto, levantamentos radiométricos também são muito úteis no mapeamento geológico, ajudando a reconhecer e diferenciar diversos tipos de rochas (PIRES e HARTHILL, 1989).

Embora existam cerca de 50 isótopos radioativos na natureza, a maioria é rara ou fracamente radioativa. No método radiométrico, os elementos de maior interesse são: urânio (^{238}U), tório (^{232}Th) e potássio (^{40}K), pois seus radioisótopos produzem radiação gama com energia suficiente para serem medidos em levantamentos aéreos (MINTY, 1997). A janela de energia do potássio é monitorada pelo fotopico de 1.460 MeV emitido pelo ^{40}K na faixa da radiação gama. Já o tório e o urânio são monitorados através dos produtos de suas respectivas séries de decaimento: o tálio (^{208}Tl) para o tório, com um fotopico de 2.614 MeV, e o bismuto (^{214}Bi) para o urânio, com um fotopico de 1.765 MeV (Figura 3.6) (IAEA, 2003).

A área da janela espectral é diretamente proporcional à concentração do elemento na superfície, e a contagem total na faixa espectral da radiação gama corresponde à área total dessa janela (Figura 3.6). Em média, a crosta terrestre contém 2,5% de potássio, 12 ppm de tório e 3,5 ppm de urânio (DICKSON e SCOTT, 1997).

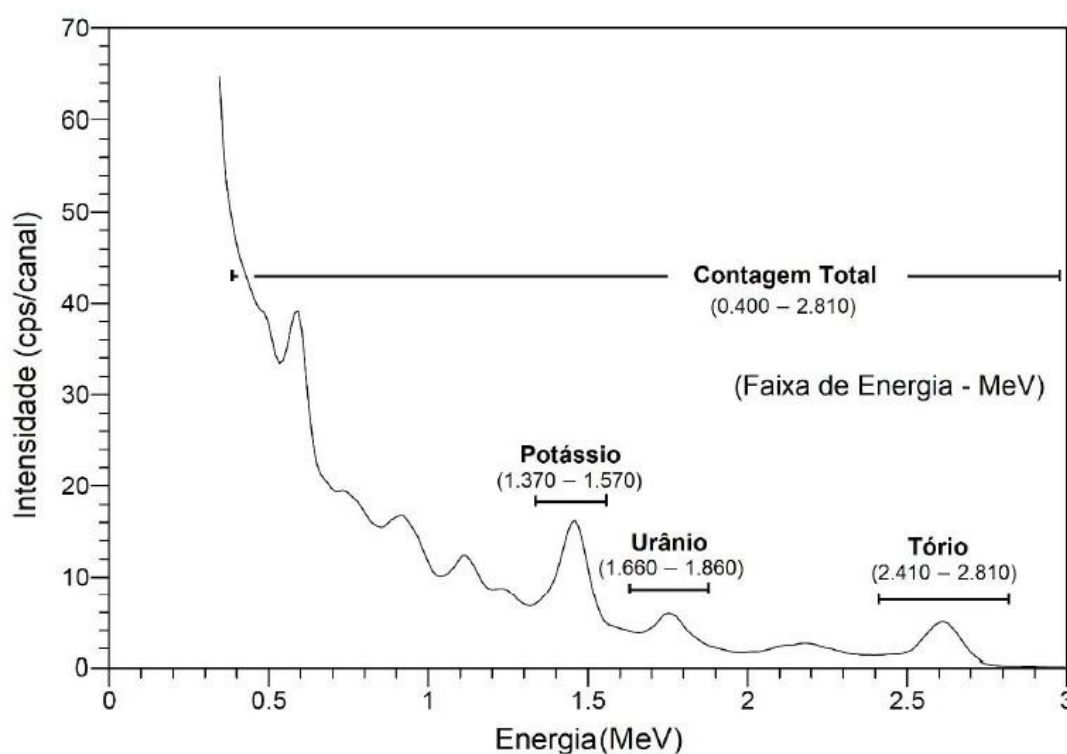


Figura 3.6 - Espectro correspondente à faixa de radiação gama natural na superfície terrestre com as janelas espectrais para os canais dos elementos potássio, urânio e tório. Retirado de IAEA (2003) e modificado por CPRM (2021).

O método gamaespectrométrico é adequado para investigar variações na superfície da rocha ou solo, pois a radiação gama, em média, não penetra mais que meio metro. Qualquer cobertura não radioativa sobre a rocha pode suprimir o sinal, como uma camada de 20 cm de areia quartzosa que pode reduzir a radiação da rocha pela metade. Portanto, os intérpretes devem considerar os efeitos de coberturas sedimentares alóctones, vegetação densa e corpos d'água na área do levantamento geofísico. Rios com material erodido em suspensão podem apresentar sinal radioativo, como ocorre na Amazônia, enquanto rios secos no semiárido nordestino podem ter aluviões com sinal radioativo de material transportado por longas distâncias (IAEA, 2003).

As concentrações de potássio, tório e urânio aumentam em rochas ácidas e diminuem em rochas básicas. O tório é o menos móvel, o urânio é o mais móvel, e o potássio é o mais solúvel em água na superfície. O urânio liberado das rochas tende a ser absorvido por minerais argilosos formados pelo intemperismo. Em rochas sedimentares arenosas, anomalias radiométricas podem indicar a presença de minerais pesados, como zircão e monazita, ricos em tório (CPRM, 2021).

Os mapas são gerados através de uma composição em falsa cor dos canais radiométricos de K, eTh e eU, onde cada radioelemento é representado por uma cor diferente. Na Composição Ternária RGB, o K é representado pelo vermelho, o eTh pelo verde e o eU pelo azul (Figura 3.7). Quando há altas concentrações dos três elementos, a cor resultante é branca; se as concentrações são baixas, a cor resultante é preta. Corpos d'água limpos também aparecem em preto devido à baixa radioatividade. Na Composição Ternária CMY, o K é representado pelo ciano, o eTh pelo magenta e o eU pelo amarelo. Altas concentrações resultam em preto e baixas em branco (CPRM, 2021).

Esses mapas ternários são úteis para distinguir unidades geológicas com base na combinação dos radioelementos, mas a interpretação deve ser cuidadosa devido à ambiguidade e necessidade de correlação geológica. Cores avermelhadas indicam altos teores de K e baixos de eTh e eU, associadas a granitos ou grauwacas (CPRM, 2021). A cor branca pode indicar sienitos ou rochas vulcânicas ácidas, enquanto a preta pode representar rochas ultramáficas ou arenitos quartzosos. Cores esverdeadas podem estar associadas a metassedimentos ou lateritas. Assim, a interpretação de dados gamaespectrométricos requer informações adicionais para ser eficaz em mapeamentos geológicos e prospecção mineral.

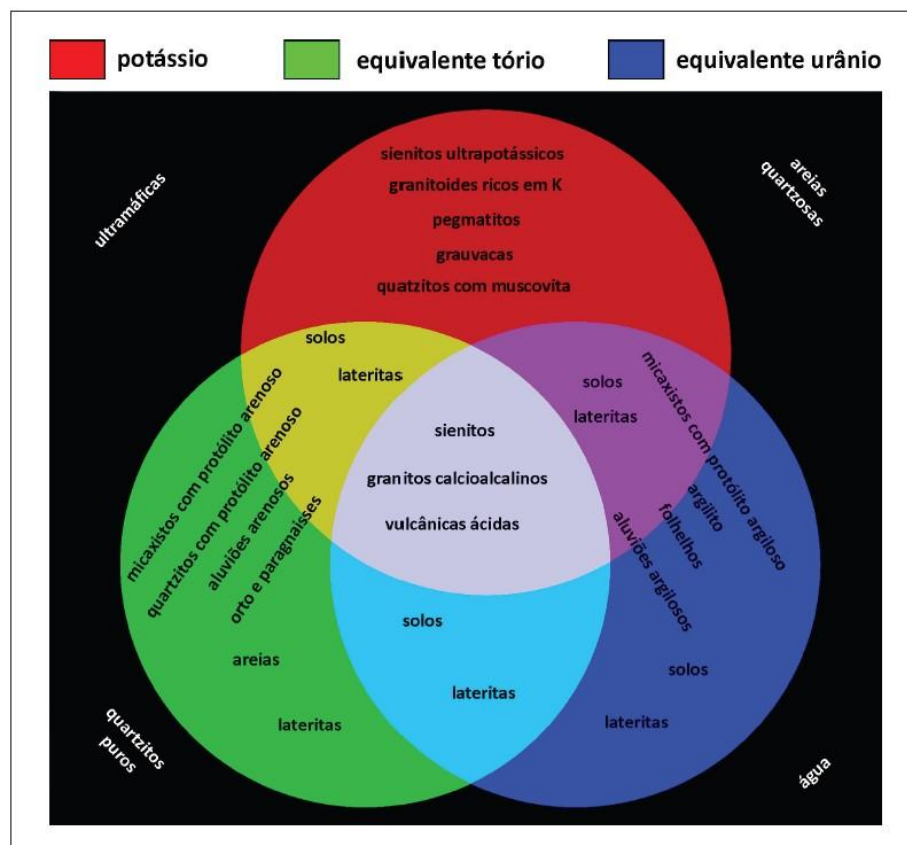


Figura 3.7 - Composição de cores RGB com as possibilidades de correlação com unidades litológicas. Retirado de CPRM, 2021.

3.3 Geofísica Terrestre

3.3.1 Eletorresistividade

Os métodos de eletorresistividade foram desenvolvidos no início dos anos 1900, mas se tornaram mais amplamente utilizados na década de 1970 devido ao desenvolvimento de tecnologias para aquisição e processamento de dados. Essas técnicas são empregadas na prospecção de água subterrânea, monitoramento de poluição, levantamentos de engenharia para localizar cavidades, falhas e fissuras na subsuperfície, permafrost, eixos de minas, e na arqueologia para mapear fundações enterradas de construções antigas, entre outras aplicações (REYNOLDS, 2011).

A eletorresistividade é fundamentada na determinação indireta da resistividade elétrica de rochas e solos, utilizando, para isso, a Lei de Ohm. Essa lei estabelece que a corrente (I) que flui através de um condutor e a diferença de potencial (V) associada estão interligadas por uma constante chamada resistência (R), medida em Ohms (TELFORD *et al.*, 1976). Dado que a resistência é influenciada pelo comprimento (L) e pela área (S) do condutor, foi introduzido o

conceito de resistividade elétrica (ρ), que é independente desses fatores geométricos e é expressa pela equação:

$$\rho = \frac{V \cdot S}{I \cdot L}$$

A eletrorresistividade, quando empregada por meio do caminhamento elétrico, consiste na injeção de corrente elétrica no substrato por meio de dois eletrodos de corrente (A e B) e medida da diferença de potencial (ΔV) por dois outros eletrodos (M e N). Admitindo que as condições da subsuperfície são heterogêneas e isotrópicas, o valor medido em campo torna possível o cálculo da resistividade aparente dos materiais (ρ_a), de acordo com a equação 2 (ORELLANA, 1972; TELFORD *et al.*, 1976):

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \cdot K \ (\Omega \cdot m)$$

na qual K representa o fator geométrico associado ao arranjo dos eletrodos utilizado no levantamento. O valor de K é dado por:

$$K = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)$$

onde AM, BM, NA e BN correspondem às distâncias entre os eletrodos usados.

Devido à sua alta sensibilidade às variações laterais de resistividade, o arranjo dipolo-dipolo tem sido amplamente empregado para caracterizar aquíferos em regiões com embasamento cristalino (SEATON e BURBEY, 2002) e em investigações relacionadas à contaminação de águas subterrâneas (MEJU, 2000). Este arranjo consiste em dois dipolos: um dipolo de corrente (AB) e outro de potencial (MN) (Figura 3.8). Cada dipolo possui um comprimento “a”, e os centros dos dipolos estão separados por uma distância “na”, onde “n” é um número inteiro que representa a quantidade de níveis de investigação. O ponto imageado na subsuperfície resulta da interseção de duas linhas que partem dos centros de cada dipolo, formando ângulos de 45°. Ao realizar medições com diferentes valores de “na” e em várias localizações da superfície, é possível compor uma pseudo-seção de resistividade (Figura X), embora essa não reflita a profundidade real da investigação. Para determinar a profundidade efetiva, as pseudo-seções podem ser invertidas, utilizando, por exemplo, o *software* EarthImager ou Res2DInv.

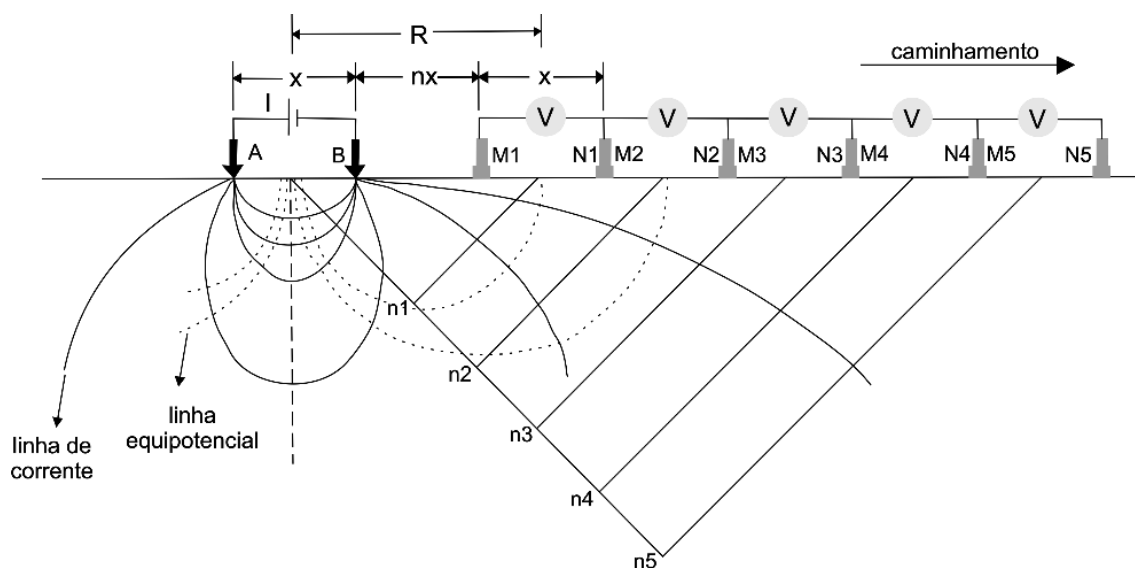


Figura 3.8 - Disposição dos eletrodos no arranjo dipolo-dipolo. Retirado de Braga, 2006.

3.4 Modelagem Geológica

A representação da geologia em blocos diagramas 3D, conhecida como modelagem geológica, é fundamental para compreender a geometria das unidades geológicas e seu contexto tectônico e estrutural. Essa técnica é aplicável em diversas áreas, como hidrogeologia, modelagem numérica de fluxo, pesquisa mineral, avaliação de recursos minerais, e exploração de petróleo, entre outras (HÁSEN *et al.*, 2016; THORNTON *et al.*, 2018).

Antigamente, os modelos geológicos eram criados com o método de modelagem explícita, que exigia a digitalização de muitas seções e a conexão de pontos, demandando muito tempo de trabalho. Atualmente, graças ao avanço dos métodos de interpolação geoestatística, é possível usar dados de contatos geológicos e medições estruturais distribuídos pela área de estudo para modelar superfícies implícitas por meio de algoritmos, geoestatística e cokrigagem (COWAN *et al.*, 2003). Diversos *softwares* como Leapfrog, GOCAD, Geomodeller, e Encom Model Vision são capazes de realizar esse tipo de modelagem implícita (OLANIYAN, 2014). Os principais benefícios desse método incluem a capacidade de impor condições geológicas no *software*, a possibilidade de interpolação simultânea de contatos litológicos e dados estruturais, e a rápida atualização do modelo com novos dados (THORNTON *et al.*, 2018). No caso dessa pesquisa, o *software* utilizado foi o Leapfrog 2023.1.

O método mais comum utilizado na modelagem implícita é o campo potencial de interpolação, abordado por diversos autores (LAJAUNIE *et al.*, 1997; COWAN *et al.*, 2003; CHILÈS *et al.*, 2004; MCINERNEY *et al.*, 2005; CALCAGNO *et al.*, 2008). Esse método

consiste na interpolação de contatos litológicos e dados estruturais por meio de funções de cokrigagem para criar um campo escalar 3D, ou campo potencial.

Essa abordagem matemática permite tratar um contato geológico (ou um plano de falha) como uma isosuperfície, enquanto a falha é vista como uma descontinuidade de um campo escalar em um espaço 3D, denominado campo potencial. Em termos matemáticos, uma superfície implícita é uma superfície em um espaço euclidiano definido por uma equação diferencial parcial (espaço euclidiano com três coordenadas: X, Y, Z). Diferentes campos potenciais podem ser combinados no mesmo modelo para reconstruir sequências geológicas complexas com relações erosivas e/ou concordantes.

Os contatos litológicos podem ser obtidos de mapas geológicos ou de perfis de sondagens e poços, por exemplo (COWAN *et al.*, 2003). Após a computação do modelo, as superfícies são convertidas em volumes utilizando o método conhecido como "*marching cube*". Esse método é um algoritmo de computação gráfica que extrai malhas geométricas de isosuperfícies a partir de um campo escalar tridimensional, às vezes chamado voxels (THORNTON *et al.*, 2018).

Ao utilizar dados geológicos da superfície e subsuperfície, é viável criar seções que atravessam os pontos selecionados e incluir mais informações para a interpretação do modelo pelo autor, com base em outras fontes como dados geofísicos e análises de sensoriamento remoto, por exemplo (CAUMON, 2009).

É possível estabelecer relações estratigráficas, como *onlap* (estratos ou litologias concordantes), *erode* (estratos ou litologias erosivas, ou seja, mais recentes) e até intrusivas, que são camadas erosivas que apresentam um mergulho radial, formando um corpo intrusivo (CALCAGNO *et al.*, 2008).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi dividido em 4 etapas: 1) levantamento e processamento de dados existentes e geração de mapas temáticos; 2) reconhecimento e mapeamento geológico; 3) levantamentos geofísicos terrestres; 4) modelagem geológica. Na primeira etapa, foram coletados dados com o objetivo de nortear as etapas de reconhecimento geológico de campo. Foram utilizados mapas geológicos e de satélite da região com o objetivo de identificar feições cársticas e afloramentos rochosos. A etapa de mapeamento geológico foi conduzida no primeiro semestre de 2022 e tinha como objetivo principal identificar feições de carstificação e poços tubulares, além de medir estruturas nas rochas aflorantes, a fim adquirir informações in-situ. Os mapas temáticos foram gerados após as etapas de mapeamento e incluem: mapas geofísicos regionais (magnetometria e radiometria), mapa topográfico, mapa de lineamentos morfoestruturais e mapa geológico na escala de 1:20.000. A análise desses mapas, associado às etapas de campo, foram fundamentais para o apontamento de áreas foco para os levantamentos de eletrorresistividade, que foram conduzidos em zonas próximas as feições de carstificação e poços tubulares existentes.

Embora já exista um modelo hidrogeológico conceitual para o município de Sete Lagoas desenvolvido por Pessoa (1996), Galvão (2015) e atualizado, na região central do município, por Magnabosco (2020), este estudo atualiza o modelo na área norte/nordeste da cidade, que têm passado por um intenso processo de urbanização e industrialização. A aquisição de novos perfis litológicos e a utilização de outros métodos geofísicos, inclusive a eletrorresistividade, são integrados aos dados já existentes de maneira a propor o modelo hidrogeológico conceitual que é apresentado nas discussões dos resultados do capítulo 5.

4.1 Aquisição e tratamento de dados

Esta etapa do estudo serviu como base para a análise contextual da área. Foram coletados dados sobre uso e ocupação do solo, aspectos fisiográficos, como clima, pluviometria, vegetação e relevo, além do contexto geológico e hidrogeológico, que auxiliaram na interpretação do sistema de recarga do aquífero e nas condições de fluxo na bacia de estudo.

As drenagens e divisões das sub-bacias foram obtidas da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), essenciais para delimitar os limites da bacia. A topografia é produto dos dados do satélite Alos Palsar, obtidos na plataforma *Alaska Satellite Facility*, com resolução espacial de 12,5 x 12,5 m. A topografia foi fundamental na análise e a delimitação de lineamentos

morfoestruturais por meio do Modelo Digital de Elevação (MDE), além de terem sido base para o modelo geológico 3D.

Os mapas geológicos utilizados são de Galvão (2015) e da CPRM (2009). O mapeamento realizado pela CPRM tem escala de 1:100.000 e o mapa geológico final é produto do Projeto Sete Lagoas-Abaeté, folha SE.23-Z-C-II. Galvão (2015) apresenta um mapa na escala 1:25.000. Informações sobre cavernas, dolinas e sumidouros foram obtidas do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV 2009).

Os boletins com as informações dos poços tubulares, como localização e perfil litológico, foram obtidos por meio de duas plataformas: SIAGAS, da CPRM, e SIAM, da SEMAD, além dos dados fornecidos pela AmBev e pelo SAAE. Foram levantados mais de 100 boletins de poços tubulares na área, embora apenas 61 tenham informações suficientes para que sejam feitas interpretações geológicas.

Os dados geofísicos regionais de magnetometria e radiometria são produto dos levantamentos aeromagnetométricos e radiométricos da Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG, 2009) na Área 10 – Belo Horizonte-Curvelo-Três Marias e acessados por meio da Biblioteca do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG). A gravimetria foi analisada pelo mapa de Anomalia Bouguer do Estado de Minas Gerais, escala 1:1.000.000, gerado por Gomes (2022) e presente no Atlas Aerogeofísico do Estado de Minas Gerais da CPRM (2022).

O modelo 3D gerado por Magnabosco (2020) na área central do município de Sete Lagoas também foi utilizado para nortear a etapa final deste trabalho. Embora tenham sido usados softwares diferentes na modelagem geológica, os princípios e etapas são muito parecidos e compartilham dados como as falhas inferidas e perfis litológicos de poços tubulares.

4.2 Mapeamento Geológico

O relevo da área de estudo foi analisado inicialmente por meio de interpretação de imagens de satélite, o que possibilitou a identificação das feições cársticas mais evidentes e dos potenciais afloramentos de calcário que poderiam fornecer informações adicionais às já presentes em mapeamentos geológicos anteriores. As áreas de interesse identificadas através da interpretação de imagens foram o foco das etapas de campo realizadas simultaneamente com o mapeamento de feições geológicas-estruturais e cársticas, bem como visitas aos poços tubulares identificados na etapa de aquisição de dados, com o objetivo de confirmar a existência deles e coletar informações mais precisas de coordenadas geográficas.

O mapeamento geológico, estrutural e espeleológico foi realizado em uma escala detalhada de 1:20.000. Um total de 45 pontos de geologia foram visitados, fornecendo dados geológicos sobre acamamento, foliação, fraturas e feições cársticas, como pequenos condutos formados em afloramentos de calcário. Além disso, 29 pontos de hidrogeologia foram levantados, identificando nascentes, sendo duas delas cársticas, assim como cursos d'água na região, com o objetivo de identificar parâmetros físico-químicos que indicassem água proveniente das rochas da Formação Sete Lagoas. Além disso, foram visitados pontos de mapeamento geológico anterior realizado pela CPRM (2009) e Galvão *et al.* (2015) para validar o banco de dados.

4.3 Processamento dos Dados Regionais

A etapa de processamento dos dados geofísicos regionais foi realizada a partir do banco de dados da CODEMIG (2009), referente aos levantamentos na área 10 – Belo Horizonte-Curvelo-Três Marias (Figura 4.1). O aerolevanteamento realizado pela CODEMIG foi feito em linhas de vôo com direção NS e espaçamento de 0,5 km, enquanto as linhas de controle tiveram direção EW com espaçamento de 10,0 km e altura de vôo de 100 m.

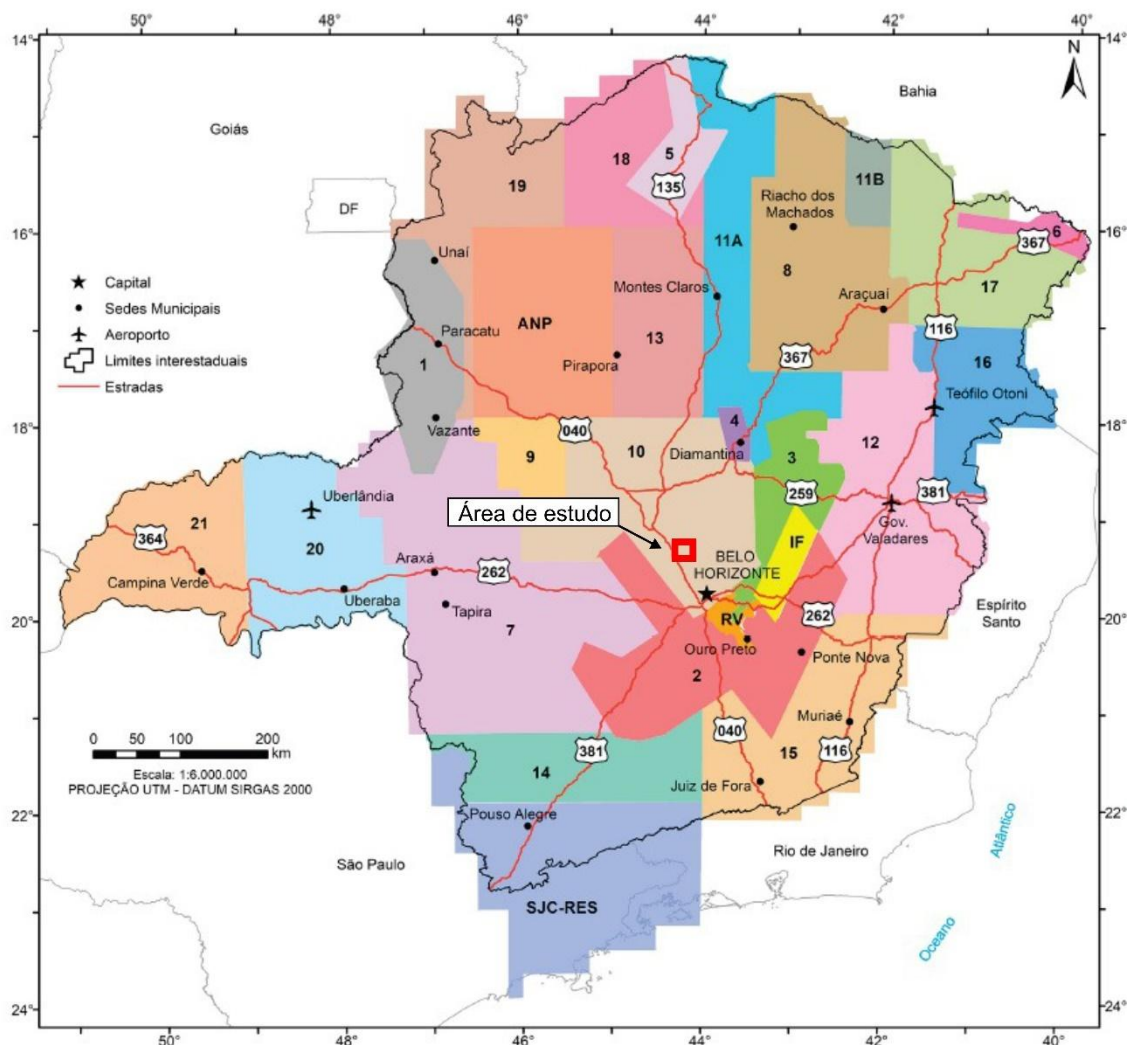


Figura 4.1 - Localização da área de estudo em relação aos dados utilizados do aerolevantamento da CODEMIG na área 10. Modificado de CPRM (2021).

Para a análise dos dados gravimétricos neste trabalho, optou-se pela utilização daqueles compilados e processados pela CPRM (2021) que resultaram no mapa gravimétrico terrestre da anomalia Bouguer do estado de Minas Gerais (GOMES, 2022). O mapa foi baixado da plataforma RIGeo da CPRM e importado para o *software* ArcGIS 10.8.

Os dados de magnetometria e radiometria foram importados para o *software* Oasis Montaj 8.4 em formato *Geodatabase* (gdb). A partir daí, os dados foram interpolados segundo uma malha regular por meio da ferramenta *Minimim Curvature*, em *Gridding*, gerando um *grid* relativo aos dados que estão sendo trabalhados. Abre-se então o *grid* por meio da função *Display grid* e, nele, foram aplicadas as sombras que facilitam a visualização das cores no mapa. Até este passo, o processamento dos dados de magnetometria e radiometria são semelhantes, sendo necessária a aplicação de filtros de acordo com a necessidade de cada projeto.

Neste trabalho, foram gerados os mapas de Campo Anômalo e Amplitude do Sinal Analítico (ASA) para a magnetometria, enquanto, para o método da radiometria, foi gerado o mapa Ternário RGB, canais K, eTh e eU. Para a aplicação do filtro ASA, seleciona-se a função *Analytic signal* no ícone MAGMAP, enquanto, para a criação do mapa Ternário, usa-se a função *Ternary Image* em *Grid and image display* e, dessa maneira, pode-se gerar o mapa por meio dos *grids* dos canais dos radioelementos gerados anteriormente.

Os dados importados para o programa foram limitados à área de estudo para que se pudessem ser geradas imagens referentes somente ao perímetro de interesse. Os mapas locais também foram comparados aos mapas regionais já existentes com o objetivo de identificar as anomalias ressaltadas localmente. Outros filtros não puderam ser aplicados aos mapas gerados devido ao caráter regional dos dados, o que dificulta a manipulação desses em um polígono relativamente pequeno.

4.4 Lineamentos Morfoestruturais

Esta é uma etapa para interpretar o contexto geotectônico e estrutural da região, já que os lineamentos refletem as estruturas das rochas, como falhas e fraturas (O'LEARY *et al.*, 1976; COOK, 2003). A análise dos lineamentos contribuiu para a modelagem geológica na delimitação das falhas normais inferidas do embasamento também em conjunto com dados de perfis litológicos e mapa geológico, semelhante à metodologia utilizada por Magnabosco (2019).

Foram utilizadas imagens do satélite Alos Palsar, com resolução de 12,5 m x 12,5 m, na geração modelo digital de elevação (MDE) em azimutes de insolação de 0°, 90°, 180° e 270°. Estruturas retilíneas na superfície que se destacaram incluem diferenças topográficas abruptas, drenagens retas, cristas, talwegues e alinhamentos de lagoas. Essas características foram interpretadas como lineamentos morfoestruturais que podem indicar estruturas superficiais, como fraturas e planos de acamamento, podendo também refletir estruturas mais profundas, como observado na região de Sete Lagoas (PESSOA, 2005; MAGNABOSCO, 2019). Os lineamentos foram traçados no *software* ArcGIS 10.8 em um arquivo *shapefile* de linhas sobre imagens na escala 1:80.000 (Figura 4.2).

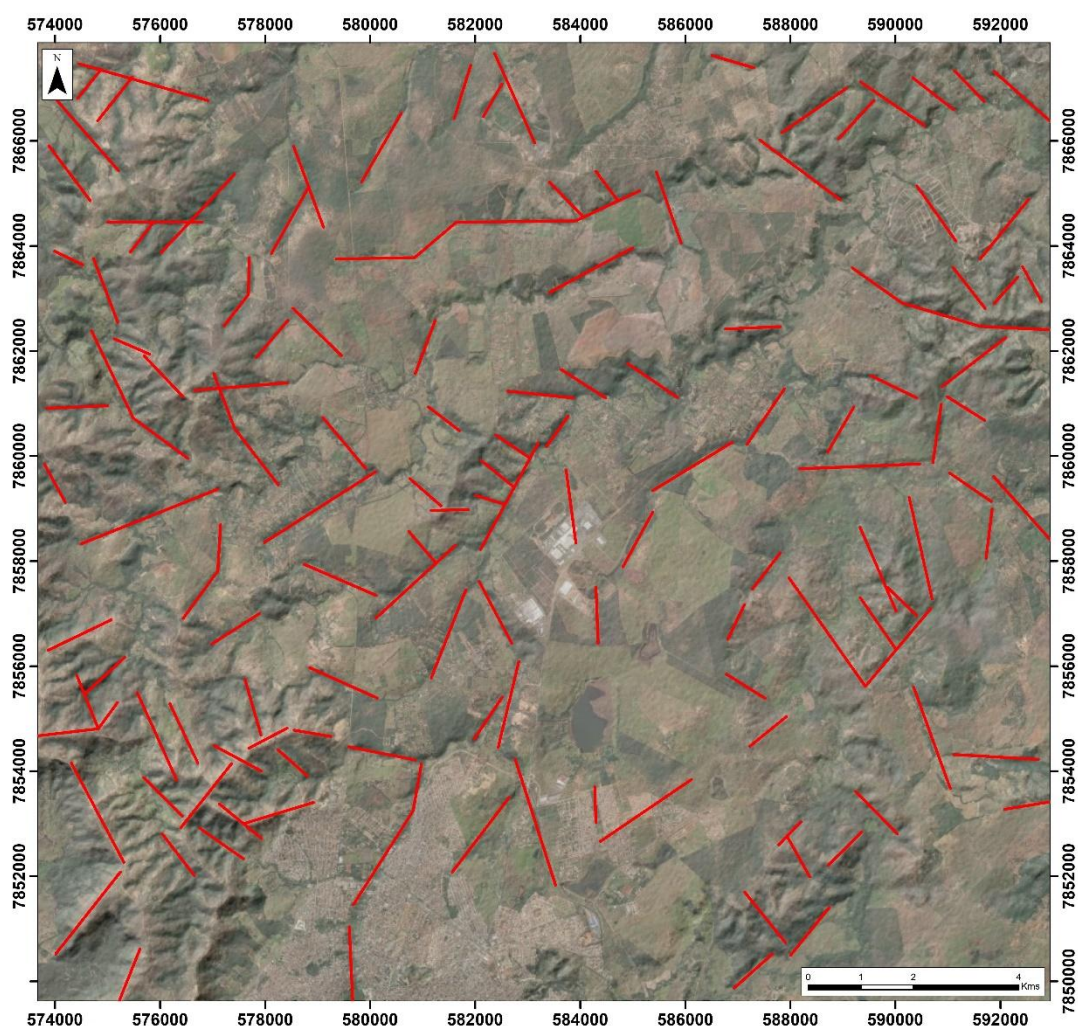


Figura 4.2 - Imagens sobrepostas do MDE com iluminação e imagem de satélite, além dos lineamentos traçados para uma iluminação, em vermelho.

4.5 Levantamento e Processamento de Dados Terrestre

O levantamento geofísico consistiu na aquisição de dados em seções de eletrorresistividade por meio da técnica de caminhamento elétrico. As seções foram posicionadas em zonas de interesse delimitadas após a etapa de mapeamento geológico: próximas às feições de carstificação encontradas em campo e de poços tubulares com perfis litológicos, onde fosse possível identificar condutos cársticos e/ou estruturas associadas a estes em subsuperfície.

Os perfis geoeletricos possuem comprimentos que variam de 320 a 500 metros de comprimento, com espaçamento entre os eletrodos de 20 metros. O arranjo escolhido para as aquisições do caminhamento elétrico foi o Dipolo-Dipolo por apresentar boa resolução lateral

em vários níveis de profundidade (BRAGA, 2006). Neste trabalho foi utilizado o resistivímetro fabricado pela Auto Energia, modelo X6xtal 500 com multiponto de 32 canais, que possui uma potência real (RMS) de 450 Watts e potência de pico (PMPO) é de 698 Watts. Foram executados 8 caminhamentos elétricos com eletrodos de alumínio de 40 cm de comprimento e 10 mm de diâmetro estaqueados no substrato e molhados com solução de água e cloreto de sódio na base para melhorar a condutividade no contato solo-eletrodo.

O processamento dos dados de eletrorresistividade foi realizado no *software* EarthImager. Foram criadas planilhas com as coordenadas dos eletrodos na linha de levantamento, que estavam espaçados de 20 em 20 metros e, para cada leitura no equipamento, foi calculada a resistividade aparente. Essas informações foram importadas para o *software* num arquivo de texto que possui os seguintes dados: arranjo utilizado, posição dos eletrodos no momento da leitura, resistividade medida (ohm) e corrente elétrica.

De maneira concomitante aos levantamentos geofísicos de eletrorresistividade, foi conduzido um levantamento topográfico que tinha como objetivo medir com precisão a posição dos eletrodos na linha de caminhada elétrica. O equipamento utilizado foi o Receptor GNSS Hi-Target V60 (base e *rover*), cedido pelo Laboratório de Topografia e Geodésia da UFMG. O levantamento dos dados consistiu, primeiramente, na montagem da base do equipamento em pontos estratégicos e próximos dos locais onde as linhas estavam sendo levantadas, além disso, a base ficou ligada por, no mínimo, 30 minutos antes da coleta dos dados topográficos para garantir maior conexão com os satélites (Figura 4.3).



Figura 4.3 - Imagem do levantamento topográfico de um poço tubular próximo de onde foi levantada uma seção de eletrorresistividade.

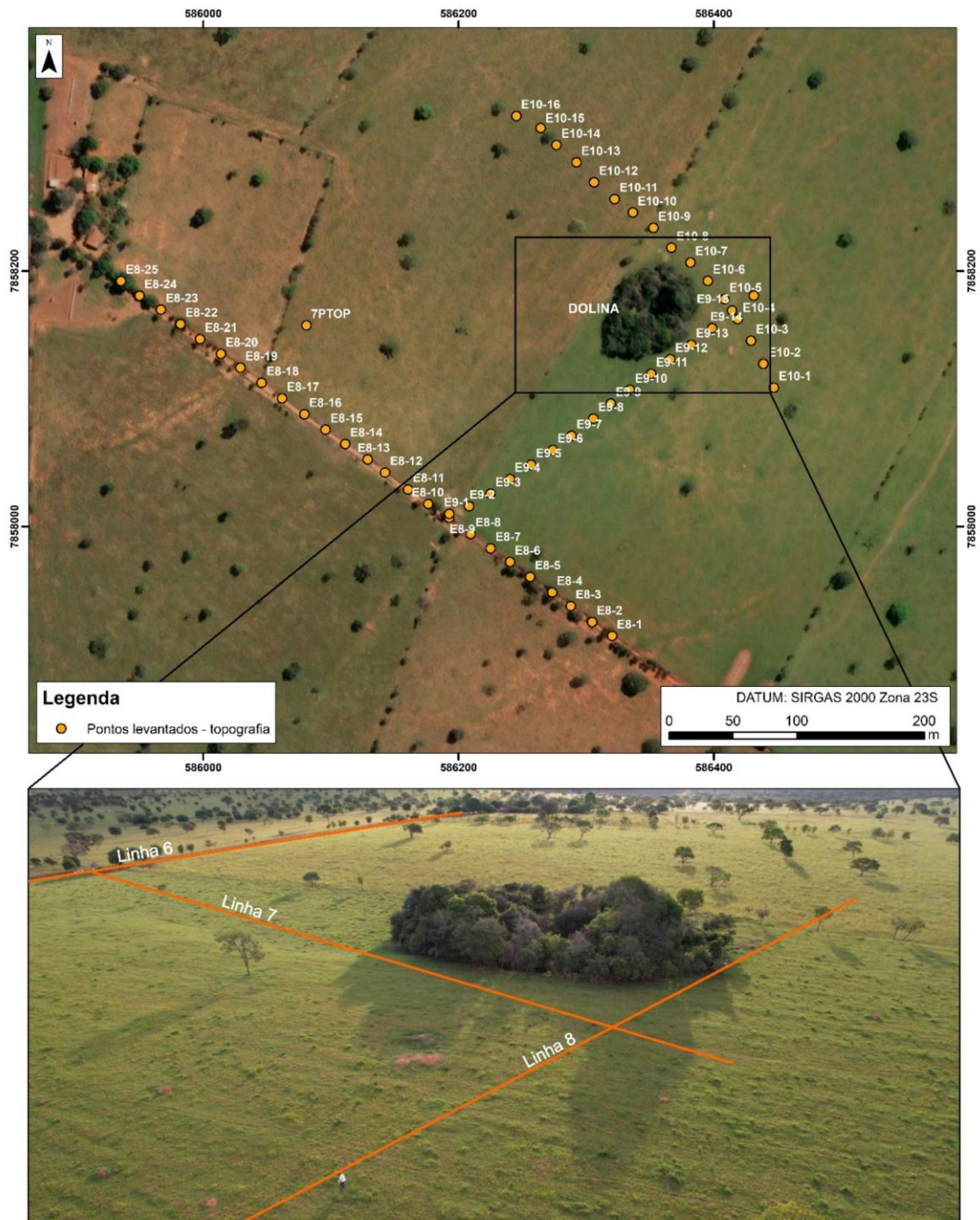


Figura 4.4 - Acima, imagem de satélite da dolina mapeada S4 e dos pontos referentes aos eletrodos das seções geofísicas levantados com o GNSS. Abaixo, imagem de drone com a mesma dolina e as seções geofísicas.

4.6 Seções Geológicas

Foram criadas 10 seções geológicas com dados diretos e indiretos (Figura 4.5). Os dados diretos consistem nos perfis litoestratigráficos dos poços tubulares e dados estruturais coletados

em campo e aproveitados dos mapeamentos anteriores de Galvão (2015) e CPRM (2009). As análises geofísicas regionais e locais nortearam as interpretações indiretas das regiões com menor quantidade de dados, como as porções mais a norte da área de estudo.

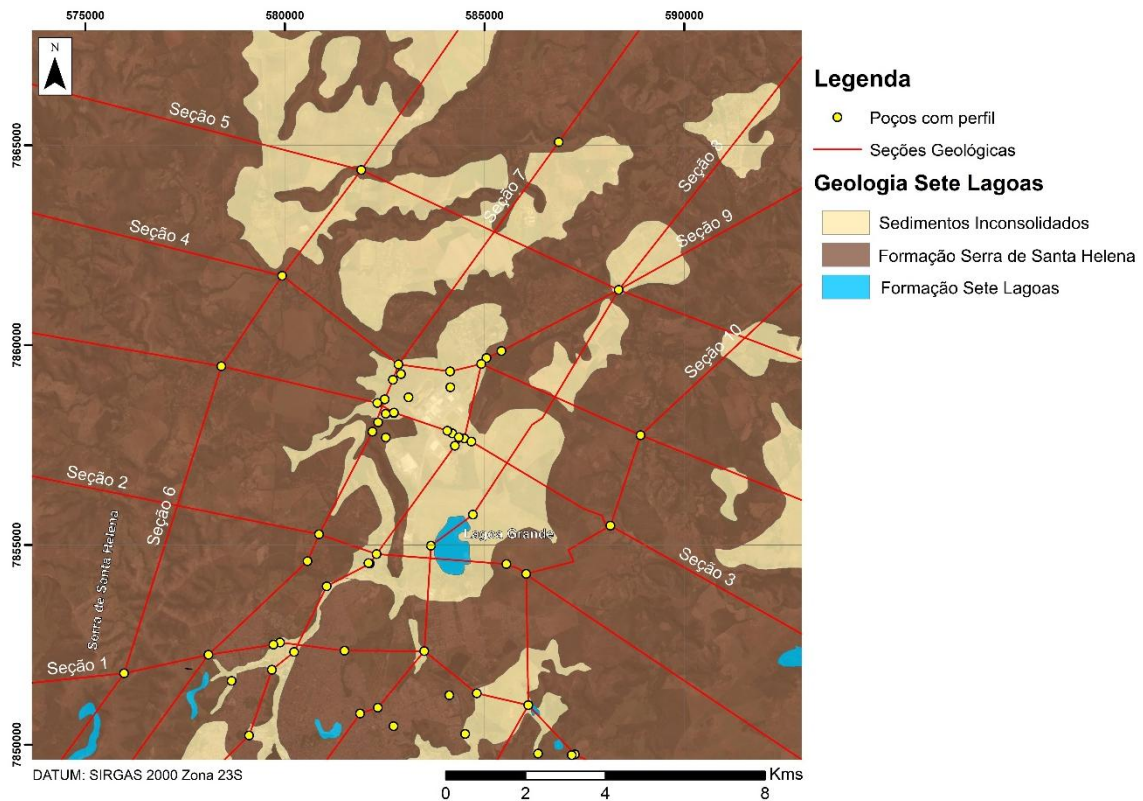


Figura 4.5 - Localização das seções geológicas traçadas com os poços tubulares e geologia da área.

A direção de 5 das seções traçadas são preferencialmente NW-SE (seções 1 a 5), enquanto das demais é SW-NE (seções 5 a 10), de maneira que existam representações paralelas e oblíquas às principais estruturas identificadas: feições de carstificação e feições geomorfológicas que estão associadas aos lineamentos regionais e locais, que são indicativos das falhas inferidas.

As seções foram traçadas dentro da área de estudo no software ArcMAP de modo a interceptar os poços tubulares com informações litológicas e as feições de interesse. A topografia das seções foi extraída do Modelo Digital de Elevação (MDE) do terreno e importada para o software CorelDRAW, no qual houve a compilação e interpretação dos dados de maneira a obter os perfis geológicos esquemáticos.

4.7 Modelo 3D

A modelagem geológica foi realizada no *software* LeapFrog Geo, que utiliza dados de contatos litológicos, em profundidade ou em superfície, associados aos dados estruturais existentes para gerar superfícies implícitas por meio de interpolação geoestatística (FastRBF), gerando informações em locais onde não existem dados diretos (Cowan *et al.*, 2003; Calcagno *et al.*, 2008; Hassen *et al.* 2016). Foram utilizados: o mapa geológico confeccionado após as etapas de campo, bem como os dados estruturais obtidos, além dos perfis litoestratigráficos de 61 poços tubulares em toda a área de estudo, desses, 6 possuem dados de perfilagem óptica.

Primeiramente, foram importadas as informações utilizadas na modelagem. O modelo digital de elevação (MDE) é importado diretamente para o programa em formato .dem na aba *Topography* e ele representará toda a topografia da área. De maneira complementar, adiciona-se o mapa geológico pela função *Import Map* e as linhas que indicam os contatos litológicos em superfície. Neste modelo, não existe contato entre as rochas do Complexo Belo Horizonte com as demais litologias em superfície, já que elas não afloram na área. Os contatos mais expressivos são dos sedimentos inconsolidados com a Formação Serra de Santa Helena e, secundariamente, dos mesmos sedimentos com a Formação Sete Lagoas, além do contato dessas duas formações, que acontece a sul da área de estudo. Esses contatos foram traçados como linhas em arquivo *shapefile* no ArcMAP e importados como *vector data*; dentro do programa, eles devem ser convertidos em polilinhas pela função *Extract Polyline*.

Para este modelo, foram contempladas 4 litologias: 1) Embasamento, que compreende as rochas do Complexo Belo Horizonte; 2) Formação Sete Lagoas, na qual não existe diferenciação entre os membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa; 3) Formação Serra de Santa Helena, constituída pelos pelitos e margas; 4) Sedimentos inconsolidados cenozóicos, que englobam as coberturas detriticas, aluviões e terraços fluviais identificadas em mapeamento geológico e nos perfis litológicos dos poços tubulares.

Os relatórios construtivos dos 61 poços tubulares foram analisados individualmente e as litologias foram agrupadas conforme as 4 litologias anteriormente mencionadas. Esses dados foram organizados em três planilhas diferentes em formato que possibilitasse a leitura pelo *software*: 1) Planilha com as coordenadas e profundidade do poço; 2) Planilha com a geometria do poço em relação à superfície; 3) Planilha com os intervalos geológicos. Juntas, elas fornecem as informações necessárias agrupadas em diferentes colunas; são elas: *HoleID* (nome dado ao poço), X (coordenada referente à latitude), Y (coordenada referente à longitude), Z (cota topográfica do poço, extraída do MDE) e *MaxDepth* (profundidade máxima atingida pelo poço).

Entende-se, também na importação dos dados, que todos os poços se encontram em um ângulo de 90° com a superfície. A planilha *Intervals* é responsável pelas informações das litologias, nela, as interpretações dos intervalos litológicos são agrupadas por colunas em: *from* (profundidade inicial da litologia), *to* (profundidade final da litologia) e *Geology* (litologia em questão). Os dados de cota topográfica e intervalo das litologias são importados em metros, enquanto as coordenadas são apresentadas em UTM, *datum* SIRGAS 2000, zona 23S.

Uma vez importados todos os dados para o *software*, é importante verificar se não existem erros, principalmente os que se referem aos intervalos dos litotipos na planilha *Intervals*, já que informações duplicadas ou intervalos divergentes impossibilitam que os dados sejam processados. Os erros podem ser resolvidos dentro do próprio programa, não havendo necessidade de importar os dados novamente.

Na pasta *Geological Models*, criou-se um novo modelo geológico (*New Geological Model*) no qual foram definidas as dimensões (*boundary*): 18.256,22 por 19.289,53 metros, variando de 200 a 1220 metros de altitude. As dimensões estabelecidas para o modelo se adequam àquelas definidas no início do projeto e, dentro do *software*, tem o papel de limitar os dados importados de maneira que eles não extrapolem as coordenadas de entrada.

Nas primeiras etapas da modelagem, foram criadas as superfícies que representam os contatos das rochas em superfície e em profundidade de maneira implícita. Dentro do novo modelo geológico, aba *Surface Chronology*, foi gerada, primeiramente, a superfície referente ao embasamento em *new deposit*, somente com os dados de poços tubulares. Posteriormente, foi criada a superfície da cobertura inconsolidada em *new intrusion* e editada por meio da função *Edit With Polyline* para que ela fosse ajustada aos contatos definidos. A função *new intrusion* permite que as superfícies referentes à cobertura seccionem as demais litologias sem conflitos. A última superfície gerada é a que representa o contato da Formação Sete Lagoas com a Formação Serra de Santa Helena também por meio da função *new deposit* com os dados de poços tubulares e editada conforme as polilinhas de contato. As superfícies foram ativadas na aba *Chronology* respeitando a posição estratigráfica de cada uma delas; a ativação ativa automaticamente a geração dos sólidos que representam as diferentes rochas do modelo.

A geração dos sólidos acontece respeitando as superfícies anteriormente criadas. Nas regiões onde existem poucos dados diretos, principalmente perfis litológicos de poços, como na porção norte da área de estudo, a geometria dos sólidos fica condicionada às interpretações implícitas do *software*, que podem não corresponder às interpretações do modelador. É

necessário, portanto, que sejam feitos ajustes até que o modelo digital possa representar, da maneira mais fiel possível, o modelo conceitual proposto nas etapas anteriores à modelagem.

As seções geológicas da etapa anterior foram utilizadas para inferir as falhas normais responsáveis pelo basculamento dos blocos do embasamento. As falhas foram importadas para o modelo como *mashes* criados a partir de *moving planes*. Os planos de falha são finitos e foram utilizados como um suporte para a edição dos planos de contato entre os litotipos por meio de edição por linha (*Edit With Polyline*). A edição dos planos foi feita até que se atingisse um resultado que representasse as principais estruturas a serem visualizadas no modelo: os *grabens* e *horsts* do embasamento cristalino. Após a edição, o modelo deve ser rodado e seccionado de diversas maneiras para que seja possível identificar a confiabilidade dos sólidos criados em relação ao modelo geológico anteriormente proposto.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados e discussão são apresentados em formato de artigo científico, conforme abaixo:

Hydrogeological, Speleological and Structural Factors in The Development of Preferred Karstification Zones, Northeast of Sete Lagoas (MG), Brazil

Rafael Magno¹, Paulo Galvão¹, Pedro Assunção¹, Camila Schuch¹, Lucas Godinho¹,
Rodrigo de Paula², Todd Halihan², Humberto Reis³

Abstract

The development of karst terrains is shaped by the interaction of various factors, from regional to local scale. Regionally, tectonic processes can generate geological frameworks with shear zones, horsts and grabens that, on a local scale, become discontinuity zones of soluble rocks, such as limestones, where percolation of meteoric water can preferentially enlarge fractures/faults, bedding planes or folds, developing karst networks. This paper analyzed the main regional and local factors that enabled the development of preferential karstification zones and proposed a 3D geological model of the area northeast of the municipality of Sete Lagoas, Brazil, which has experienced significant urban-industrial growth in recent decades. For this, regional analysis methods were employed, including hypsometry/morphostructural lineaments, and gravimetry, magnetometry, and radiometry geophysical methods. Local methods involved geological, speleological, and structural mapping, with the collection of groundwater level data from tubular wells, karst springs, and lake, along with geophysical surveys in areas of interest through electrical resistivity imaging (ERI). Regionally, the results indicate the preferential karstification zones follow NE-SW and NW-SE directions, linked to tectonic forces responsible for grabens and horsts in the basement and weakness zones in the overlying limestone/metapelite rocks of the Sete Lagoas and Serra de Santa Helena formations. The potentiometric surfaces show a regional flow direction to the NE, with cones of depression in at least three regions, the main one at the industrialized portion in the north of Sete Lagoas. There has been a reduction of about 30 m in the water level since the onset of industrialization in the 1980s, reaching 100 m in that industrialized area. Locally, ERI transects indicated lateral and vertical continuities of the regional karstification zones, associated with surface karst features, such as cave entrances, sinkholes, lakes/ponds, and karst springs. The analysis of these

data, compiled into a 3D geological model, assists in the hydrogeological understanding of the northeastern part of the city of Sete Lagoas and serves as a basis for future studies in water resource management.

Keywords: Karst; groundwater; structural geology; geophysical survey; speleology.

5.1 Introduction

Karst plays a crucial role in water storage, supplying about 20-25% of the world's population (FORD and WILLIAMS, 2007). With the increasing demand and water scarcity in various regions, it is essential to conduct in-depth studies on these complex systems. The difficulty in studying karst areas arises from the constant evolution of aquifers, spatial heterogeneity and anisotropy, as well as factors such as hydraulic conductivity and the duality of recharge, which can be autogenic or allogenic (GOLDSCHIEDER and DREW, 2007).

Karstification is maximized under conditions where meteoric water dissolves rocks and drainage systems are favored by a humid climate during subaerial exposure periods. The complex internal structure of the karst system involves various factors that each play an important role in the karst formation cycle (BAKALOWICZ, 2005; NAJAFI and KARAMI, 2022). Limestone formations are essential for the development of karst; thus, appropriate lithology, along with the presence of geological faults in an area, can facilitate its formation. The fault networks within the karst not only promote its development but also create temporary or permanent storage tanks, directing water toward karst outlets. Additionally, fault systems have a significant impact on the shape and geometry of karst features (AUDRA *et al.*, 2006).

Due to the complexity of karst terrains, studies often combine direct and indirect data, with geophysics serving as a complementary tool (KRESIC, 2013). BENNETT and HODGE (2006) developed a study focused on the three-dimensional modeling of a karst aquifer in Southern California, achieving good results in delineating karst zones at depth. Baghzendani *et al.* (2024) use field data associated with geophysical methods such as induced polarization, electrical resistivity, and microgravity to show that the karstic holes to the west of Iran are related to tectonic phenomena and faulting, serving as conduits for transporting water to a karst spring.

These terrains become a focus of attention as their natural formation characteristics, combined with anthropogenic actions, lead to adverse effects such as groundwater contamination, water level depletions due to overexploitation, and the occurrence of geotechnical problems like subsidence and collapse (SCHUCH *et al.*, 2023; GALVÃO *et al.* 2024). Understanding the particularities of karst terrains is, therefore, associated with studies that aim to elucidate how they are affected by the growing urban-industrial expansion and what actions can be taken to mitigate these issues.

Sete Lagoas, in the metropolitan region of Belo Horizonte, Minas Gerais, is situated on carbonate rocks of the Sete Lagoas Formation. The city's water supply relies on the exploitation

of groundwater, which, coupled with unplanned urban growth, has led to issues such as water scarcity during dry periods (GALVÃO *et al.*, 2015; SCHUCH *et al.*, 2023). Since the late 1990s, some lakes in the city have become intermittent due to urbanization and increased groundwater consumption. Information about the factors that condition the karstification processes in this region of the municipality is still incipient, although it is very necessary to understand the hydrodynamic behavior of the karst aquifer and its practical implications.

This paper aims to understand the causes of the karstification process in the northeastern area of the municipality of Sete Lagoas. The combination of a multi-technique approach associating regional and local data was made to develop a 3D model to advance the understanding of karst terrains, coupled with karst hydraulic behavior, serving as a foundation for future management and preservation plans for the city's water resources.

5.2 Site description

The focus area of the study covers approximately 352 km² and is in the northern part of the municipality of Sete Lagoas (Figure 5.1), about 70 km from the city of Belo Horizonte, the capital of the state of Minas Gerais, Brazil. The city has a population of about 230,000 people, characterizing it as a medium-sized city (IBGE, 2022). The Autonomous Water and Sewage Service (SAAE) is responsible for public water supply, using almost exclusively groundwater from public wells (GALVÃO *et al.*, 2015). To date, 115 public wells have been drilled in the study area, in addition to 198 private wells, totaling 313 wells.

The climate in the region is humid tropical, with an average temperature of 21.3°C, varying from an average of 17.5°C in June, the coldest month, to 22.9°C in February, considered the hottest month of the year in the city. The average annual precipitation is 1,320 mm, with two well-defined seasons: the rainy season, which runs from October to March, accounting for 90% of the year's precipitation with an average of 1,184 mm, and the dry season, with an annual average precipitation of 135 mm, occurring between April and September (INMET, 2021).

Geologically, the area is located at the southeastern extremity of the São Francisco Craton, which was consolidated at the end of the Neoproterozoic Brasiliano orogeny and is bounded by the Araçuaí belt to the east and the Brasília belt to the west (Almeida, 1977; ALKMIM *et al.*, 1993). The basement outcrops in the southern part of the municipality being composed of gneissic rocks, granitoids, migmatized zones, and basic dikes (CPRM, 2003; TULLER *et al.*, 2010). The supracrustal rocks belong to the Bambuí Group, which, from bottom to top, is composed of the Neoproterozoic Sete Lagoas and Serra de Santa Helena formations.

The Sete Lagoas Formation is divided into two members: Pedro Leopoldo (base), composed of calcilutites and calcisiltites with sub-horizontal stratification planes intercalated with pelites and dolomitic levels; and the Lagoa Santa (top), composed of fine to medium calcarenites with stromatolites (GALVÃO *et al.*, 2016). The Serra de Santa Helena Formation covers about 40% of the municipality, mainly in the mountain range of the same name in the southern part of the city (DARDENNE, 1978) and consists of clayey siltstones with intercalations of shales and fine sandstones (TULLER *et al.*, 2010). The Cenozoic unconsolidated sediments covering the rocks of the Bambuí Group are differentiated into sandy-clayey detrital covers with gravel levels, alluvial terraces, and alluvium along the Velhas and Paropeba rivers. These sediments are in most of the urban area, as well as along the river drainages and terraces, covering approximately 10% of the territory (GALVÃO *et al.*, 2016).

The area has undergone at least three different geotectonical stages of deformation: 1) an extensional stage, with high-angle faults of NNW-SSE direction dipping eastward, during the initial sedimentation of the carbonate-pelitic sequence of the Bambuí Group; 2) a compressive stage, with low angle shearing to the west, parallel to the stratification planes of main N-S orientation, but without involving the basement, indicating thin-skinned tectonics; and 3) a distensive stage, related to the movement of basement blocks that deformed supracrustal rocks, forming antiformal and synformal folds of E-W axes that rotated previous structures. Additionally, fractures associated with shear zones are noted, with subvertical dips and principal directions of N0-20W, N50-60E, and E-W, cutting across the layers. Other fractures in the rocks of the Bambuí Group follow N50-60W and N20-40E directions. The basement topography is characterized by grabens and horsts with main directions of N60W, N40E, and E-W, playing a crucial role in the deformation of the limestones, acting as barriers to mass transport (CPRM, 2003; TULLER *et al.*, 2010, GALVÃO *et al.* 2016).

Geomorphologically, the area over the Sete Lagoas Formation's rocks and surrounding is characterized by karst features, such as cave entrances, sinkholes, lakes/ponds, few surface drainages, and closed drainage basins. The hilly relief pattern, with narrow valleys and dendritic drainage, developed over low permeability pelitic rocks of the Serra de Santa Helena Formation, is also common. The relief of the basement rocks corresponds to hilly areas, dendritic drainage, wide valleys, and low slopes, locally forming narrow and long ridges related to basic dike intrusions (TULLER *et al.*, 2010). The area's elevation ranges from 1,211 to 578 m, decreasing from the southwest, with higher elevations in the Serra de Santa Helena, to the northeast. The municipality is in the Paraopeba and Velhas river basins, separated by the Serra

de Santa Helena, which belong to the São Francisco River basin. The most important sub-basin for Sete Lagoas is the Jequitibá stream basin, which drains the entire urban area and most of the study area, marking the eastern boundary of the municipality before flowing into the Velhas river.

Three types of aquifers are noted: karst, fractured, and granular, with the Sete Lagoas Karst Aquifer System (SLKAS) being the most significant and important for the city (PESSOA, 1996). The SLKAS recharge zones are predominantly represented by sinkholes and cave entrances (autogenic), as well as areas where the limestones are covered by Cenozoic unconsolidated sediments (allogenic). Local precipitation, occurring during a limited period from October to December, is the main source of recharge. Most fluids migrate and are stored in tertiary porosities, characterized by solutionally enlarged bedding planes. Less frequently, water can also flow through enlarged subvertical fractures (GALVÃO *et al.*, 2015, 2017). The regional groundwater flow generally follows the bedding planes with a northeast orientation; however, a deviation in the direction of groundwater is noted in the central urban area of the municipality due to the high concentration of wells, resulting in a large cone of depression (GALVÃO *et al.*, 2015; MAGNABOSCO *et al.*, 2020).

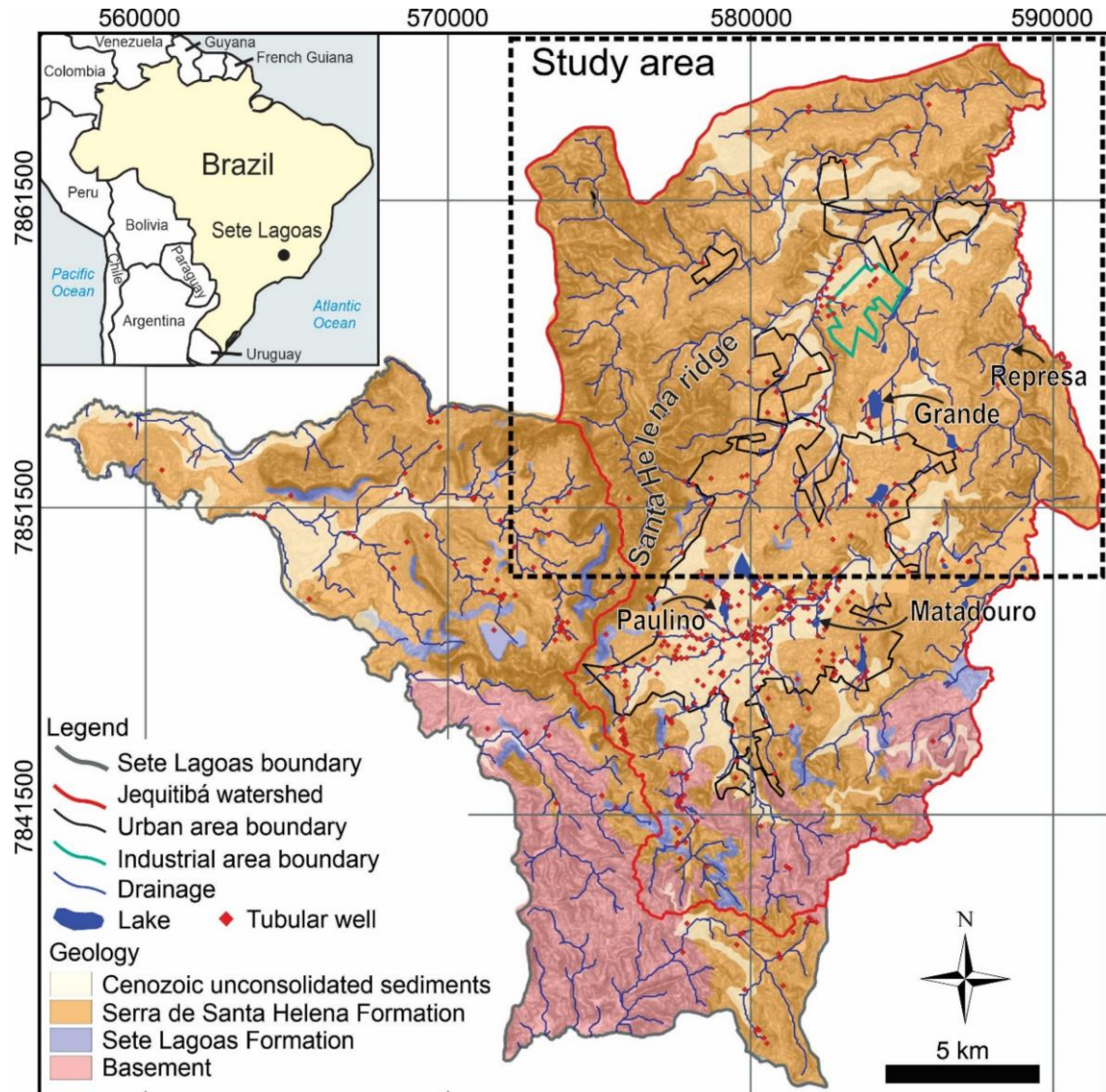


Figure 5.1 - Location map of the study area in relation to the municipality of Sete Lagoas with information on the lithology in the study area, drainage, tubular wells, and the urban-industrial area of the city (modified from Schuch et al., 2023).

5.3 Materials and methods

This study was divided into the following stages: 1) collection and processing of existing data and generation of thematic maps; 2) geological mapping; 3) terrestrial and regional geophysical analyses; 4) geological cross-sections construction; 5) potentiometric surface analysis; 6) geological modelling.

5.3.1 Survey of existing data

The terrain topography was generated using Alos Palsar satellite data from the Alaska Satellite Facility platform, with a spatial resolution of 12.5 x 12.5 m. Two images related to the magnetometry method were generated: an anomalous field image and an analytical signal amplitude image, as well as a ternary map related to the radiometry method. The data used are from the aerial survey report conducted by CODEMIG in area 10 (Belo Horizonte – Curvelo – Três Marias). The geological maps used are from CPRM (2009) (scale 1:50,000), and Galvão *et al.* (2016) (scale 1:25,000). A section of the Bouguer Anomaly Map of the State of Minas Gerais as a basis for the gravimetric interpretations of the region (GOMES, 2022). Data of boreholes, including location and lithostratigraphic profiles, were obtained from two platforms: SIAGAS (<https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/>) and SIAM (<https://www.siam.mg.gov.br/siam/login.jsp>), as well as data provided by SAAE.

5.3.2 Geological-structural and karst features mapping

The relief of the study area was first analyzed through photo interpretation, which made it possible to identify the most evident karstified features and potential rock outcrops that could provide additional information to those already present in previous geological mappings. The areas of interest identified through photo interpretation were the focus of field stages conducted concurrently with geological-structural and karst features mapping, as well as visits to the boreholes identified in the previous stage, with the aim of confirming their existence.

Geological, structural, and speleological mapping was conducted at a detailed scale of 1:20,000. A total of 45 points were visited, providing geological data on bedding, foliation, fractures, and karst features, such as small conduits formed in limestone outcrops. Additionally, 29 hydrogeology points were surveyed, identifying springs, two of which are karstic, as well as watercourses in the region, aimed at identifying physicochemical parameters that indicated water originating from the Sete Lagoas Formation rocks. Furthermore, points from previous geological mapping conducted by CPRM (2009) and Galvão *et al.* (2015) were visited to validate the database.

5.3.3 Terrestrial geophysical surveys

The geophysical survey involved 8 electrical resistivity image (ERI) transects having lengths ranging from 320 to 500 m, with an electrode spacing of 20 m, based on the dipole-

dipole array, using the X6xtal 500 model equipment. The data were processed using EarthImager 2D version 2.4.0 software, into which spreadsheets with the electrode positions along the survey line were imported, and the apparent resistivity was calculated for each reading. The data processing consists of interpolating these data and reducing the error until the smallest possible error values are achieved.

Simultaneously, a topographic survey was conducted to ensure accurate measurement of electrode positions using the Hi-Target V60 GNSS Receiver, with the base set up at strategic locations and connected for at least 30 minutes prior to data collection; this process ensured the precision of both geophysical and topographic data.

5.3.4 Geological cross-sections

Ten geological cross-sections were constructed using both direct and indirect data. Direct data consist of lithostratigraphic profiles from boreholes and structural data collected in the field, as well as data from previous mappings by CPRM (2009) and Galvão *et al.* (2016). Regional and local geophysical analyses guided the indirect interpretations in regions with fewer data, such as the northern parts of the study area, where there is a limited amount of lithological data from boreholes.

Five of the sections are oriented NW-SE (1-5), while the remaining ones are SW-NE (6-10), providing both parallel and oblique representations of the main identified structures: karstification and geomorphological features associated with regional and local lineaments that may indicate inferred normal faults. The cross-sections were plotted within the study area using ArcGIS 10.8 software to intersect the boreholes with lithological information and features of interest. The topography of the cross-sections was extracted from the Digital Elevation Model (DEM) of the terrain and imported into CorelDRAW, where the data were compiled and interpreted to produce schematic geological profiles.

5.3.5 Potentiometric surfaces

The potentiometric surface maps were generated using ArcGIS 10.8 software with in-situ data and information from the works of GALVÃO *et al.* (2015, 2017) and Alves *et al.* (2021). In the field, water levels were measured at 16 points: 13 from boreholes, 2 from karst springs, and 1 from Grande Lake.

From these points, hydraulic head was calculated, and the values were interpolated using ArcGIS 10.8 software to create curves representing the potentiometric surfaces. Since the data collection points were restricted to the central portion of the study area, the generated curves were also limited to this region. To generate a broader representation of the area, data from SCHUCH *et al.*, (2023) were used to infer the potentiometric surface in the adjacent areas.

Three main potentiometric surface maps were generated: 1) from the 1980s, before the urban-industrial expansion to the northeast of the city; 2) representative to the rainy season of 2023; and 3) for the dry season of the same year. Based on these maps, two additional maps were created: 1) differences between the potentiometric surface from the 1980s and present day, 2) differences between dry and rainy seasons. These maps provide fundamental information on the decrease in the water level of the aquifer over a period of approximately 33 years and in a shorter timeframe.

5.3.6 Geological modeling

The geological modeling was carried out using LeapFrog Geo version 2023.1 software (Bentley Systems. <https://www.seequent.com/pt-br/produtos-e-solucoes/leapfrog-geo/>), using data of lithological contacts, either at depth or on the surface, combined with existing structural data to generate implicit surfaces through geostatistical interpolation (FastRBF), producing information in locations where direct data is not available (COWAN *et al.*, 2003; CALCAGNO *et al.*, 2008; HASSEN *et al.*, 2016). The geological map generated after fieldwork stages was used, along with the obtained structural data and the lithostratigraphic profiles of 61 boreholes throughout the study area.

The final model measures 18,256.22 by 19,289.53 m, varying from 100 to 1,220 m in altitude. It includes 4 lithologies: 1) Basement, comprising rocks from the Belo Horizonte Complex; 2) Sete Lagoas Formation, where no differentiation is made between the Pedro Leopoldo and Lagoa Santa members; 3) Serra de Santa Helena Formation, consisting of pelites and marls; 4) Cenozoic unconsolidated sediments, which encompass detrital covers and alluvium identified in geological mapping and lithostratigraphic profiles of the boreholes.

The geological cross-sections were used to infer the normal faults responsible for the tilting of the basement blocks, which were then imported into the model as meshes created from moving planes. The fault planes are finite and were crucial in the explicit modeling stage, where the generated planes were used as the basis for editing the planes that represent the contacts between the lithologies through 2D and 3D lines.

5.4 Results

5.4.1 Regional analysis

5.4.1.1 Morphostructural lineaments

The hypsometric map indicates a minimum topographic elevation of 578 m in the northeastern section of the area, where a confluence of drainage occurs, and a maximum of 1211 m in the Santa Helena ridge (Figure 5.2a). Overall, the highest topography is found in the western region, represented by white and red colors on the map, while the central region, shown in green shades, has lower topographic elevations and a less rugged terrain.

The lineaments mapped at a scale of 1:150,000 show a main NE-SW direction, with secondary NW-SE lineaments (Figure 5.2b). The former are primarily found in the less flattened regions of the terrain, where the topography is more rugged, particularly in the western and eastern areas, especially near the Santa Helena ridge.

At a scale of 1:60,000, the lineaments also show a main NE-SW direction, although NW-SE lineaments are quite prominent in the area (Figure 5.2b). These local lineaments are generally shorter in comparison to the regional ones and, in some portions, run obliquely to the longer lineaments. This indicates a higher density of shorter lineaments in areas where there is a marked difference in elevation, suggesting regions where erosive processes have occurred.

The cumulative length of lineaments indicates that there is a greater length in the azimuths close to N20W and N50E, totaling 44.5 kilometers for the former and 53.1 kilometers for the latter, representing the highest combined values among the data (Figure 5.2c). In the east/west and north directions, the cumulative lengths are the lowest compared to the others.

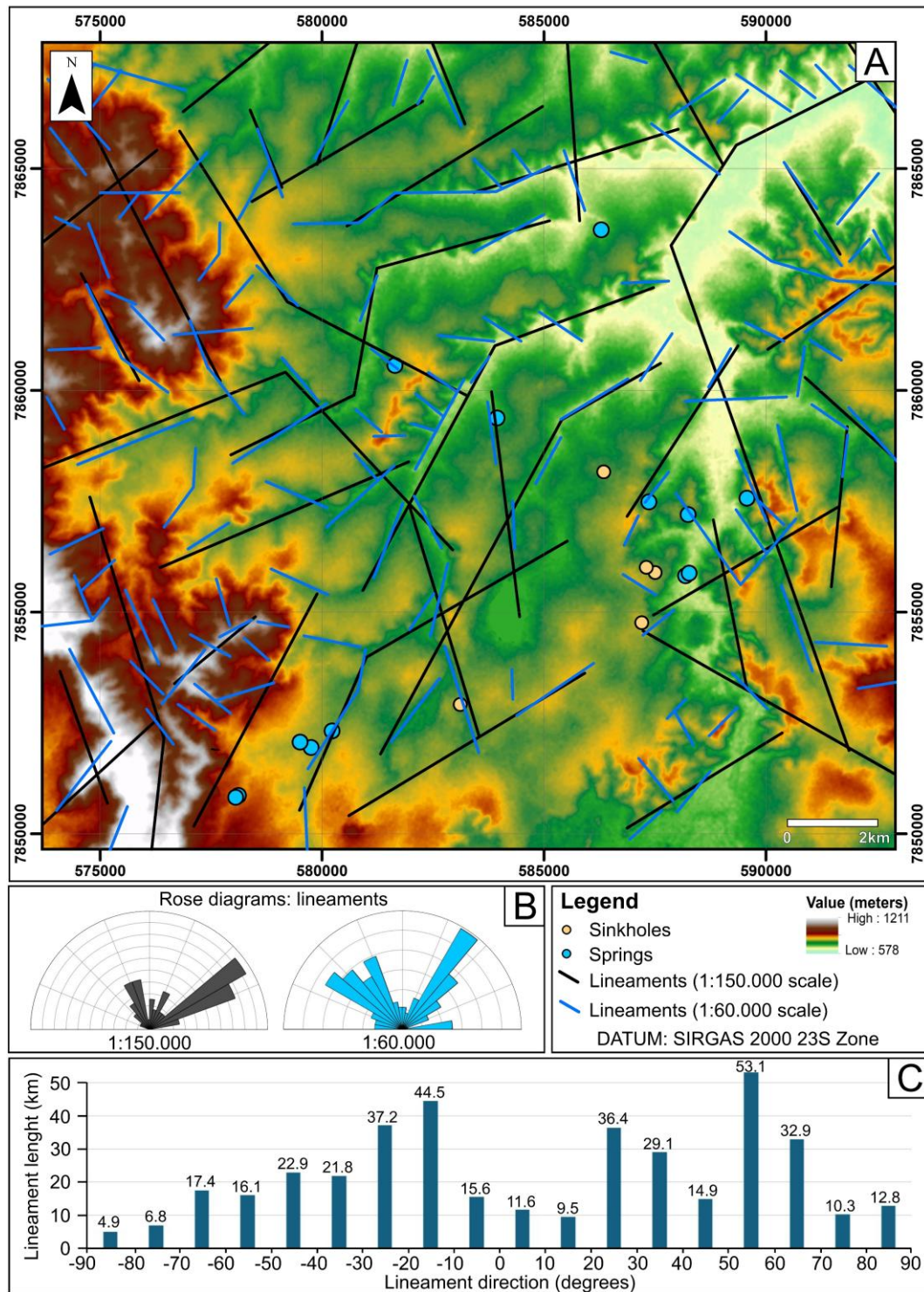


Figure 5.2 – A) Hypsometric map of the northern portion of the municipality of Sete Lagoas with lineaments plotted at scales of 1:60,000 (blue) and 1:150,000 (black). B) Roses showing the preferred directions of the lineaments plotted at the two different scales. C) Cumulative lengths of the lineaments by azimuths in increments of 10 degrees.

5.4.1.2 Gravimetry

The Bouguer Anomaly Map shows that the area is situated within a portion of subtle gravimetric variations, with gravity values ranging approximately from -90.0 to -78.8 mGal (Figure 5.2a). This behavior is due to the scale of the map and the comparison with adjacent regions that encompass the Araçuaí belt and the central region of the São Francisco Craton. The Santa Helena ridge, as noted by GALVÃO *et al.* (2016) and MAGNABOSCO *et al.* (2020), is supported by a high extension of the basement. The gravimetric data corroborates the existence of a relatively high portion of the basement in areas with higher topographic elevations.

Three main regions can be identified in the area according to gravimetry: 1) western, where the Santa Helena ridge is located, showing a gradual increase in the anomaly towards the northwest, following the higher topographic elevations; 2) central-north, exhibiting the lowest values, gradually decreasing from the center of the area; and 3) southeast, presenting higher gravity values, which may indicate a relatively high of the basement, similar to what occurs in the Santa Helena ridge, albeit less pronounced.

5.4.1.3 Magnetometry

The magnetometry method indicates higher magnetic susceptibility (K) values, represented in reddish and magenta tones, with a preferred SW-NE direction mainly located in the southeastern portion of the study area (Figure 5.3b). The magnetic lineaments on the Analytical Signal Amplitude (ASA) map present preferred directions of S-N and E-W, in addition to SW-NE and SE-NW, which are also evident throughout much of the area.

That portions with higher magnetic susceptibility are concentrated in the central region of the area, with lateral continuity only to the northeast and southwest. The northwest and southeast portions are characterized by lower magnetic susceptibility values for the more superficial anomalies, as indicated by the analytical signal amplitude data.

5.4.1.4 Radiometry

The ternary radiometric map highlights reddish and purplish colors across much of the western extent of the area, coinciding with the Santa Helena ridge (Figure 5.3c). These colors are associated with the predominance of the uranium and potassium channels. In the central portion of the map, there is a prevalence of greenish and light blue tones, indicating a higher

concentration of uranium and thorium in the more flattened topographical portions of the terrain. In the eastern part, darker reddish tones predominate, indicating greater concentrations of potassium in the soil.

The darker portions of the ternary map, shown in black, are related to the presence of alluvial terraces, primarily associated with the Jequitibá and other streams, which in the central-north section runs SW-NE. The Grande Lake, an important water body in Sete Lagoas region, also appears in black, indicating the difficulty of acquiring radiometric data in features of this nature.

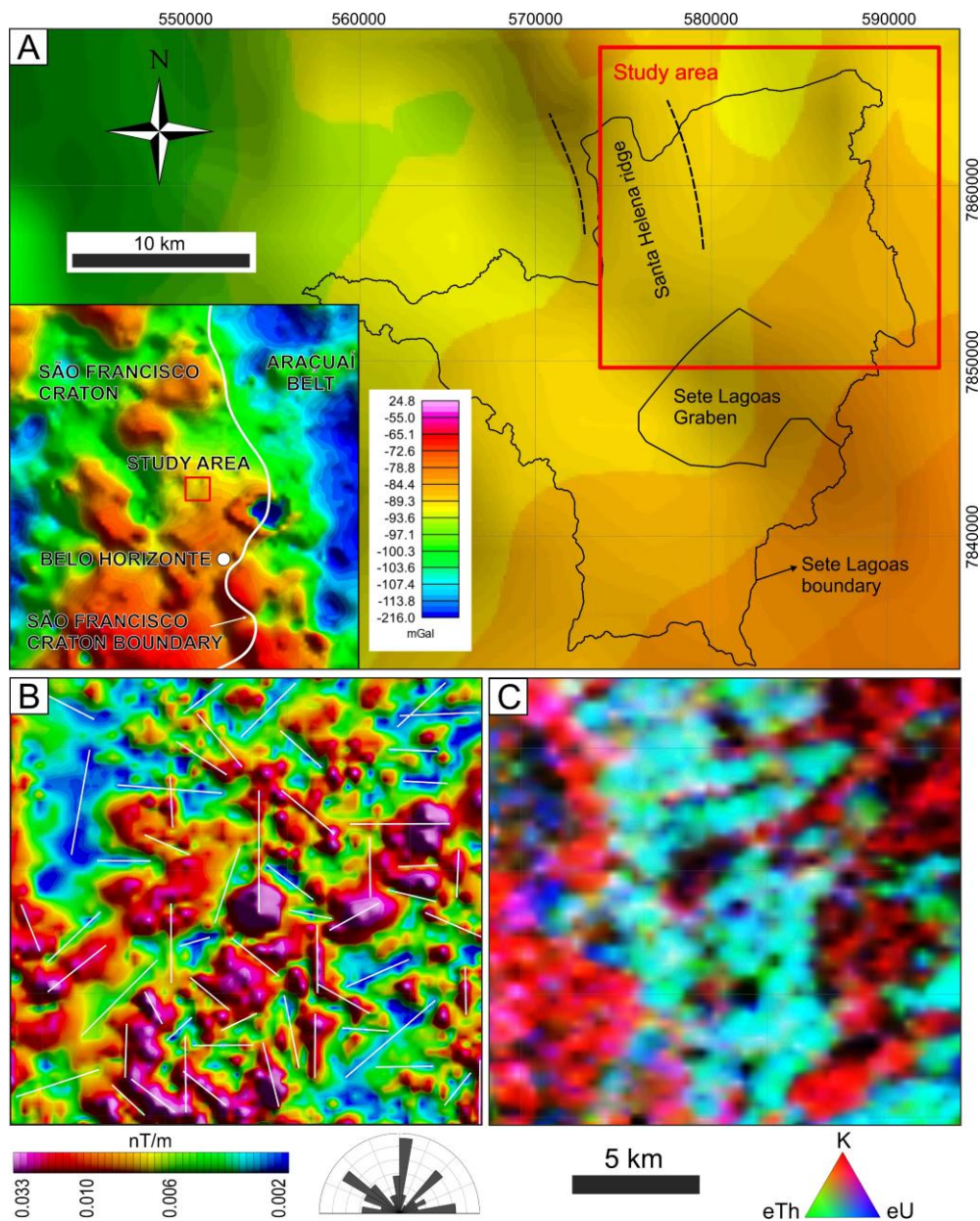


Figure 5.3 - A) Gravimetric map of the Bouguer anomaly of the state of Minas Gerais with the location of Sete Lagoas, the study area, the Santa Helena ridge, and the Sete Lagoas central graben.

The lower left corner shows a zoom in of this map highlighting the Araçuaí Belt and the São Francisco Craton. B) Magnetometric map of the Analytical Signal Amplitude (ASA) with lineaments and a rosette diagram showing the azimuths. C) Ternary radiometric map of the study area with RGB color legend for the uranium, thorium, and potassium channels.

5.4.2 Field mapping

The rocks of the Serra de Santa Helena Formation are the most prominent, with their structures easily observable and measurable, particularly in the western portions of the area, near the ridge of the same name and in the eastern regions (Figure 5.4a). The bedding planes for shales and marls were around N30W/30NE; the layers were therefore found to dip preferentially to the northeast, with an average dip angle close to 30 degrees, varying between 20 and 60 degrees. Other dip directions for the bedding were identified secondarily, mainly towards the southeast, also with a dip angle around 30 degrees.

Two main features have been identified in the rocks of the Serra de Santa Helena formation. The first, and most evident, is a foliation with an E-W direction and a subvertical dip to the north, varying from 70 to 90 degrees, with an average of N05W/80NE. The second is a family of fractures, also with a primary E-W direction and a subvertical dip close to 80 degrees, averaging N20E/80SW.

Sete Lagoas Formation's limestone outcrops are primarily found in the southern part of the area, where significant structures such as sedimentary bedding, fractures, and karst conduits can be observed and measured. The bedding planes of these rocks exhibit behavior like that of the shales of the Serra de Santa Helena Formation, with average measurements of N20W/20NE, although there is a variation in dip towards the southeast, with values close to N15E/20SE.

The fractures measured in the rocks of the Sete Lagoas formation also follow the two previously identified families, along with a third: family 1, N30W/90NE, which is less pronounced than in the shales; family 2, more pronounced in this formation, averages N70W/85SW; family 3, averaging N10E/45SE, although not the most evident, presents a lower dip angle and is more related to the development of the conduits found. The small conduits present in the outcrops were measured as lines and exhibit two main directions of dip: southeast, N40E/20SE, and northeast, N15W/18NE.

In addition to the rocks, five sinkholes were identified in the area; in some of them, rocks of the Serra de Santa Helena Formation at the top, with vegetation in the background, as observed, although it was not possible to visually verify connections with the karst aquifer. The

sinkholes were characterized as caprock type (TRAVASSOS, 2019). Thirteen water springs were mapped, of which 11 are representative of the portions above the limestones of the Sete Lagoas formation and two of the mapped springs are karstic.

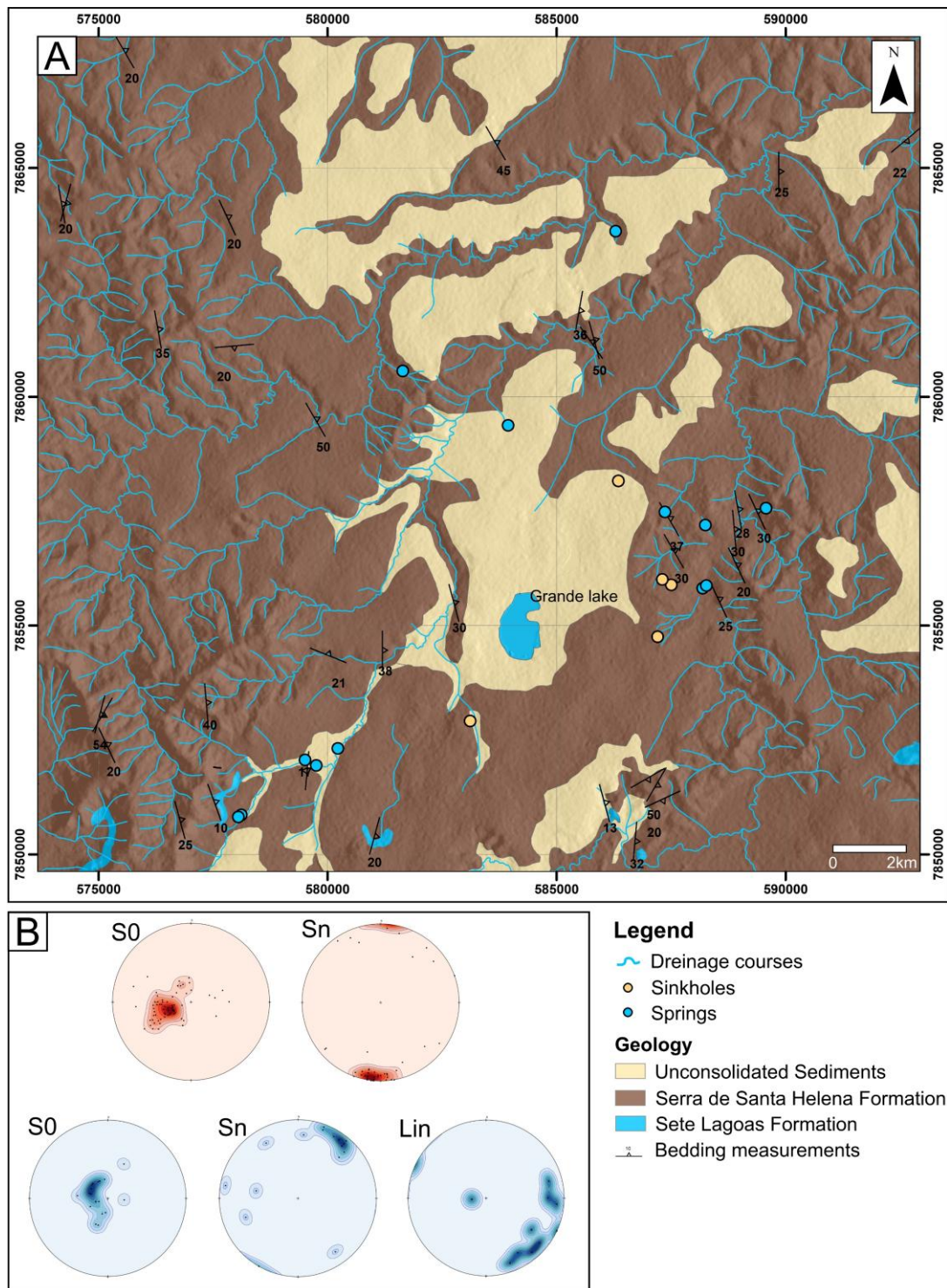


Figure 5.4 – A) Map of the study area showing lithologies, drainages, and karst features identified in the field, as well as the water springs. B) Stereograms with azimuths of bedding planes, foliation, and intersection lineaments.

5.4.2.1 Terrestrial geophysical surveys

The ERI transects showed depths that varied from 101 m along a 500 m long line to 54 m along a 320 m line. Generally, a tendency of lower electrical resistivity values in the first meters at depth, indicating saturated zones (water table), is noted. The portions immediately below typically present higher resistivities, which is expected since the less weathered rocks of the Serra de Santa Helena Formation have a lower water content; this fact occurs in a significant part of the study area.

Transects 1 and 2 are located near the karst springs, at topographic elevations ranging from 665 to 688 meters (Figure 5.5). In Transect 1, there is homogeneity in the electrical resistivity of the upper and lower portions, indicating an increase in the depth of the saturated zones towards the NW, following the lower topographic elevations. Transect 2 shows a decrease in the water table level towards the SE at its midpoint, classified as geo-electrical discontinuity A (Figure 5.6).

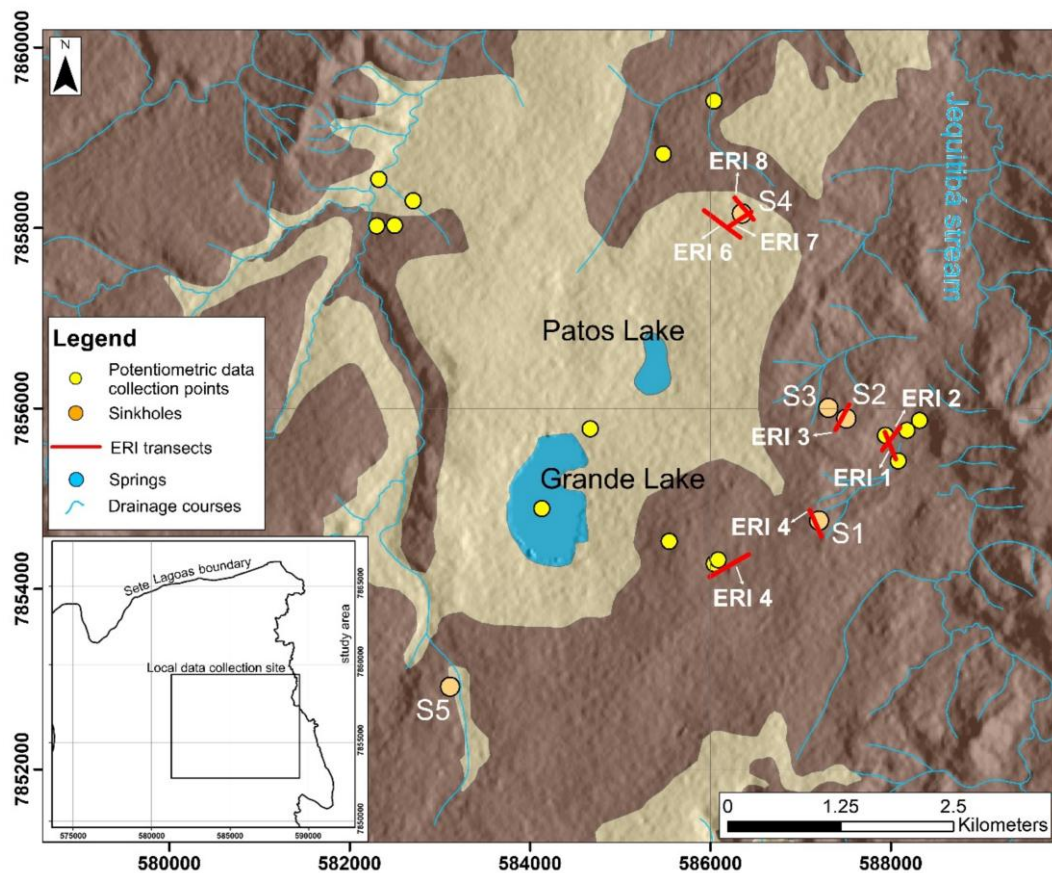


Figure 5.5 - Location of the ERI transects data with informations of geology, drainages, sinkholes locations and the potentiometric data collection points. Below, the location of the data collection points in relation to Sete Lagoas boundary.

Transects 3 and 4 are located near the sinkholes S1, S2, and S3. Line 3 is situated between two sinkholes and shows that, in addition to a clearly defined saturated water level up to 40 m, there is a decrease in electrical conductivity in the middle of the section, with values around 400 $\Omega\cdot\text{m}$, contrasting with the high resistivities of the surrounding area, designated as geo-electrical discontinuity B. Transect 4 shows a less resistive portion well-defined in the northwest portion of the profile (Figure 5.6), while in the southeast portion there are zones of low resistivity beneath areas with higher resistivity, which may indicate continuity of karst features at depth (C).

Transect 5 is located east of Lagoa Grande, near a tubular well. The lower values of electrical resistivity in the upper portions of the section, ranging from 200 to 11 $\Omega\cdot\text{m}$, also indicate a difference between the fresher and more altered metapelites, with the latter reaching depths of up to 50 m, without any evidence of karst features at depth (Figure 5.7).

Transects 6, 7, and 8 are positioned parallel (lines 6 and 8) and perpendicular (line 7) to sinkhole S3, which is the smallest of the mapped sinkholes. In Transect 6, an area with lower resistivity values in the center can be observed, identified as geo-electrical discontinuity D. Transect 7, which is oblique to the others, also shows a less resistive zone in the center, identified as E. Transect 8 indicates an increase in conductivity with depth towards the northwest, in the opposite direction of the location of sinkhole S4, although aligned with geo-electrical discontinuity D, indicating a connection between the possible features (Figure 5.7).

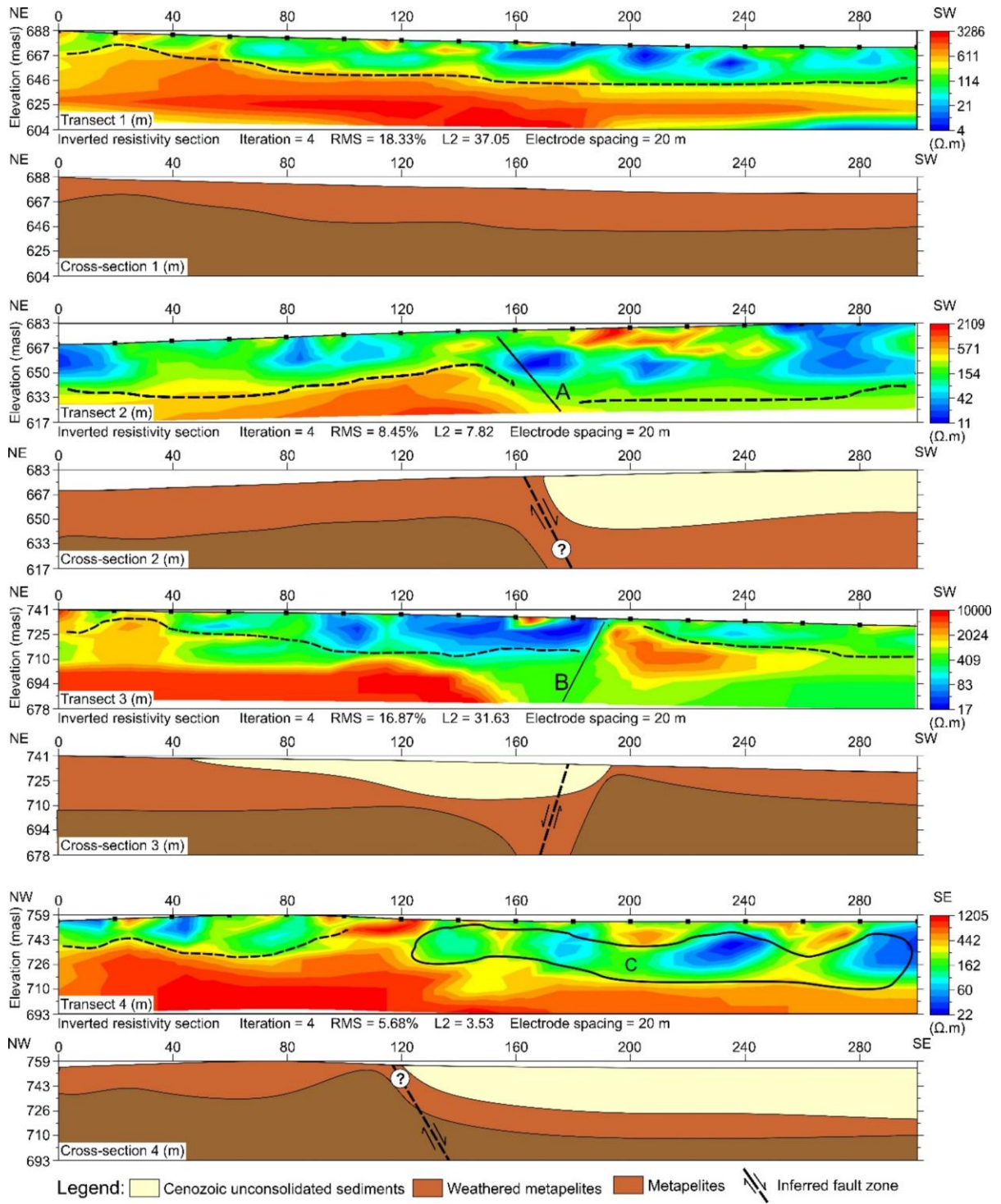


Figure 5.6 - Map showing the ERI transects (1-4) with the geo-electrical discontinuities and the geological interpretation below.

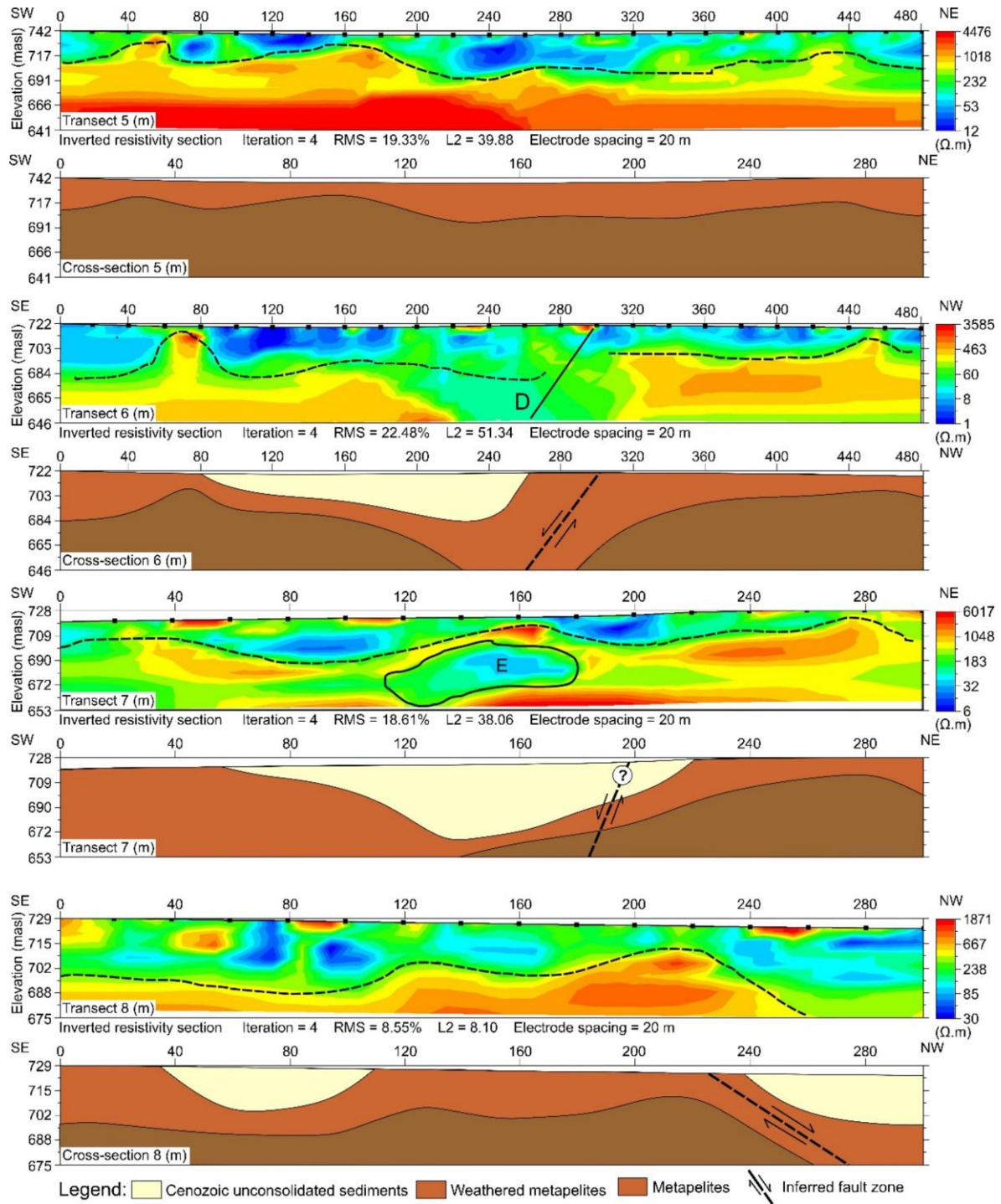


Figure 5.7 - Map showing the ERI transects (4-8) with the geo-electrical discontinuities and the geological interpretation below.

5.4.3 Potentiometric surfaces

The potentiometric surface map indicates that the groundwater flow moves in the NE direction (Figure 5.8a). Generally, the highest hydraulic heads are found in the western portion

of the area, near the highest topographic elevations and the Santa Helena ridge, decreasing according to the topography and toward the northeast.

The potentiometric surface map from 1980's (Figure 5.8a) represents the period prior to urban-industrial expansion (SCHUCH *et al.*, 2023) indicating that the groundwater flow moved toward the northeast in a more homogeneous way, with no cones of depression. The groundwater flow direction in 2023 continues to follow the same behavior regionally as it did before the urban-industrial expansion, indicating cones of depression in at least three regions (Figure 5.8a).

The potentiometric surface variation maps (Figure 5.8b), indicating the differences in hydraulic heads between the 1980s and 2023, highlights the decrease, which has also been verified by Alves *et al.* (2021) and Schuch *et al.* (2023). In a large part of the eastern portion of the area, the water level drawdown is around 20 m, reaching 30 m in the central and northeastern portions. In the central portion, where the developing industrial park is located, this difference reaches 100 m.

The difference in the potentiometric surface between the rainy and dry seasons, on the other hand, shows a variation of approximately 1 m across much of the area (Figure 5.8b). The values obtained in this variation include areas where there has been an increase in the measured water level and other portions where a decrease has occurred, although there is a predominance of the decrease. In the central region, a significant reduction in hydraulic head values can also be observed, reaching a negative variation of 30 m.

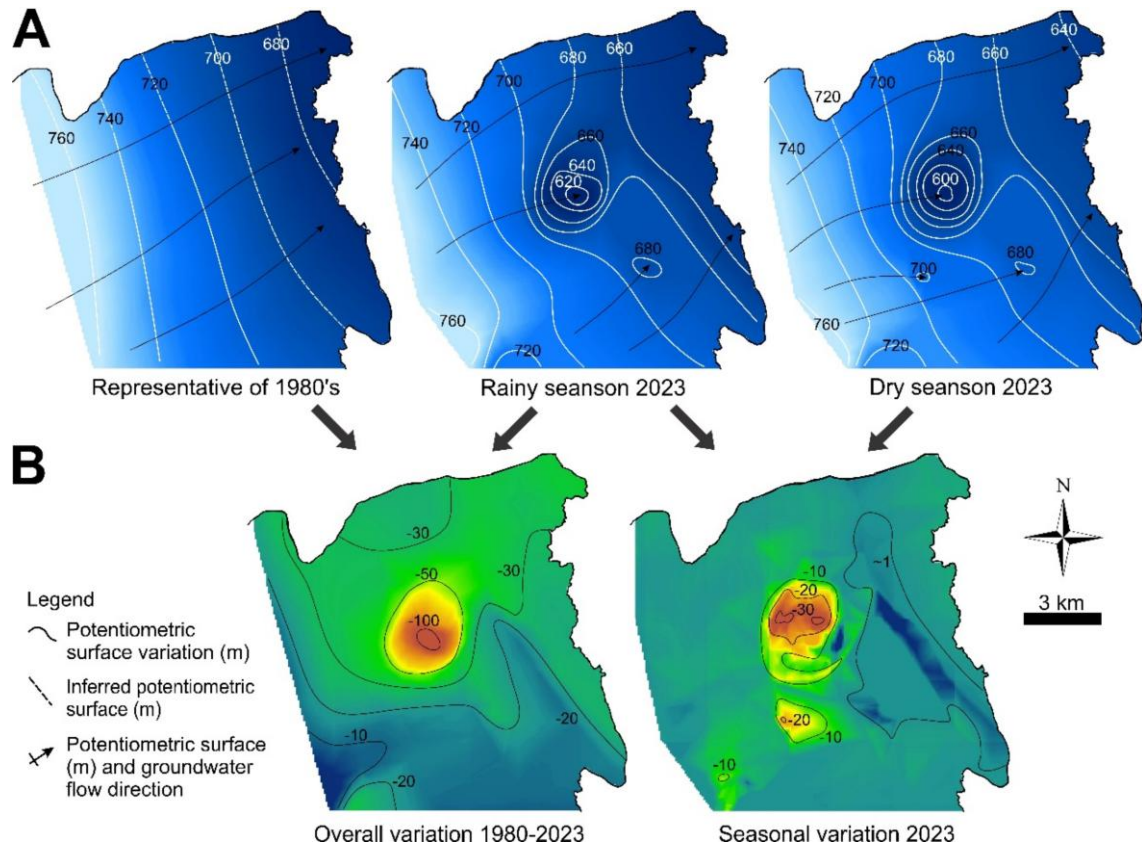


Figure 5.8 - A) Representative potentiometric surface map from 1980's prior to the urban-industrial expansion (modified from Schuch et al. 2023), and maps for the rainy and dry seasons of 2023, respectively. B) Map showing the difference between the potentiometric surface of the 1980s and the rainy season of 2023 on the left, and a map showing the difference between this surface for the rainy and dry seasons of 2023 on the right.

5.4.4 Geological cross-sections

Cross-sections 1 to 5 have a preferred NW-SE direction and indicate the presence of grabens and horsts, which provide support for the Santa Helena ridge (Figure 5.9). Generally, there is an increase in the thickness of the rocks of the Sete Lagoas and Serra de Santa Helena formations as the sections increasingly represent the northern portion of the area. Additionally, the thickness of the limestones also increases in the central parts of the sections, which coincide with the center of the study area.

The horst represented in the central part of the cross-section 1 does not exhibit continuity to the north, showing a thinning of both the limestones and the shales that is not observed in other regions of the site. Section 2 marks the beginning of the thicker limestone packages, which are also evident in the other cross-sections. Furthermore, in sections 2 to 5, there is a

predominance of topographically flattened terrains with the deposition of Cenozoic unconsolidated sediments.

The surface drainages have a tendency for water flow to the northeast, following the slope of the basin. Despite this, the system of extensional faults does not appear to be the only conditioning factor of the drainages, although the Jequitibá stream (cross-sections 2, 3, 4, 5, 8 and 10) exhibits exceptional behavior. Throughout much of the study area, the stream has a nearly N-S rectilinear shape, bordered to the west by the topographic highs and to the flattened region in the center. In this case, it was inferred that the drainage is conditioned by a horst.

The SW-NE cross-sections (Figure 5.10) show the rock layers in the direction of their dip. In all cross-sections, there is a gradual increase in the thickness of the limestone and shale layers towards the southeast, as expected. Section 8 illustrates well the horst that precedes the Sete Lagoas graben as delineated by Galvão *et al.* (2016), with no indications of the Serra de Santa Helena and Sete Lagoas formations in these portions, only Cenozoic unconsolidated sediments. Although they are not identified in this portion, further northeast these rocks already show significant thicknesses.

The behavior of the rocks in the SW-NE sections, therefore, exhibits a common pattern: thinner layers of limestone and shale where there are basement highs (horsts) and thicker layers in grabens. Nevertheless, it is noticeable in section 8 that in the vicinity of the wells PTP-258, PTP-257, and PTP-256, although the Sete Lagoas Formation exceeds 200 m in thickness, the Serra de Santa Helena Formation does not possess significant expression, often sharing space with Cenozoic unconsolidated sediments in the more flattened terrain portions.

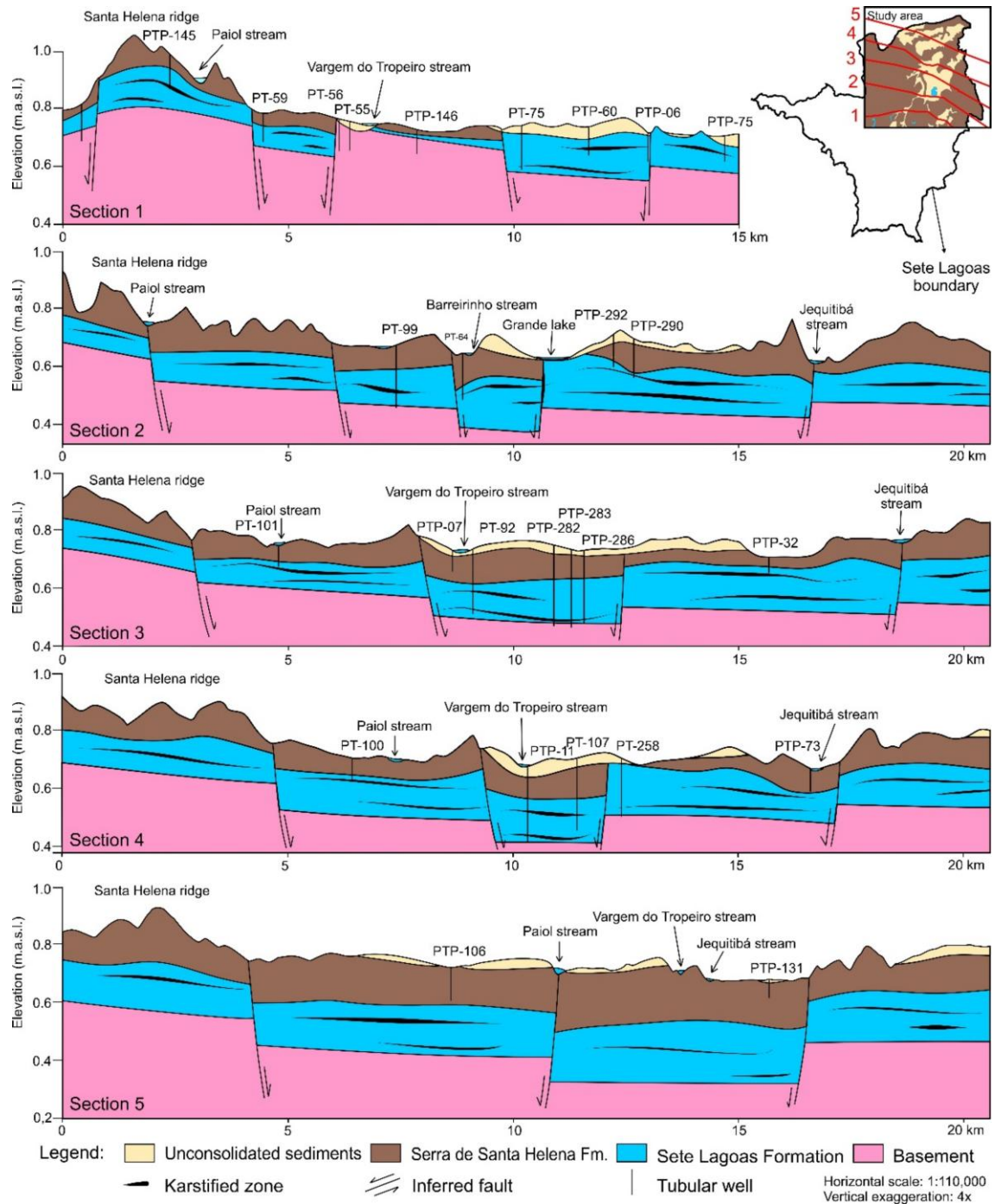


Figure 5.9 - Geological cross-sections with a NW-SE direction (1 to 5) and their locations in relation to the municipality of Sete Lagoas and identification of lithotypes, karstified zones, tubular wells and streams.

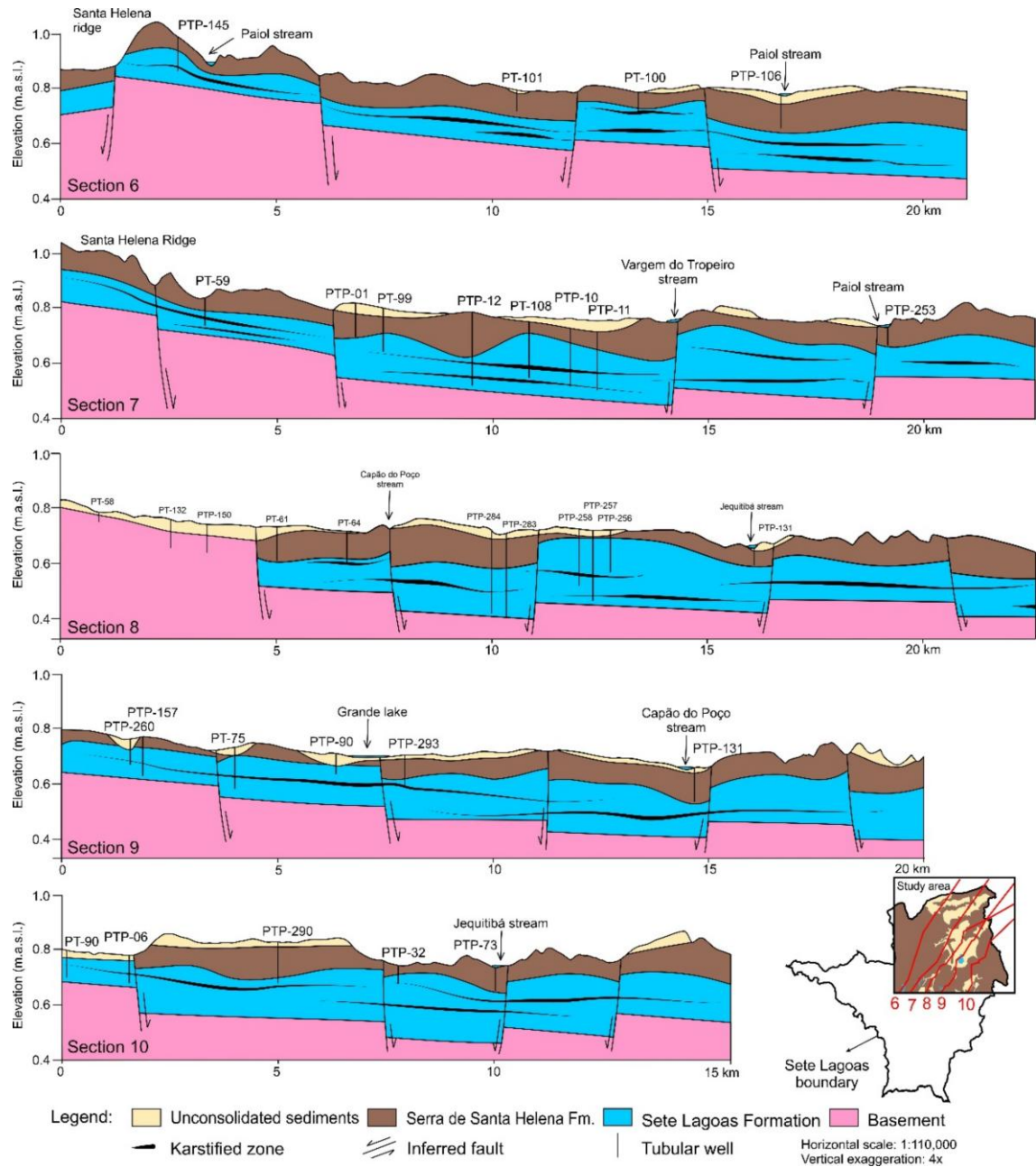


Figure 5.10 - Geological cross-sections with a NW-SE direction (6 to 10) and their locations in relation to the municipality of Sete Lagoas and identification of lithotypes, karstified zones, tubular wells and streams.

5.4.5 Geological model

The 3D geological model covers an area of 352 km² and contains four hydrostratigraphic units, from bottom to top: 1) Fractured aquifer; 2) Sete Lagoas Karst Aquifer System (SLKAS); 3) Serra de Santa Helena aquitard; and 4) Porous medium aquifer, represented by Cenozoic unconsolidated sediments.

The basement is characterized by discordant and abrupt contacts with the overlying rocks, influenced by normal faults that form grabens and horsts (GALVÃO *et al.*, 2016). These faults have preferred directions of SW-NE and SE-NW, as well as faults with an almost N-S direction (Figure 5.11). There is a gradual decrease in the elevation of the basement towards the north, reaching 180 m in these portions and up to 820 m in the higher areas.

The limestone of the Sete Lagoas Formation outcrop in small portions in the southern part of the area, mainly at the Santa Helena ridge foothill and in other areas as rocky cliffs, which are in abrupt and conformable contact with the metapelites of the Serra de Santa Helena Formation due to sliding faults (GALVÃO *et al.*, 2016). The size and thickness of the layer of this formation vary due to its relationship with the morphology of the basement, generally showing greater thicknesses in the grabens and lesser thicknesses in the horsts. Thicknesses range from 10 m in the highest portions of the basement, mainly in the southern part of the study area, to 320 m in the north, where the thicknesses are greater (Figure 5.11).

The metapelites of the Serra de Santa Helena Formation cover most of the study area and have an average thickness of 150 m, with portions where they are absent reaching 220 m in the higher parts of the basement to the south of the area. Despite covering a large part of the area, they also exhibit thinning and even absence in certain regions. Generally, the metapelites are thinner in the southern regions and gradually become thicker towards the north, except near wells PTP-256, PTP-257, and PTP-258 (Figure 5.10 - section 8). The absence of this formation is noted over the limestones to the southeast, where the upper contact is with the unconsolidated Cenozoic sediments and in urbanized areas in the central-southern part, where only unconsolidated sediments are in contact with the crystalline basement.

Cenozoic unconsolidated sediments overlie, through erosive contacts, all other lithologies, although they are more common over the metapelites of the Serra de Santa Helena Formation. In the southern portion, these sediments are also found overlying the Sete Lagoas Formation and the basement of the Belo Horizonte Complex.

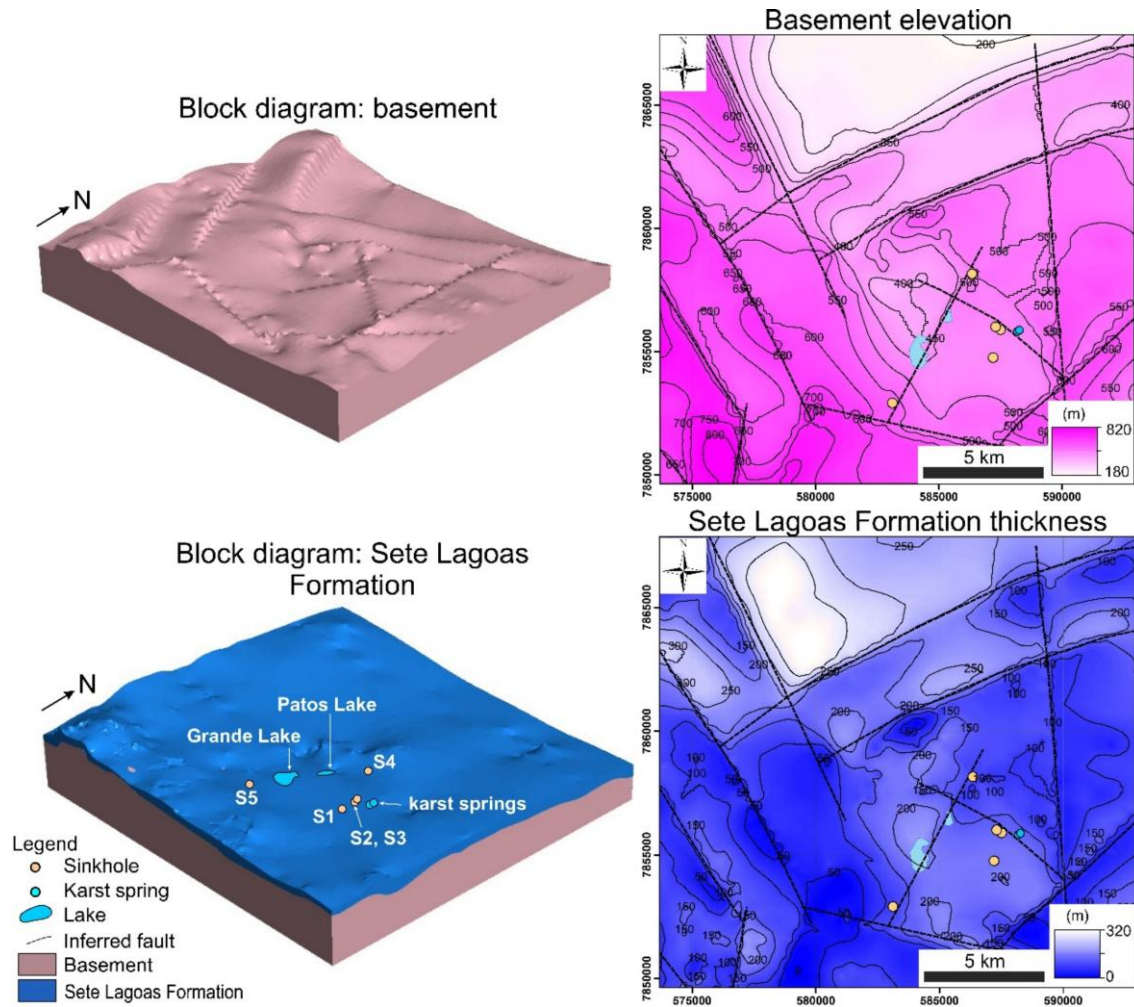


Figure 5.11 - Block diagram showing inferred faults, sinkholes, karst springs, lakes, Basement elevation and Sete Lagoas Formation thickness.

5.5 Discussion

5.5.1 Integration of methods analysis

The analysis of regional data provides information about the local geomorphology and how these factors are associated with the morphology of the rocks at depth, especially the more competent rocks, such as the crystalline basement, which ultimately shapes the less competent supracrustal rocks. Although regional geophysical data may not be very precise due to the data acquisition grid, it is important to analyze how these regional factors may be linked to the local expressions of geology.

Hypsometry indicates that the eastern and western portions have higher topographic elevations than those in the center and the northern and northeastern portions. The Santa Helena ridge is the region where the topography is highest and the locations where the homonymous

rocks and their associated structures (e.g., bedding planes, foliations, fractures/faults, and quartz veins) can be identified. The use of the Bouguer Anomaly Map (Figure 5.3), despite the scale limitations (1:1.000.000) reveals a relative increase in gravity in the northwestern and southeastern portions, where horsts are expected.

Radiometry corroborates the topography as the higher portions show higher concentrations of potassium compared to the topographically more flattened areas (Figure 5.3). Thorium and uranium are fewer mobile elements than potassium; therefore, once removed from the matrix rock towards the more superficial layers of the soil, they are easily absorbed by clay minerals and precipitated as iron oxide, which explains the greater concentration of these elements in more developed environments (WILFORD *et al.*, 1997). In the northeastern region, where the confluence of drainages in the Jequitibá stream sub-basin is located, there is a predominance of alluvial terrace formation, which imparts dark coloration to the radiometric results, as these terrains and bodies of water hinder the transmission and, therefore, reception of radioactivity by the sensors during the survey.

The amplitude magnetometric map of the analytical signal indicates that there is a magnetic high in an NE-SW direction in the central portion of the study area, extending in the same direction (Figure 5.3b). The traced lineaments highlight the presence of well-defined N-S, E-W, SW-NE, and SE-NW structures. Overall, the morphostructural lineaments also follow the SW-NE and SE-NW pattern; the SE-NW lineaments are visible at the regional scale (1:150,000) and have important geomorphological expressions, as they delineate the breaks in relief in some portions, such as in the Serra de Santa Helena.

Geological mapping shows the prevalence of pelites from the Serra de Santa Helena Formation and the Cenozoic unconsolidated sediments compared to the Sete Lagoas Formation's limestones. Nevertheless, the development of karstification features is associated with the percolation of meteoric waters in the weak zones of the limestone rocks, particularly through fractures, which also have expressions in the pelites. The main families of fractures identified in the field have dip directions towards the south and east, predominantly, and are associated with E-W and N-S trend structures. These structures are described by CPRM (2003) as products of the main deformation events in the region, being also highlighted by MAGNABOSCO *et al.* (2020) as zones of favorable water conditions in the southern portion of the area.

An alignment of karst features is observed in the center; Grande Lake, Patos Lake and sinkhole S4 follow an NE-SW direction (Figure 5.5), with low topographic alignments

connecting these three features. ERI transects near S4 indicated low resistivity in all of them, suggesting a zone of karstification that may extend from Grande Lake to S4, where there is a thickening of the Sete Lagoas Formation at the expense of unconsolidated sediments, making the surface expression of these features less common further north in the study area.

In addition to sinkhole S4, the vicinity of three other sinkholes were used for analysis: S1, S2, and S3. The allocated ERI transects in these regions, 3 and 4, indicate zones of low resistivity relative to the surroundings. Line 3 presents the geo-electrical discontinuity B as the main indicator of the continuity of a karstification feature at depth. It is also noted that there is an alignment among the karst springs, sinkholes S2, S3, and S4 in a SE-NW direction, consistent with the lineaments at scale 1:60,000, which, although shorter, are more present and more penetrative. Line 2, also perpendicular to this section, has the geo-electrical discontinuity A with characteristics like B (Figure 5.6) and may indicate a continuation of this feature further southeast. Lines 1 and 5, although indicating the depth of the water table, do not present areas with low resistivity at depth and may only have data collected in zones with metapelites of the Serra de Santa Helena Formation.

Potentiometric surfaces are a complement to the analysis of local hydrogeological behavior. The decrease in water levels of the SLKAS was a factor observed by Schuch *et al.*, (2023) and is evidenced by the difference between the 1980s and the rainy season of 2023, with a decrease of up to 100 m in regions where today the cones of depression promoted by urban-industrial activities to the northeast of the municipality can be identified. The difference in this surface between the rainy and dry seasons, on the other hand, is not as evident across the entire area, being more perceptible in regions where there is groundwater pumping.

The final 3D geological model (Figure 5.12) is a representation of all the data acquired and interpreted in the stages described in the methodology. The data validation stage consisted mainly of analyzing the lithostratigraphic profiles of the tubular wells and discarding those that did not provide good descriptions of the presented lithotypes. Additionally, 6 optical profiling surveys were conducted in the tubular wells, supporting the drilling reports and reinforcing features such as the thinning of metapelites and the highs of the limestones illustrated in Figure 5.10 (section 8).

5.5.2 Karstification conditioning factors

The mapped karstified zones are Grande Lake, Patos Lake, five caprock sinkholes, and two karst springs. All these surface features are in the central and central-southern portion. This

region is characterized by the presence of the lowest topographic elevations and a predominance of thorium and uranium channels, in addition to being a transition zone between basement horsts that support higher topographies to the west and east (Figure 5.3).

Geologically, the central region also showcases significant thicknesses of the limestones from the Sete Lagoas Formation and some thinning of the metapelites from the Serra de Santa Helena Formation, characterizing a local graben (Figure 5.7). Although the lineaments in this area are not very evident due to erosive actions on the terrain, an alignment of karstic features can be identified in the NE-SW (Grande Lake, Patos Lake, and S4) and SE-NW (karst springs and sinkholes S2 and S3) directions. These directions are more prominently identified in the local lineaments and in the ASA lineaments (Figure 5.3a).

The Cenozoic unconsolidated sediments that form the semi-porous aquifer are composed of accumulations of alluvial sandy sediments and sandy clay covers with gravel levels (PESSOA, 1996; TULLER *et al.*, 2010). The graben topography favored the accumulation of sediments in the central region, with mean thickness of 10 m and reaching up to 100 m. This unit may also be hydraulically connected to the karst aquifer in certain areas, mainly in the central region, due to erosion of metapelites from the Serra de Santa Helena Formation, like what was identified in the urbanized area of Sete Lagoas by Galvão *et al.* (2015) and Magnabosco *et al.* (2020). The slow percolation of water through the sediments contributed to the formation of humic acids, making the water more acidic and intensifying the karstification in the area (GALVÃO *et al.*, 2017).

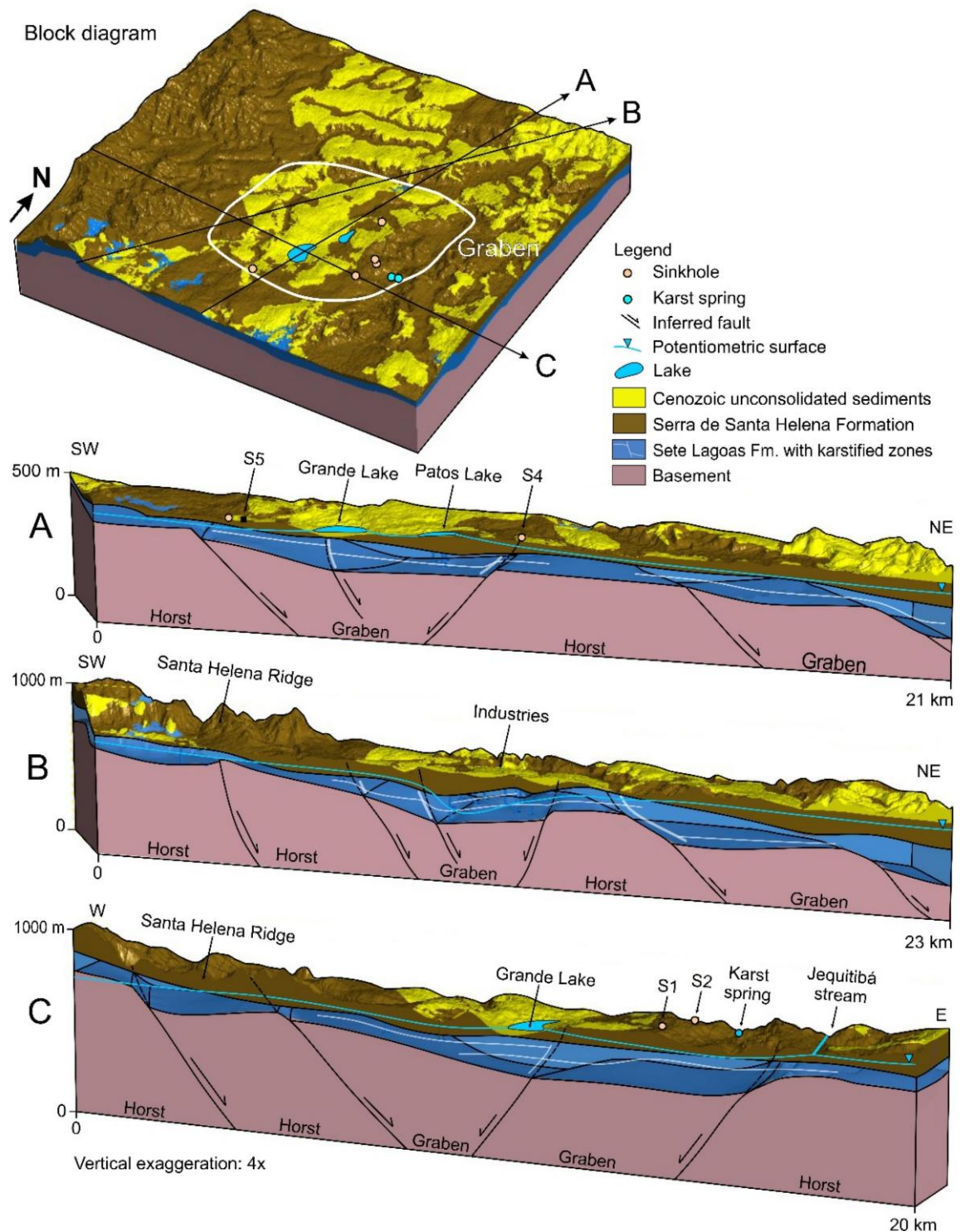


Figure 5.12 - Block diagram of the study area with 3 cross-sections (A, B and C) showing the center graben, it's relation with the karstified features, the basement morphology and the potentiometric surface.

5.6 Conclusions

The grabens and horsts of the basement, with primary directions of N70W and N30E, are the main factors responsible for the geometry of the hydrostratigraphic sequences and karstification zones, which also follow these directions. The compressive tectonics, both syn and post-depositional, that affected the basement, and the rocks of the Bambuí Group are responsible for the formation of a graben in the central region of the study area, leading to the thinning of the metapelites of the Serra de Santa Helena Formation and, consequently, a greater surface expression of karstification, also in the NW-SE and NE-SW directions.

Regional analyses through hypsometry and geophysical methods, combined with geological, structural, and speleological mapping, revealed surface expressions linked to the geometry of subsurface rocks. The graben in the center of the study area is a topographic low affected by erosion and weathering processes. The morphostructural lineaments, geophysical features, and fractures measured in the field also align with the NE-SW and NW-SE directions, although they are not as common in the more eroded areas of the terrain, where structural expressions are more visible through the alignment of the karstified features.

The direction of water flow in the study area is towards the northeast, with drawdown cones of up to 100 meters in areas where groundwater exploitation from the karst aquifer is most intense. The difference in hydraulic head between the rainy and dry seasons of 2023 is not significantly pronounced, varying around -1 m across the area and up to -30 m in the industrialized region. The difference in the potentiometric surface between the 1980s and the year 2023 is about -30 m, reaching up to -100 m in the area with the most pronounced drawdown cone in the northeastern part of the municipality.

Local geophysics using the electrical resistivity method indicates the continuity of karst zones at depth near the mapped karstified features, following the alignment directions: NE-SW (Grande Lake, Patos Lake, and S4) and NW-SE (karst springs, S2 and S3).

The limited amount of direct subsurface information and the poor quality of available data, particularly regarding lithostratigraphic profiles of tubular wells, represent a challenge for understanding the geometry of the rocks in the study area. The quality of analyses, both of layer geometry and the potentiometric surface, is tied to the quantity of direct data obtained. Therefore, improving the quality of available data on lithostratigraphic profiles and drilling monitoring wells are measures that could enhance the quality of future studies with similar objectives to those proposed here.

Acknowledgements

Special thanks go to the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES), to Postgraduate Program in Geology of the Institute of Geosciences of the Federal University of Minas Gerais (PPGEOL/UFMG), to the Topography and Geodesy Laboratory (IGC/UFMG), to Mineiro Institute of Water Management (IGAM) (Instituto Mineiro de Gestão das Águas) and to the Americas Beverage Company (Ambev).

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, p. 285-295, 1977.
- ALVES, M. A. G.; GALVÃO, P.; ARANHA, P. Integrating geological mapping and geophysical analyses in Southern Espinhaço Range, eastern edge of the São Francisco Craton, Brazil. **Brazilian Journal of Geophysics**, [S.l.], v. 39, n. 1, p. 47-69, mar. 2021.
- ALKMIM F. F.; MARTINS-NETO, M. A. A Bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: C. P. Pinto, M. A. Martins-Neto (eds) **Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais**. SBG-MG, Belo Horizonte, 9-30.
- ALKMIM, F. F.; BRITO NEVES, B. B.; CASTRO ALVES, J. A. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco - uma revisão. In: SIMPÓSIO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2, 1993, Salvador. **Anais**. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, 1993. p. 45-62.
- ALKMIM, F. F. O que faz de um cráton um cráton? O cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO NEVES, B. B. (Org.). **Geologia do continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Editora Beca, 2004. p. 17-35.
- ALVES, M. A. G.; GALVÃO, P.; ARANHA, P. Integrating geological mapping and geophysical analyses in southern Espinhaço Range, eastern edge of the São Francisco Craton, Brazil. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 39, n. 1, p. 47-69, mar. 2021.
- ASSUNÇÃO, P. H. S. **Análise da zona de recarga e sua interação com o aquífero cárstico na lagoa do matadouro, zona urbana de sete lagoas: uma abordagem científica e socioambiental**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2019.
- AULER, A.; FARRANT, A. R. A brief introduction to karst and caves in Brazil. **Proceedings of the University of Bristol Speleological Society**, v. 20, p. 187-200, 1996.
- BONACCI, O. Surface Waters and groundwater in karst. In: STEVANOVIC, Z. (Ed.). **Characterization of karst aquifer**. Cham: Springer, 2015. p. 47-125.
- BAKALOWICZ, M. Karst groundwater: a challenge for new resources. **Hydrogeology Journal**, v. 13, p. 148-160, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0402-9>.
- BAGHZENDANI, H.; AGHAJANI, H.; KARAMI, G. H. Integrated geophysical methods for studying the karst system of Ravansar. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3824735/v1>, 2024.
- BENNETT, M.; HODGE, J. Three-dimensional geological modeling of karst aquifers: application to the Hinkley basin, California. **Journal of Hydrology**, v. 327, n. 1-2, p. 32-39, 2006.
- BRAGA, A. C. O. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: Uma abordagem**

metodológica e prática. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Tese de Livre-Docência, 2006. 126 p.

BRITISH COLUMBIA. Karst management handbook for British Columbia. Victoria: For. B.C. Min. For., 2003. Disponível em:
<<http://www.for.gov.bc.ca/hfp/fordev/karst/karstbmp.pdf>>.

CALCAGNO, P. et al. Geological modelling from field data and geological knowledge: Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v. 171, n. 1-4, p. 147-157, 2008.

ČALIĆ, J. **Uvala: contribution to the study of karst depressions (with selected examples from Dinarides and Carpatho-Balkanides).** Tese de Doutorado em Cárstica, Universidade de Nova Gorica, Eslovênia, 2009. 213 f.

ČALIĆ, J. Karstic uvala revisited: Toward a redefinition of the term. **Geomorphology**, v. 134, p. 32-42, 2011.

CARDOSO PEREIRA, G.; MORAIS, F. Geofísica aplicada ao estudo dos fluxos subsuperficiais no entorno da Lagoa da Confusão – TO. **Revista Geonorte**, v. 3, n. 5, p. 1475, 2012. Recuperado de: <<http://periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/2207>>. Acesso em: 05 mar. 2023.

CASTRO, D. L. de; CASTELO BRANCO, R. M. G. Caracterização da Arquitetura Interna das Bacias do Vale do Cariri (NE do Brasil) com base em Modelagem Gravimétrica 3-D. **Brazilian Journal of Geophysics**, [S.l.], v. 17, n. 2 e 3, p. 130-144, ago. 2018. ISSN 2764-8044. Disponível em: <https://www.sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/1384>. Acesso em: 28 de julho de 2024.

CAUMON, G.; COLLOM, P.; LE CARLIER DE VESLUD, C.; VISEUR, S.; SAUSSE, J. Surface-Based 3D Modeling of Geological Structures. **Mathematical Geosciences**, v. 41, p. 927-945, 2009. doi:10.1007/s11004-009-9244-2.

CECAV - CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. <<http://www.icmbio.gov.br/cecav/downloads>>, 2009. Acesso em: 21 mar. 2022.

CHILÈS, J.; AUG, C.; GUILLEN, A.; LEES, T. Modelling the Geometry of Geological Units and its Uncertainty in 3D From Structural Data: The Potential-Field Method. In: OREBODY MODELLING AND STRATEGIC MINE PLANNING, 14, 2004.

CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. Teófilo Otoni – Governador Valadares - Caratinga - Área 12: **Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos.** In: Levantamento Aerogeofísico De Minas Gerais - Programa 2008/2009, Texto Técnico. [s.l.]. CODEMIG/CPRM/Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2009. V.1. 159p.

COOK, P. G. **A guide to regional groundwater flow in fractured rock aquifers.** Entrada de catalogação em publicação da Biblioteca Nacional da Austrália. Henley Beach, South Australia, 5022, 2003. ISBN 1 74008 2338.

CORDANI, U. G. et al. Interpretação tectônica e petrológica de dados geocronológicos do embasamento no bordo sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 52, n. 4, p. 785-799, 1980.

COSTA, M. T.; BRANCO, J. J. R. Introdução. In: BRANCO, J. J. R. (Ed.). **Roteiro para a excursão Belo Horizonte – Brasília**. Anais, v. 15, p. 1-119, 1961.

COWAN, J. et al. **Practical Implicit Geological Modelling**. 5th International Mining Geology Conference, 2003.

CPRM. **Região de Sete Lagoas-Lagoa Santa. Informações básicas para a gestão territorial. Caracterização geomorfológica**. Belo Horizonte: CPRM, Série Cartas Temáticas (Volume 1), 1994. 41 p.

CPRM. **Projeto VIDA**: Mapeamento geológico da região de Sete lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais. 2. ed. Belo Horizonte, 2003. 54 p.

CPRM. **Atlas Aerogeofísico de Minas Gerais**. Brasília: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2021.

DANDERFER FILHO, A. Cartografia geológica dos municípios Sete Lagoas, Funilândia, Lagoa Santa, Pedro Leopoldo, Vespasiano, Capim Branco, Matozinhos e Prudente de Moraes – capítulo 6 – Geologia Estrutural. Projeto Vida. MMe – CPRM.

DARDENNE, M. A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, 1978, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 2, p. 597-610, 1978.

DENTITH, M.; MUDGE, S. T. **Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist**. Cambridge University Press, 2014. doi:10.1007/s00126-014-0557-9.

DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, p. 187-200, 1997.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3. ed. Fortaleza: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, Labhid-UFPE, 2008. 391 p.

FERES, W. M. L.; PANGELO, W.; POLETTI, W. Integrating geological mapping and geophysical analyses in southern Espinhaço Range, eastern edge of the São Francisco Craton, Brazil. **Brazilian Journal of Geophysics**, 39(1): 47–69, 2021.

FREEZE, A. R.; CHERRY, J. A. **Águas Subterrâneas**. São Paulo: Instituto Água Sustentável, 2017. 698 p.

FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. Karst geomorphology and hydrology. 2. ed. Chichester, West Sussex, England: Wiley & Sons, 2007. 578 p.

GALVÃO, P. H. F. **Modelo Hidrogeológico Conceitual de Sete Lagoas (MG) e Implicações Associadas ao Desenvolvimento Urbano em Regiões Cársticas**. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 2015. 124 p.

GALVÃO, P. et al. Geologic conceptual model of the municipality of Sete Lagoas (MG, Brazil) and the surroundings. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 88, p. 35-53, 2016.

GALVÃO, P.; HALIHAN, T.; HIRATA, R.; TERADA, R. Recharge sources and hydrochemical evolution of an urban karst aquifer, Sete Lagoas, MG, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, p. 159, 2017.

GALVÃO, P.; SCHUCH, C.; PEREIRA, S.; DE OLIVEIRA, J. M.; ASSUNÇÃO, P.; CONICELLI, B.; HALIHAN, T.; DE PAULA, R. Modeling the impact of groundwater pumping on karst geotechnical risks in Sete Lagoas (MG), Brazil. *Water*, v. 16, p. 1975, 2024. <https://doi.org/10.3390/w16141975>.

GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. **Methods in karst hydrogeology**. London: Taylor & Francis Group, 2007. 279 p.

GROSSI SAD, J. H.; QUADE, H. Revisão estratigráfica do Grupo Bambuí (Bloco Oriental), em Minas Gerais. In: Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 3, Belo Horizonte, 1985. **Anais...** Belo Horizonte, SBG-MG, p. 68-83, 1985.

GOMES, D. G. C. Projeto Atlas Aerogeofísicos dos Estados - **Atlas Aerogeofísico do Estado de Minas Gerais - Anomalia Bouguer**. Belo Horizonte: SGB-CPRM, 2022. 1 mapa colorido. Escala 1:1.000.000.

GUTIÉRREZ, F. et al. Geological modelling in karst areas: foundations for sustainable water resource management. *Environmental Research*, 2014.

HASSEN, I.; GIBSON, H.; HAMZAOU, F.; NEGRO, F.; RACHID, K.; BOUHLILA, R. Modelagem geológica 3D do sistema aquífero de Kasserine, Tunísia Central: Novas perspectivas sobre a geometria do aquífero e interconexões para uma melhor avaliação dos recursos hídricos. **Journal of Hydrology**, v. 539, p. 223-236, 2016. ISSN 0022-1694. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.034>. Acesso em: 28 jul. 2024.

HIRATA, R. et al. Estudo de águas subterrâneas. Instituto Trata Brasil, 2019. 35 p.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data. Vienna: IAEA, 2003.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/sete-lagoas/panorama>>. Acesso em: 18 set. 2022.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sete Lagoas. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/sete-lagoas.html>>.

ISLES, D. J.; RANKIN, L. R. **Geological Interpretation of Aeromagnetic Data**. Austrália: Australian Society of Exploration Geophysicists; CSIRO, 2013.

KAHN, M. A. Satellite contributions to geophysical exploration at sea. In: GYER, R. A. (Ed.). **CRC Handbook of Geophysical Exploration at Sea**. Boca Raton: CRC Press, 1983. p. 3-68.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration**. 3. ed. London: Wiley-Blackwell, 2002.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de exploração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 438 p.

KRANJC, A. Classification of closed depressions in carbonate karst. In: SHRODER, J.; FRUMKIN, A. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. San Diego (CA): Academic Press, 2013. p. 104-111 (Volume 6, Karst Geomorphology).

LAJAUNIE, C.; COURRIOUX, G.; MANUEL, L. Foliation fields and 3D cartography in geology: principles of a method based on potential interpolation. **Mathematical Geology**, v. 29, n. 4, p. 571-584, 1997.

LANDAU, E. C.; OLIVEIRA, R. P. C.; SANTOS, M. A.; GUIMARÃES, D. P. Expansão urbana da cidade de Sete Lagoas/MG entre 1949 e 2010. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, São José dos Campos: INPE, 2011.

LAROUSSE FRANÇA. Acessado em 13 nov. 2022. Disponível em: <www.larousse.fr/encyclopedie/divers>.

LEÃO, M. S. **Diagnóstico climático e estudos das variações termo-higrométricas do município de Sete Lagoas - MG**. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Dissertação de Mestrado, 2008. 150 p.

LUIZ, J. G.; SILVA, L. M. C. **Geofísica de Prospecção**. Belém: CEJUP, 1995. 311 p.

MAGNABOSCO, R. A. G. **Modelo Hidrogeológico Conceitual e Análise da Favorabilidade Hidrogeológica do Aquífero Cárstico na Região Urbana de Sete Lagoas - MG**. Programa de pós-graduação em evolução crustal e recursos naturais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 2019. 90 p.

MAGNABOSCO, R.; GALVÃO, P.; DE CARVALHO, A. M. An approach to map karst groundwater potentiality in an urban area, Sete Lagoas, Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, 2020. doi:10.1080/02626667.2020.1802031.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas**. Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, 2022. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>>. Acesso em: 09 jun. 2024.

MARGAT, J.; GUN, J. **Groundwater around the world, a geographic synopsis**. Nova York: Taylor & Francis Group, 2013. 341 p.

MCINERNEY, P. et al. Building 3D geological models directly from the data? A new approach applied to Broken Hill, Australia. **US Geological Survey Open-File Report**, v. 1428, p. 119-130, 2005.

MEJU, M. Geoelectrical characterization of covered landfill sites: a process-oriented model and investigative approach. **Applied Hydrogeophysics**, NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, v. 71, p. 319-341, 2006.

MINTY, B. R. S. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 39-50, 1997.

NUNES JÚNIOR, T. T. et al. Prestação dos Serviços de Água e Esgotos em Sete Lagoas – MG. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 12, n. 1, p. 119-139, 2010.

OLANIYAN, O. F. **Regional geophysical investigation of the Sudbury structure**. Tese de doutorado, Laurentian University, Sudbury, Ontario, Canada.

O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, J. D.; POHN, H. A. Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms. **Anais...** Geological Society of America, v. 87, n. 10, p. 1463-1469, 1976.

OLIVEIRA, D. V. de; BACELLAR, L. de A. P.; ARANHA, P. R. A. Caracterização de suscetibilidade ao colapso por análise estrutural e geofísica em área cárstica no município de Sete Lagoas - MG. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 43, n. 2, p. 98-108, set./mar. 2020. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/35931>. Acesso em: 24 mar. 2023.

ORELLANA, E. **Prospección geoelectrica en corriente contínua**. Ed. Paraninfo, 1972. 523 p.

PEÑARANDA, J. R. **Condicionamento estrutural e litológico da porosidade cárstica da Formação Sete Lagoas, Município de Sete Lagoas (MG)**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2016.

PESSOA, P. F. P. **Caracterização hidrogeológica da região cárstica de Sete Lagoas-MG: potencialidades e riscos**. Dissertação de Doutorado, Universidade de São Paulo, 1996.

PIRES, A. C. B.; HARTHILL, N. Statistical analysis of airborne gamma-ray data for geologic mapping purposes: Crixas-Itapaci area, Goiás, Brazil. **Geophysics**, v. 54, n. 10, p. 1326–32, 1989.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. 2. ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2011. 712 p.

SÁNCHEZ, L. E.; LOBO, H. A. S. **Guia de boas práticas ambientais na mineração de calcário em áreas cársticas**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Espeleologia, Campinas, 2016. 263 p.

SANTOS, D. F. M. **Dinâmica do uso e cobertura do solo nos municípios de Sete Lagoas e Prudente de Moraes – MG: Uma análise espacial do crescimento urbano**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. 58 p.

SCHUCH, C. S. **Influências urbana, industrial e climática na superexploração do aquífero cárstico no município de Sete Lagoas (MG)**. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

SCHUCH, C. S.; GALVÃO, P.; MELO, M. C.; PEREIRA, S. Overexploitation assessment in an urban karst aquifer: The case of Sete Lagoas (MG), Brazil. *Environmental Research*, v. 236, p. 116820, 2023.

SEATON, W. J.; BURBEY, T. J. Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrain. **Journal of Applied Geophysics**, v. 51, p. 21-41, 2002.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO – SAAE. Disponível em: <<http://www.saaesetelagoas.com.br/institucional/saae-em-numeros>>. Acesso em: 12 out. 2022.

SCHÖLL, W. U. Sedimentologia e Geoquímica do Grupo Bambuí na parte sudeste da Bacia do São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39, 1976, Ouro Preto. **Anais**. Ouro Preto: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 2, p. 207-231.

SILVA, A.B. Abatimento de solo na Cidade de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil. **Revista Água Subterrânea**, v. 12, p. 57-66, 1988.

TEIXEIRA, W. et al. Archean and Paleoproterozoic tectonic evolution of the São Francisco Craton, Brazil. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 101-137.

TELFORD, W. M. et al. **Applied Geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1976.

TELFORD, W. M. et al. **Applied Geophysics**. 2. ed. Cambridge University Press, 1990. 770p.

THORNTON, J. M., MARIETHOZ, G., BRUNNER, P. A 3D geological model of a structurally complex Alpine region as a basis for interdisciplinary research. **Nature Scientific Data**, v. 5, Article number: 180238, 2018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.238>.

TRAVASSOS, L. E. P. **Princípios de carstologia e geomorfologia cárstica**. Brasília: ICMBio, 2019. 242 p.

TULLER, M. P. et al. Projeto Sete Lagoas - Abaeté, estado de Minas Gerais, Brasil. 6 mapas geológicos, escala 1:100.000. **Programa Geologia do Brasil**, 2010. 160 p.

VIEIRA, L.; TRINDADE, R.; NOGUEIRA, A.; ADER, M. Identification of a Sturtian cap carbonate in the neoproterozoic Sete Lagoas carbonate platform, Bambuí Group, Brazil. **Comptes Rendus, Géosciences**, v. 339, p. 240-258, 2007.

WILFORD, J. R.; BIERWIRTH, P. N.; CRAIG, M. A. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, v. 17, n. 2, p. 201-216, 1997.

WILLIAMS, P. Dolines. In: GUNN, J. (Ed.). *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. London: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 304-310.