



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EVOLUÇÃO CRUSTAL
E RECURSOS NATURAIS**

Área de concentração: Geologia Ambiental e Recursos Naturais

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Influências urbana, industrial e climática na superexploração do aquífero cárstico
no município de Sete Lagoas (MG)**

por

Camila Santos Schuch

Orientador: Paulo Henrique Ferreira Galvão

Coorientador: Marília Carvalho de Melo

Ouro Preto, janeiro de 2022

**INFLUÊNCIAS URBANA, INDUSTRIAL E CLIMÁTICA NA
SUPEREXPLOTAÇÃO DO AQUÍFERO CÁRSTICO NO
MUNICÍPIO DE SETE LAGOAS (MG)**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof. Dra. Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação

Prof. Dra. Renata Guerra de Sá Cota

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. MSc. José Alberto Naves Cocota Junior

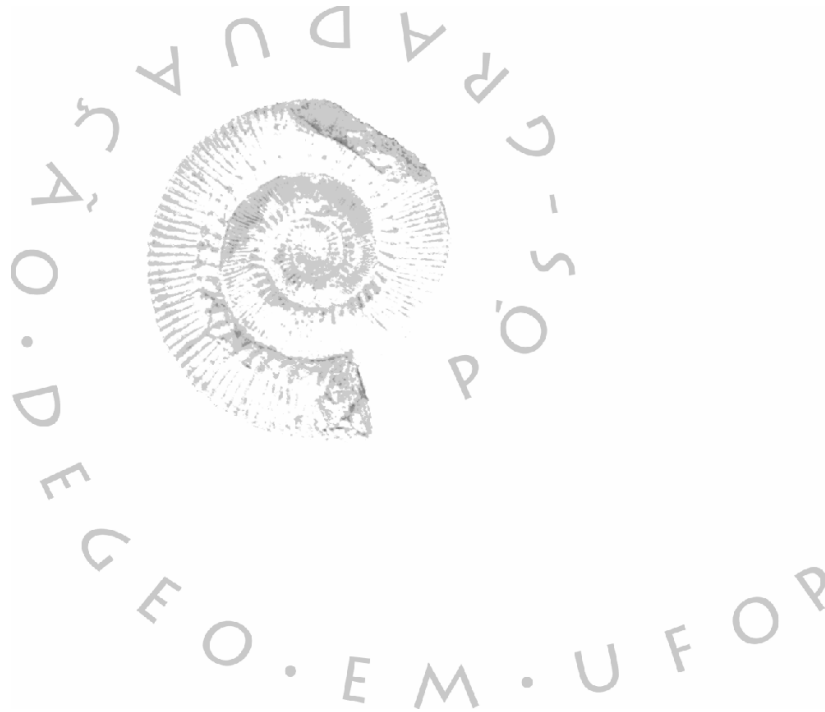
Vice-Diretor

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. MSc. Edson Tazava



EVOLUÇÃO CRUSTAL E RECURSOS NATURAIS

CONTRIBUIÇÕES ÀS CIÊNCIAS DA TERRA – VOL. 80

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nº 429

**INFLUÊNCIAS URBANA, INDUSTRIAL E CLIMÁTICA NA
SUPEREXPLOTAÇÃO DO AQUÍFERO CÁRSTICO
NO MUNICÍPIO DE SETE LAGOAS (MG)**

Camila Santos Schuch

Orientador

Paulo Henrique Ferreira Galvão

Coorientador

Marília Carvalho de Melo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais do Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito à obtenção do Título de Mestre em Ciências Naturais, Área de Concentração: Geologia Ambiental e Conservação de Recursos Naturais, Linha de Pesquisa: Hidrogeologia e Recursos Hídricos

OURO PRETO

2022

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>
Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606 e-mail: pgrad@degeo.ufop.br

Os direitos de tradução e reprodução reservados.
Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

ISSN 85-230-0108-6

Depósito Legal na Biblioteca

Nacional Edição 1ª

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S383i Schuch, Camila Santos.
Influências urbana, industrial e climática na superexploração do aquífero cárstico no município de Sete Lagoas (MG). [manuscrito] / Camila Santos Schuch. - 2022.
83 f.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Ferreira Galvão.

Coorientadora: Profa. Dra. Marília Carvalho de Melo.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais.

Área de Concentração: Geologia Ambiental e Conservação de Recursos Naturais - Garn.

1. Hidrogeologia. 2. Recursos hídricos. 3. Aquíferos. 4. Carste. I. Galvão, Paulo Henrique Ferreira. II. Melo, Marília Carvalho de. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 556.33(815.1)

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

<http://www.sisbin.ufop.br>



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
COORDENACAO DO PROGRAMA DE POS-GRADUACAO
EM EVOLUCAO CRUSTAL



FOLHA DE APROVAÇÃO

Camila Santos Schuch

Influências urbana, industrial e climática na superexploração do aquífero cárstico no município de Sete Lagoas (MG)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ciências Naturais.

Aprovada em 25 de janeiro de 2022.

Membros da banca

Prof. Dr. Paulo Henrique Ferreira Galvão - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Ricardo Hirata - Universidade de São Paulo

O Prof. Dr. Paulo Henrique Ferreira Galvão, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 25/02/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Glauca Nascimento Queiroga, COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EVOLUÇÃO CRUSTAL E RECURSOS NATURAIS**, em 07/03/2022, às 16:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0288336** e o código CRC **1EAEFCA8**.

Dedicatória

Esta dissertação é dedicada aos meus pais, irmã e amigos que sempre me apoiaram durante todo período difícil de desenvolvimento deste trabalho.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a Deus por ter mantido minha resiliência durante os tempos sombrios de pandemia. Agradeço aos meus pais Sonja e Edmur por todo suporte e amor. À minha irmã Nathalia pelo companheirismo. E à minha família pelo carinho e atenção.

Aos envolvidos diretamente com esse trabalho meu muito obrigado. Em especial ao Paulo Galvão, professor, orientador e amigo, que soube dosar muito bem quando cobrar e quando “dar um tempo”, acreditando em mim até quando eu mesma não sabia se seria capaz. À minha coorientadora Marília Carvalho de Melo, que mesmo em meio a uma vida super atribuída de compromissos importantes, sempre teve um tempinho para mim. E aos outros “filhos do Galvão” que me deram apoio de alguma forma: Tássia Marques, Pedro Assunção, Simone Pereira, Felipe Costa, Rafael Magnabosco e Michele Alves.

Aos meus amigos por terem me apoiado, pois não foi uma jornada fácil. Em especial Tatiana, Ludymilla, Elisângela, Bruna, Ana Carolina, Sereno, Guto, Letícia, Mariana, Carolina e Erick. Muito obrigada pelo suporte emocional que se fez tão necessário.

À CAPES pelo apoio financeiro de fundamental importância para que seja possível ter a dedicação necessária durante o período do mestrado.

Ao Programa de Evolução Crustal e Recursos Naturais, ao Departamento de Geologia, à Escola de Minas e à Universidade Federal de Ouro Preto, por proporcionar um ensino público superior de qualidade.

Sumário

AGRADECIMENTOS	xi
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xv
LISTA DE TABELAS	xvii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xxi
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1 - Apresentação.....	1
1.2 - Objetivos	3
CAPÍTULO 2. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	5
2.1 – Localização e Acessos.....	5
2.2 - Contexto Geológico	5
2.2.1 – Geologia Regional.....	5
2.2.2 – Geologia Local	10
2.2.3 –Geotectônica e Geologia Estrutural.....	14
2.3 - Contexto Hidrogeológico.....	15
2.4 - Aspectos Fisiográficos	20
2.5 – Contexto da Gestão de Água.....	25
2.6 – Riscos da Superexploração.....	27
CAPÍTULO 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
3.1 – Hidrogeologia Cárstica.....	31
3.2 – Cálculo de Recarga.....	36
3.3 – Superexploração	37
3.4 – Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos.....	39
CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1 – Levantamento Bibliográfico e Compilação de Dados.....	44
4.2 – Confecção de Mapas e Tratamento de Dados	45
4.2.1 – Análise climatológica e balanço hídrico	45
4.2.2 – Avaliação temporal da evolução urbana e de bombeamento	46
4.2.3 – Análise das superfícies potenciométricas representativas	47
4.2.4 – Cálculo de poços clandestinos.....	48
4.2.5 – Avaliação e cálculo da recarga.....	48
4.3 – Análise da Evolução da Exploração e Elaboração de Sugestões de Gestão.....	49
CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1 – Introdução	51
5.2 – Área de Estudo	52
5.3 – Materiais e Métodos	55
5.3.1 – Análise climatológica e balanço hídrico	55

5.3.2 – Avaliação temporal da evolução urbana e de bombeamento	55
5.3.3 – Análise das superfícies potenciométricas representativas	56
5.3.4 – Cálculo de poços clandestinos.....	57
5.3.5 – Avaliação e cálculo da recarga.....	57
5.4 – Resultados	58
5.4.1 – Climatologia e balanço.....	58
5.4.2 – Evolução urbana e distribuição de bombeamento	60
5.4.3 – Evolução representativa das superfícies potenciométricas.....	61
5.4.4 – Estimativa de clandestinidade	63
5.4.5 – Mapa de recarga	63
5.5 – Discussão.....	66
5.5.1 – Evolução da exploração.....	66
5.5.2 – Gestão do recurso hídrico.....	70
5.6 – Conclusões	72
CAPÍTULO 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
Referências.....	78

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 – Geologia simplificada do Cráton do São Francisco (Alkmim <i>et al.</i> 1993).....	6
Figura 2.2 – Coluna estratigráfica simplificada da Bacia Intracratônica do São Francisco, mostrando as principais unidades de preenchimento, com destaque para o Grupo Bambuí (Alkmim & Martins-Neto 2001)	8
Figura 2.3 – Coluna estratigráfica do Grupo Bambuí, com destaque para as Formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena (Martins-Neto & Alkmim 2001).....	9
Figura 2.4 – Coluna estratigráfica da área de estudo (adaptado de Tuller <i>et al.</i> 1992).....	10
Figura 2.5 – Geologia do município de Sete Lagoas (Galvão 2015).	11
Figura 2.6 - Divisão dos domínios estruturais. Sete Lagoas encontra-se em destaque no domínio intermediário com deformação moderada a fraca (Ribeiro <i>et al.</i> 2003).	15
Figura 2.7 - Modelo conceitual representativo dos tipos aquíferos existentes no município de Sete lagoas e suas características geológicas, hidrológicas e hidrodinâmicas, além do mapa de superfície potenciométrica com as direções do fluxo subterrâneo e condições de contorno, referente ao aquífero cárstico (Galvão 2015).	17
Figura 2.8 – Balanço hídrico para o município de Sete Lagoas segundo Pessoa (1996) e Galvão (2015).	18
Figura 2.9 – Superfícies potenciométricas e linhas de fluxo do Aquífero Cárstico Sete Lagoas e do Embasamento em época de estiagem, na região central urbana (Gomes <i>et al.</i> 2018).....	19
Figura 2.10 – Médias mensais de precipitação e temperatura de Sete Lagos obtidas de normais climatológicas de 1961 a 1990, da Estação Meteorológica de Sete Lagoas (INMET) (Assunção 2019).	21
Figura 2.11 – Balanço hídrico de Sete Lagoas, utilizando dados provenientes de normais climatológicas de 45 anos (1960 a 2005) (Gomide <i>et al.</i> 2006).....	21
Figura 2.12 – Gráfico da evolução populacional rural e urbana de Sete Lagoas, segundo dados do IBGE e Prefeitura Municipal de Sete Lagoas (Adaptado de Botelho 2008).	23
Figura 2.13 – Uso e ocupação do solo da região central urbana de Sete Lagoas (Magnabosco 2019)....	25
Figura 2.14 - Distribuição dos poços públicos (SAAE) e privados, em Sete Lagoas (Magnabosco, 2019).	27
Figura 2.15 – Risco geotécnico para o carste de Sete Lagoas, mostrando a localização de sumidouros e dos colapsos de solo induzidos (modificado de Galvão <i>et al.</i> 2015).	30
Figura 3.1 – Paisagem cárstica e algumas feições típicas (adaptado de Enciclopédia Larousse, acesso em 14/01/2020)	31
Figura 3.2 – Processo de carstificação (adaptado de Teixeira <i>et al.</i> 2003).....	32
Figura 3.3 – Modelo conceitual para um aquífero cárstico (adaptado de White 2013)	33
Figura 3.4 - Ilustração esquemática de um aquífero cárstico e as dualidades de recarga (alogenica e autogênica) e infiltração (difusa e pontual) (modificado de Goldscheider & Drew 2007).	34
Figura 3.5 – Cadastro de uso insignificante do Estado de Minas Gerais, com destaque para bacia hidrográfica do rio Paraopeba (SF3), ao qual o município de Sete Lagoas está inserido (IGAM 2020).	43
Figura 4.1 – Fluxograma dos métodos utilizados no estudo.	44
Figura 5.1 - Município de Sete Lagoas, Brasil, destacando a sub-bacia estudada (limites em vermelho), os limites urbano central e industrial nordeste (linha preta), os poços tubulares (pontos vermelhos), bem como as lagoas e a geologia (modificado de Galvão <i>et al.</i> , 2016).	54
Figura 5.2 - Distribuições das linhas de tendências e evoluções de valores médios de precipitação (PRE, mm) e temperatura (T, °C) (a), e de déficit hídrico (WD, mm), excedente hídrico (WE, mm) e armazenamento hídrico (ΔS , mm) (b). Ambos os gráficos com dados referentes ao período de 1961 a 2020, organizados em dois grupos (1961-1982 e 1993-2020).	60
Figura 5.3 - (a) Evoluções urbana e de taxas de bombeamento, (b) superfícies potenciométricas, e (c) diferenças de cargas hidráulicas. Todos os mapas, representativos entre as décadas 1980-2020, foram gerados via dados acumulados durante a década indicada.	62
Figura 5.4 - Critérios usados pelo método APLIS e recarga da sub-bacia de estudo.	65
Figura 5.5 - Evolução da exploração subterrânea associada a marcos históricos ligados ao quadro de superexploração de Sete Lagoas.	69
Figura 5.6 - Seção hidrogeológica esquemática com superfícies de nível de água representativas das décadas de 1980 e 2020.	70

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Parâmetros hidráulicos nas escalas matriz, poço e regional do Aquífero Cárstico Sete Lagoas (Galvão 2015).	20
Tabela 2.2 – Parâmetros hidráulicos para as unidades hidrogeológicas do município de Sete Lagoas (Pessoa 1996).	20
Tabela 3.1 - Pesos dos parâmetros usados no método APLIS para mapa de recarga (Magnabosco <i>et al.</i> 2020).	37
Tabela 5.1 - Sugestões de gestão hídrica para Sete Lagoas.	71

Resumo

Aquíferos cársticos, quando explorados intensivamente, podem ter como consequência efeitos adversos diretos, como subsidência de terrenos, secas de nascentes e lagoas, e contaminação de água, e indiretos, como problemas ambientais, e instabilidades socioeconômica e política. No município de Sete Lagoas (MG), esses efeitos relacionados à exploração intensiva são observados há anos, e muitos deles estão se intensificando. O objetivo deste mestrado é analisar a influência das variações urbana, industrial e climática no comportamento do aquífero cárstico durante os últimos 40 anos (1980-2020) para confirmar se há superexploração do aquífero, e desde quando essas influências atuam. Por meio da análise de dados de órgãos públicos e de trabalhos acadêmicos, foi determinado que o município explora, via poços tubulares, volumes acima da recarga média do aquífero desde a década de 2000. A partir da década de 1980, houve um aumento considerável de poços, muitos deles localizados desordenadamente no município, devido às expansões urbana e industrial que resulta em um aumento na demanda hídrica. Esses poços estão concentrados em duas regiões (central urbana e polo industrial) onde há cones de rebaixamento com áreas de influência quilométricas (29 km² e 77 km², respectivamente), alterando o comportamento do aquífero de confinado para livre nessas localidades. Nessas regiões também concentram as subsidências de terrenos, além da diminuição ou secamento de lagoas (e.g. Grande, do Matadouro e Paulino). Dados referentes à última década indicam que a exploração via poços tubulares (73,9 Mm³/ano) já excedeu a recarga máxima do aquífero de 72,4 Mm³/ano. A partir de dados do censo demográfico, foi estimada a clandestinidade no município, que equivale a cerca de 67% dos poços, estes sem nenhum tipo de informação ou controle de uso. A recarga média do aquífero (56,1 Mm³/ano) corresponde a 12% da precipitação média da região. As tendências climatológicas de diminuição da pluviometria e aumento da temperatura indicam a probabilidade de recargas menores do aquífero. Áreas com taxa de recarga muito baixa (1-5%) equivalem a 77% do território, enquanto 17% possui taxas altas ou muito altas (35-75%). Considerando-se esses fatos, Sete Lagoas enfrenta um estado de superexploração do aquífero cárstico e que pode se agravar futuramente.

Palavras-chave: Hidrogeologia cárstica; Gestão de recursos hídricos; Superexploração; Recarga do aquífero; Variação climática.

Abstract

Karst aquifers, once intensively exploited, might cause direct adverse effects, such as land subsidence, springs and lakes droughts, water contamination, and indirect ones, such as environmental, socioeconomic and political instabilities. In the municipality of Sete Lagoas, the effects of such exploitation have been observed for years, many of them having even intensified over time. Therefore, this master's degree project aims to analyze the urban, industrial, climatological and behavioral evolution of the aquifer during the last 40 years (1980-2020), to recognize if the aquifer is being overexploited, the influential factors to its possible overexploitation and for how long they have been active. By reworking existing data from public agencies and previous academic works, it was determined that the municipality has been exploiting, via tubular wells, volumes above the average aquifer recharge since the 2000s. From the 1980s forward, there has been an addition in wells - often constructed in a disorderly manner - as result of urban and industrial expansion that increased water demand. These wells are mainly found in two regions (central urban and industrial areas), where there have been developed cones of depression with kilometric areas of influence (29 km² and 77 km², respectively), altering the aquifer's condition from confined to unconfined in such areas. These regions also concentrate the occurrence of geotechnical issues of land subsidence and collapse, in addition to lakes decrease/drought and contamination (e.g. Grande, Matadouro and Paulino). Data referring to the last decade indicate that exploitation via tubular wells (73.9 Mm³/year) has already exceeded the aquifer's maximum recharge of 72.4 Mm³/year. From the demographic census, it was estimated the well's clandestinity in the municipality, equivalent to approximately 67%, these presenting no data collection or control over their use. Average recharge for the aquifer (56.1 Mm³/year) represents 12% of the region's mean annual precipitation. Climatological tendencies of decreasing rainfall and increasing temperature values could indicate lower recharges rates for the aquifer. Areas with a very-low infiltration rate (1-5%) comprise 77% of the area, while only 17% present high or very-high rates (35-75%). Considering all these factors, Sete Lagoas is currently facing an overexploitation status for the karst aquifer that could even worsen with time.

Keywords: Karst hydrogeology; Water resources management; Overexploitation; Aquifer recharge; Climate variation.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - APRESENTAÇÃO

Aquíferos cársticos se desenvolvem em rochas solúveis, como calcários, dolomitos e mármore, e abastecem cerca de 20-25% da população global, dependendo em grande parte ou inteiramente das águas subterrâneas reservadas nesses aquíferos (Ford & Williams 2007). A crescente demanda por água em regiões cársticas pode gerar reações adversas, como restrições no abastecimento, maior susceptibilidade à contaminação do aquífero, problemas geotécnicos relacionados à subsidência ou colapso do solo e redução dos volumes dos cursos de água superficial (ANA 2018). Essas consequências aumentam consideravelmente nos períodos de estiagem, já que a maioria dos sistemas cársticos se recarrega a partir de águas meteóricas que circulam em profundidades rasas e com tempos de residência curtos no subsolo (Ford & Williams 2007). Para que os riscos sejam minimizados, a gestão e o desenvolvimento de cidades situadas sobre rochas carstificadas devem ser diferenciados.

Em casos mais extremos, é possível considerar que uma região passa por um quadro de superexploração. O termo “superexploração” não é muito bem definido no meio acadêmico, porém todos concordam que ele ocorre quando a exploração de água subterrânea gera mais malefícios do que benefícios. E isto geralmente ocorre quando, por anos, a quantidade de água retirada do aquífero excede sua recarga pluriannual, gerando uma queda contínua do nível piezométrico, causando impactos negativos (físicos, biológicos, sociais etc.), onde o equilíbrio original dificilmente poderá ser reestabelecido (Pulido 2001, Rodríguez-Estrella 2004).

Aquíferos cársticos superexplorados podem resultar em declínio do lençol freático, aumento nos custos de bombeamento, abandono de poços, diminuição das reservas subterrâneas, compartimentalização do aquífero, mudanças nas características físicas e químicas da água, secamento de nascentes, salinização e compactação de solos, impactos sobre a fauna e flora e modificação do clima local. A maioria dessas consequências já foram constatadas em algumas cidades do México e da Espanha (Esteller & Diaz-Delgado 2002, Rodríguez-Estrella 2012). Porém, esses estudos indicam que, por meio de algumas medidas, pode-se mitigar/recuperar os danos causados pela superexploração, como a delimitação de perímetro de proteção de poço, criação de uma rede de monitoramento de qualidade da água via piezômetros, limitações e mudanças de taxas de bombeamento, recarga artificial do aquífero e restauração de áreas úmidas com águas residuais tratadas.

No Brasil, algumas regiões também podem passar por um quadro de superexploração. Cidades como Ribeirão Preto, São José do Rio Preto, Recife e Sete Lagoas apresentaram ao menos um dos problemas a seguir: subsidência de terrenos, aumento do custo de bombeamento devido à diminuição dos

níveis do aquífero, diminuição dos corpos d'água superficiais e contaminação salina induzida por bombeamento (DAEE 2012, Cary *et al.* 2013, Simonato 2012, Galvão *et al.* 2015, Geowater 2017, Petelet-Giraud *et al.* 2017).

O município de Sete Lagoas, área de estudo dessa pesquisa, localizada à noroeste da capital mineira Belo Horizonte, está em um momento crítico quanto ao serviço de fornecimento de água, principalmente em épocas de estiagem (Gomes *et al.* 2018). A água necessária para as atividades do município provém prioritariamente do Sistema Aquífero Cárstico Sete Lagoas (Galvão *et al.* 2015) existente na região, sendo outra parcela de um terço abastecida pelo rio das Velhas. Porém, o rápido crescimento econômico e populacional nas últimas décadas aumentou a demanda de água, e sua exploração pode ter excedido a capacidade de recarga do aquífero, resultando em um quadro de superexploração.

Geologicamente, a região está inserida no setor ocidental do Cráton São Francisco. As unidades presentes na região denotam do Paleoarqueano (Complexo Belo Horizonte), Neoproterozoico (Grupo Bambuí) e coberturas sedimentares inconsolidadas Fanerozoicas. O Grupo Bambuí é a supersequência superior aflorante da Bacia do São Francisco, sendo esta uma bacia sedimentar intracratônica delimitada por faixas dobradas também do Proterozoico (Faixas Araçuaí, Brasília, Rio Preto, Riacho do Pontal e Sergipana) e situada na parte central mais estável do cráton. A unidade neoproterozoica é composta por alternâncias de carbonatos de rampas plataformais homoclinais (formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré) e folhelhos (Formação Serra de Santa Helena) (Zalán & Silva 2012).

No município, há dois tipos de aquíferos: fraturado, situado no embasamento cristalino (Complexo Belo Horizonte), composto por gnaisses, migmatitos e intrusões máficas, hidricamente pouco produtivo; e o cárstico, de alta produção hídrica, que se desenvolveu a partir da dissolução das rochas pelito-carbonáticas da Formação Sete Lagoas, principalmente em seus planos de acamamento (Vieira *et al.* 2007). Sobreposto, tem-se os metapelitos da Formação Serra de Santa Helena, considerada um aquífero/aquicludo. Em determinadas regiões, também é comum sedimentos inconsolidados cenozoicos, considerado como um aquífero poroso (Galvão *et al.* 2015).

Em Sete Lagoas o sistema de abastecimento de água está sobrecarregado. O aquífero cárstico que anteriormente supria todas as necessidades da população, agora não é mais suficiente. É possível perceber alguns efeitos colaterais, como algumas lagoas que passaram de perenes para intermitentes no período de estiagem (Assunção 2019); dutos cársticos totalmente em zonas não saturadas, devido ao grande cone de rebaixamento gerado pela concentração de poços de altas vazões, principalmente na região central urbana do município; e problemas estruturais gerados pelo abatimento do solo (Galvão *et al.* 2015). Foi estimado, em 2014, por uma Comissão Especial da Câmara Municipal de Sete Lagoas, que cerca de 60% da água consumida no município é decorrente do uso industrial. Em um levantamento preliminar, foi constatado que atualmente o município possui um número superior a 300 poços ativos e regularizados. Poços com

altas taxas de bombeamento visando um maior volume de exploração, quando operacionalizados indiscriminadamente, sem monitoramento, podem agravar a crise hídrica na cidade. Se os níveis piezométricos continuarem a diminuir, mais consequências negativas irão acontecer, como o aumento do custo da água, mais casos de subsidências e colapsos, diminuição das lagoas características da cidade e o agravamento do racionamento de água.

Devido a esses fatos, uma melhor gestão dos recursos hídricos em Sete Lagoas é necessária. Assim, deve-se avaliar a demanda de água subterrânea e os impactos da sua extração no aquífero, possibilitando tomadas de decisão mais assertivas. Portanto, algumas questões devem antes ser respondidas para nortear os próximos passos futuros, visando o controle e reversão do possível quadro de superexploração: Sete Lagoas realmente passa por um cenário de superexploração do aquífero cárstico? Se sim, quais fatores levaram a esse cenário? qual o principal agente potencializador desse quadro: indústria, população, ambos, ou há algum fator climático? quais medidas podem ser tomadas para amenizar/reverter o quadro de superexploração?

1.2 - OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é definir se Sete Lagoas enfrenta um cenário de superexploração de seu aquífero cárstico, via estudos comparativos entre dados sobre variação do uso e ocupação do solo, evolução da superfície potenciométrica ao longo de décadas, e modelo hidrogeológico conceitual associado a dados do aquífero e de produção dos poços. Determinar quando e quais fatores levaram a essa situação: clima, indústria e/ou população. E propor direcionamentos para um melhor gerenciamento hídrico, que amenize e/ou reverta a crise de fornecimento de água da região. Os objetivos específicos são:

- Determinar a evolução da superfície potenciométrica ao longo de quatro décadas (1980-2020), a fim de estabelecer uma cronologia entre os cones de rebaixamento e o aumento dos poços.
- Analisar a variação do uso e ocupação do solo, com o objetivo de visualizar o crescimento industrial e demográfico da região.
- Verificar possíveis mudanças climáticas ao longo das décadas a partir da avaliação de precipitação e temperatura.
- Analisar o balanço hídrico climatológico, a fim de visualizar tendências em relação ao armazenamento, déficit e excedente hídricos.
- Estimar a quantidade de poços clandestinos, não cadastrados em órgãos regulatórios.
- Avaliar a recarga do aquífero quantitativamente (calculando o volume de recarga) e espacialmente (definindo áreas de acordo com sua taxa de recarga).
- Estabelecer relações temporais, espaciais e quantitativas entre marcos históricos, exploração via poços tubulares e recarga do aquífero.

CAPÍTULO 2

CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 – LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

Localizada a cerca de 70 km a noroeste da capital Belo Horizonte, o município de Sete Lagoas ocupa aproximadamente 537 km² da região central do estado de Minas Gerais, Brasil, e tem uma população estimada de 242 mil habitantes (IBGE 2020).

O município pode ser acessado, partindo da capital, via duas rotas: através da rodovia BR-040, sentido Brasília-DF; ou pela rodovia MG-424 passando pelos municípios de Santa Luzia, Vespasiano, Pedro Leopoldo, Matozinhos e Prudente de Moraes.

2.2 - CONTEXTO GEOLÓGICO

2.2.1 – Geologia Regional

Cráton e Bacia do São Francisco

O município de Sete Lagoas está inserido no contexto geológico do Cráton São Francisco, situado em sua maior parte nos estados da Bahia e Minas Gerais (Cordani & Brito Neves 1982, Hasui 2012). O cráton se estabeleceu durante o neoproterozoico, estabilizando-se ao fim do ciclo transamazônico (Almeida 1977), mas sua individualização só ocorre como resultado dos eventos distensionais Espinhaço e Macaúbas, ocorridos durante o estateriano e toniano, respectivamente (Alkmim 2004). As faixas móveis Sergipana e Riacho do Pontal (ao norte), Rio Preto (à noroeste), Brasília (ao oeste e sul) e Araçuaí (à sudeste), resultantes do evento orogênico brasileiro, e as bacias do Camamú-Almada e Jacuípe (à leste), presentes na margem continental, definem os limites do cráton (Almeida 1977, Chang *et al.* 1992, Alkmim 2004, Heilbron *et al.* 2017) (Figura 2.1).

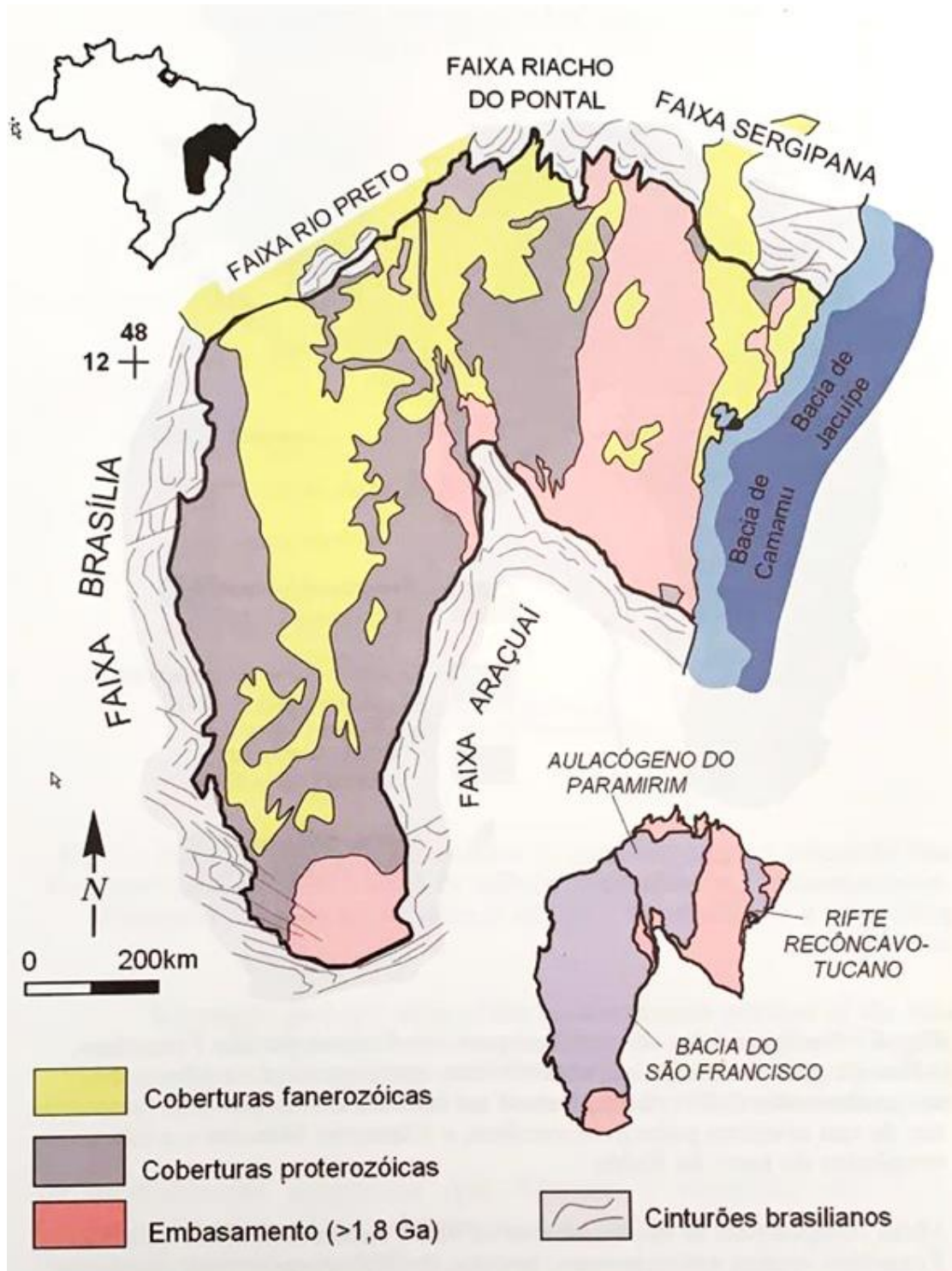


Figura 2.1 – Geologia simplificada do Cráton do São Francisco (Alkmim *et al.* 1993)

Além do embasamento composto por rochas e feições mais velhas que 1,8 Ga, encontra-se no interior do cráton coberturas pré-cambrianas e fanerozóicas que se distribuem em 3 grandes áreas morfotectônicas: Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá, Aulacógeno do Paramirim e Bacia do São Francisco (Figura 2.1).

A nordeste do cráton, o Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá tem relação com um rifteamento

abortado proveniente do sistema de riftes originados pelos primeiros movimentos de ruptura do paleocontinente Gondwana Ocidental e abertura do Atlântico Sul, e nele se encontram os depósitos sedimentares das fases pré-rifte (formações Aliança e Sergi), sin-rifte (formações Salvador e Candeias e Grupo Ilhas) e pós-rifte (formações Marizal e Barreiras), com os principais depocentros ultrapassando 10 km de espessura média (Silva 2013, Gordon *et al.* 2017).

O Aulacógeno do Paramirim está localizado ao norte do cráton, no estado da Bahia, entre o Espinhaço e a Chapada Diamantina. Os sedimentos e rochas vulcânicas que preenchem a bacia estão distribuídas em duas grandes unidades referentes às suas principais fases rifte de subsidência: os Supergrupos Espinhaço e São Francisco (Alkmim 2004, Cruz & Alkmim 2017).

Ocupando quase toda a parte do Cráton São Francisco, que tem orientação N-S, a Bacia do São Francisco abrange cerca de 350.000 km² de área, estando presente principalmente nos estados de Minas Gerais e Bahia, além de Goiás, Tocantins e Distrito Federal. A bacia só diferencia seus limites quanto ao cráton, ao sul (limite erosivo) e a nordeste (Corredor do Paramirim), coincidindo a leste (Faixa Araçuaí), oeste (Faixa Brasília) e norte (Faixa Rio Preto). Trata-se de uma bacia intracratônica pouco deformada na parte central, aumentando o grau de deformação em sentido às suas bordas de faixas móveis compressivas a oeste e leste. A sucessão de depósitos sedimentares pode ser dividida em 3 grandes unidades, os Supergrupos Espinhaço (paleo/mesoproterozoico) e São Francisco (neoproterozoico), e o Grupo Santa Fé (permo-carbonífero), além de mais 3 grupos menores do cretáceo, o Areado, Mata da Corda e Urucaia (Figura 2.2). Tais unidades se separam por grandes lacunas, evidenciando o caráter policíclico da bacia, que reflete os eventos tectônicos e climáticos atuantes na litosfera do Cráton São Francisco-Congo após a era paleoproterozóica (Alkmim 2004; Zalán & Silva 2012; Reis *et al.* 2017).

O Supergrupo São Francisco, unidade de maior expressão areal da bacia (Alkmim 2004), é formado pelos grupos Macaúbas (bacia tipo rifte) e Bambuí (bacia de antepaís). Segundo Zalán & Silva (2012), o Grupo Macaúbas tem “composição extremamente variada, onde podem ser encontrados vários níveis de carbonatos estromatolíticos diversos, arenitos marinhos e eólicos, conglomerados e diamictitos (Formação Jequitai)”, compreendendo uma unidade glacial basal. Cobrindo os depósitos glaciais tem-se o Grupo Bambuí, formado por rochas carbonáticas, pelitos, conglomerados e arenitos, que grava em suas unidades litológicas a história de uma transgressão marinha generalizada (Martins-Neto & Alkmim 2001, Alkmim 2004). Dentre essas unidades está a unidade em que se desenvolveu o aquífero foco deste trabalho, por isso o aprofundamento maior no desenvolvimento do Grupo Bambuí.

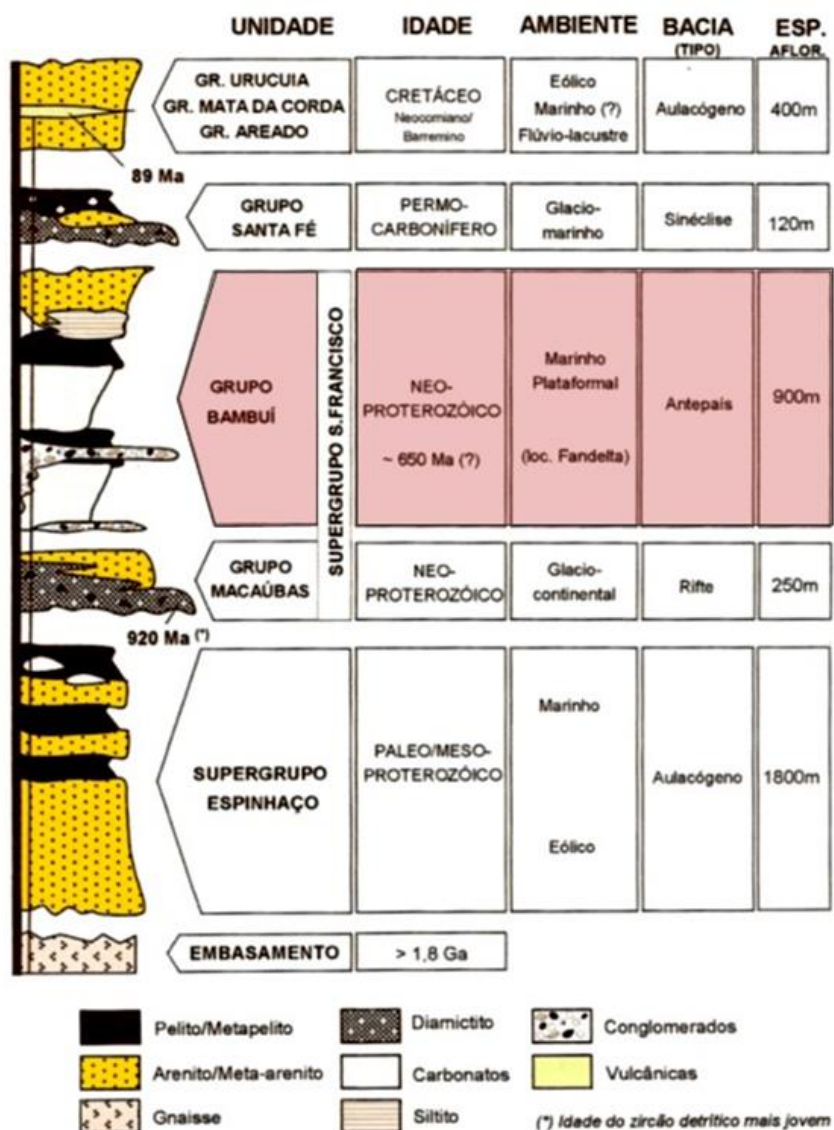


Figura 2.2 – Coluna estratigráfica simplificada da Bacia Intracratônica do São Francisco, mostrando as principais unidades de preenchimento, com destaque para o Grupo Bambuí (Alkmim & Martins-Neto 2001)

Grupo Bambuí

Abrangendo principalmente os estados de Minas Gerais, Goiás e Bahia, o Grupo Bambuí ocupa cerca de 300.000 km², constitui a cobertura neoproterozoica (750-600 Ma) de maior distribuição no Cráton do São Francisco e é a principal unidade de preenchimento da Bacia do São Francisco (Almeida 1977, Iglesias & Uhlein 2009, Alkmim & Martins Neto 2012, Galvão *et al.* 2016). Suas rochas são estudadas desde 1817, quando Eschwege nomeou como “*Übergangsgebirge*” rochas carbonáticas e ardósianas aflorantes a oeste do Rio São Francisco (Costa & Branco 1961, Martinez 2007). Somente em 1917 o nome “Bambuí” foi utilizado por Rimann para um grupo de sedimentos pelíticos e carbonáticos descritos na região de Bambuí – MG, mas ainda definidos como Série; e em 1967, Almeida elevou a unidade à categoria de Grupo. Durante os anos seguintes, a coluna estratigráfica do Grupo Bambuí sofreu

diversas modificações, onde unidades foram introduzidas e retiradas por diversos autores. A divisão adotada neste trabalho seguirá a proposta do Projeto RADAMBRASIL (1982), baseada na divisão feita por Costa e Branco (1961), Dardenne (1978) e Couto e Bez (1981), onde, da base para o topo, tem-se as seguintes formações: Carrancas, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias (Figura 2.3).

As unidades formadoras do Grupo Bambuí representam uma sequência de antepaís, constituída por duas sucessões principais basal e de topo, resultantes do comportamento flexural que o interior do cráton teve como resposta à sobrecarga gerada pelos cinturões orogênicos brasileiros (Martins-Neto & Alkmim 2001). Inicialmente, os sedimentos são interpretados como de ambiente marinho com interdigitação de rampas carbonáticas proximais e pelitos de fácies distais (em relação às bordas da bacia), referindo-se às formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade, inicialmente, com características de ambientes calmos, rasos, contínuos de baixo gradiente. As formações Serra da Saudade e, principalmente, Três Marias adicionam sedimentos marinho-continentais clásticos grosseiros, indicando deposição molássica, derivada da erosão das placas que cavalgaram as bordas da bacia resultantes da orogênese brasileira (Zalán & Silva 2007, Iglesias & Uhlein 2009).

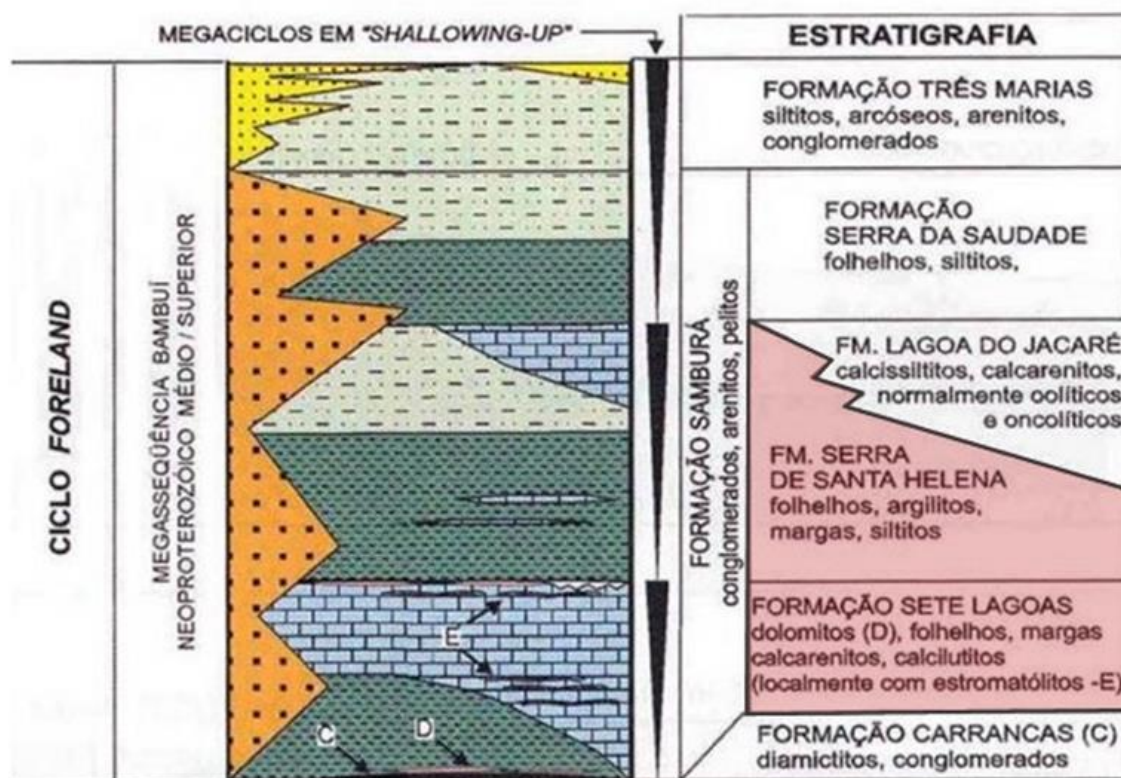


Figura 2.3 – Coluna estratigráfica do Grupo Bambuí, com destaque para as Formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena (Martins-Neto & Alkmim 2001)

2.2.2 – Geologia Local

No município de Sete Lagoas, ocorrem afloramentos compostos pelo embasamento cristalino arqueano do Complexo Belo Horizonte, rochas pelito-carbonáticas neoproterozoicas das formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena e sedimentos inconsolidados cenozoicos (Figura 2.4).


Super-grupo	Grupo	Formação	Membro	Idade (Ma)	Espessura (m)	Local Tipo	Coluna Estratigráfica	Litologia	Ambiente Depositional
São Francisco	Bambuí	Serra de Santa Helena		600	0 - 40	Serra de Santa Helena		Aluviões com areias de granulometria variada e cascalhos.	
					0 - 30			Cobertura detrítica areno-argilosa com camadas lateríticas delgadas.	
		Sete Lagoas	Lagoa Santa	800	80	Pedreira de Carvão	Metacalcissiltitos em camadas tabulares de espessura média a espessa, coloração de cinza claro azulado e esverdeado, com intercalações, de camadas muito finas a delgadas de metargilitos. Limitos algálicos.	Marinho, plataforma externa para plataforma rasa. No topo, marinho raso, borda de plataforma.	
			Pedro Leopoldo		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)						Pedreira da Prefeitura	Gnaisses indiferenciados, migmatitos com estruturas dobradas, nebulíticos, dictoníticos, schiliren, estiliolíticos e surreíticos. Poções graníticas com granulação média a grosseira.

Figura 2.4 – Coluna estratigráfica da área de estudo (adaptado de Tuller *et al.* 1992).

Complexo Belo Horizonte

As rochas do embasamento cratônico granito-gnáissico-migmatítico denominado Complexo Belo Horizonte afloram nos municípios de Belo Horizonte, Betim, Caeté, Capim Branco, Confins, Contagem, Esmeraldas, Ibité, Jaboticatubas, Lagoa Santa, Matozinhos, Nova União, Pedro Leopoldo, Ribeirão da Neves, Sabará, Santa Luzia, São José da Lapa, Taquaruçu de Minas e Vespasiano, além de Sete Lagoas (Romano *et al.* 2014, Reis Junior 2016).

É essencialmente composto por gnaisses ortoderivados do tipo TTG cinza-claro, com bandamentos composicionais e feições de migmatização que variam sua intensidade de forma muito irregular, podendo apresentar estruturas do tipo *schlieren*, estromática e *schollen* (Noce *et al.* 1997, Reis Junior 2016). Intrudindo o gnaisse, ocorrem veios e corpos granitóides foliados, além de rochas máficas preenchendo fraturas e rochas ígneas metamórficas/migmáticas de caráter plutônico (Galvão *et al.* 2016).

Petrograficamente, o embasamento é descrito por Tuller *et al.* (2010) como um “ortognaisse granítico, granodiorítico, tonalítico e monzogranítico de textura granolepdoblástica cuja foliação é dada por *ribbons* de quartzo e biotita”.

Em Sete Lagoas, o complexo ígneo/metamórfico pode ser observado predominantemente na região sul, abrangendo cerca de 20% dos litotipos presentes no município, como pode ser observado no mapa geológico (Figura 2.5).

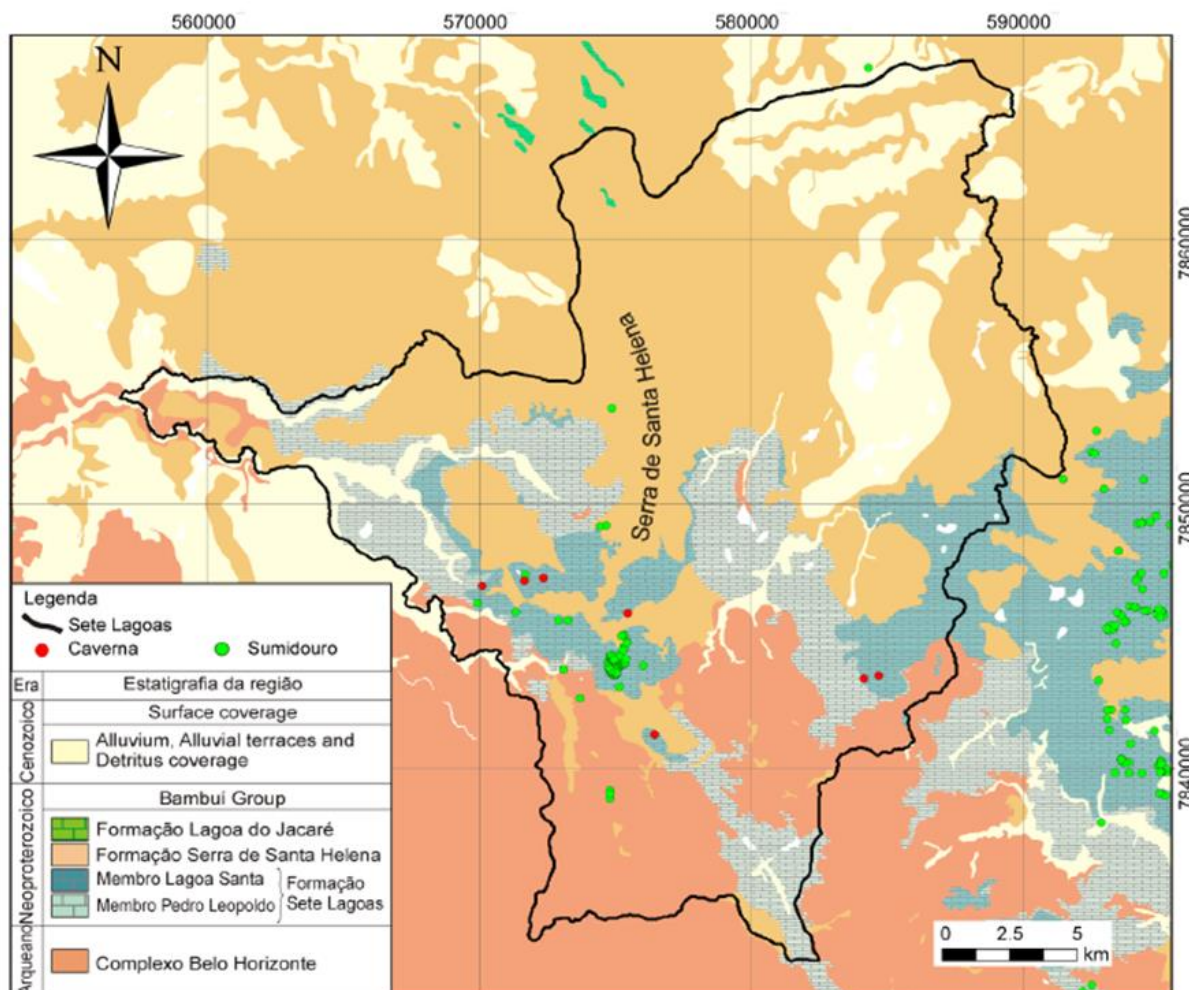


Figura 2.5 – Geologia do município de Sete Lagoas (Galvão 2015).

As rochas do Complexo Belo Horizonte apresentam fraturas, frequentemente junto às zonas migmatizadas, que são preenchidas por calcita ou veios quartzo-feldspáticos e pegmatóides (Pessoa 1996).

Formação Sete Lagoas

Sedimentada diretamente sobre o embasamento cristalino tem-se a Formação Sete Lagoas, composta por rochas carbonáticas distribuídas principalmente na faixa central do município e na região sudeste (Figura 2.5), representando cerca de 25% das rochas aflorantes no município. Segundo Galvão

(2015), o contato com o embasamento é do tipo abrupto, discordante e tectônico, contendo falhas.

Composta predominantemente por calcários, além de dolomitos e pelitos com estromatólitos bem preservados, a Formação Sete Lagoas representa ciclos de caráter retro-progradacional que registram a interação entre as taxas de subsidência, oscilação eustática e deposição de carbonatos em uma rampa. O aumento de espessura de depósitos de águas profundas à sudeste do Cráton São Francisco (a margem é definida como depocentro), indicam uma variação da rampa de rasa a profunda. A ocorrência de depósitos influenciados por tempestades e maré confirma uma conexão com o oceano, e a grande sucessão de águas rasas corrobora o caráter de bacia fortemente subsidente (Vieira *et al.* 2007).

Segundo Pessoa (2005), o ambiente de sedimentação da Formação Sete Lagoas está inserido em um ambiente plataformar estável, com representantes de inframaré e supramaré. Ribeiro *et al.* (2003) adotaram a divisão da Formação Sete Lagoas em dois membros: Pedro Leopoldo (basal) e Lagoa Santa (superior).

O Membro Pedro Leopoldo é composto por calcissiltitos e/ou microesparitos-esparitos, micritas, subordinadamente calcarenitos muito finos, margas e milonitos protoderivados (Carneiro 2013). De maneira geral, corresponde a um calcissiltito que pode ser descrito como um calcário laminado cinza claro, contendo argilas e com deformação incipiente entre seus estratos. Sua deposição ocorreu durante a primeira transgressão marinha da região que inundou o continente em suas regiões baixas e permitiu a deposição dos calcários finos e claros (Pessoa 1996). Uma maior estabilidade da bacia permitiu a cobertura com águas rasas em grandes regiões, o que acarretou em restrição da circulação das águas ocasionando sua hipersalinização (Pessoa 2005).

O Membro Lagoa Santa é composto por calcarenitos, calcissiltitos e/ou espatitos-microespatitos, brechas, estromatólitos e milonitos protoderivados (Carneiro 2013). Em um ambiente regressivo, os calcários grosseiros e escuros foram depositados, podendo ser descritos, de maneira geral, como calcários cinza-escuros a pretos, micríticos, compostos por grãos arredondados formando camadas tabulares, contínuas e pouco espessas, contendo muita matéria orgânica (Pessoa 2005, Tuller *et al.* 2010).

Formação Serra de Santa Helena

Compreendendo rochas pelíticas, em geral, siltitos e argilitos, a localidade-tipo da Formação Serra de Santa Helena situa-se na serra homônima, no município de Sete Lagoas-MG, em sua porção centro meridional (Pessoa 1996). Distribuída por toda a região norte da área de estudo e ocupando cerca de 40% do território (Figura 2.5), a formação está estratigraficamente sobreposta à Formação Sete Lagoas via contatos bruscos, tectônicos, gradacionais e com discordância angular, quando observáveis (Pessoa 1996, Ribeiro *et al.* 2003, Tuller *et al.* 2010, Galvão 2015). Em alguns locais, está sobreposta diretamente sobre o embasamento granito-gnáissico, onde o contato é brusco e discordante (tipo angular), devido a falhas de empurrão presentes nas bordas da bacia (Ribeiro *et al.* 2003, Tuller *et al.* 2010, Galvão 2015).

Podendo ser dividida em 5 litofácies, essa formação apresenta-se como ritmitos, siltitos argilosos maciços, arenitos muito finos com laminação cruzada, carbonatos (como lentes esparsas de margas e calcarenitos) e siltitos com *hummocky*, sendo capaz de alcançar espessuras superiores a 250 m constituídos de intercalações entre essas litofácies (Ribeiro *et al.* 2003, Tuller *et al.* 2010). Grande parte da formação é encontrada decomposta ou semi-alterada, o que lhe fornece uma coloração variada que vai do amarelo ao vermelho, ou até do creme ao cinza claro. Quando frescos, apresentam uma coloração esverdeada, muitas vezes com clivagem ardosiana aparente (Carneiro 2013). Em toda sua sequência a formação é cortada por um enxame de veios de quartzo-feldspato dobrados (podendo ser observados quartzos euédricos bem desenvolvidos), sendo encontradas como preenchimento de fraturas ou zonas de alívio relacionadas à eventos distensionais (Tuller *et al.* 2010, Carneiro 2013, Galvão 2015). Piritas cúbicas pouco desenvolvidas e óxidos de manganês podem ser encontrados localmente, em planos de acamamento e em fraturas (Tuller *et al.* 2010, Galvão 2015).

Por apresentar, em sua maioria, sedimentação de estratos plano-paralelos, com raras estratificações cruzadas de pequeno porte e marcas de ondas, o ambiente de deposição era marinho moderadamente profundo a raso, marcando uma nova transgressão marinha na região. O ambiente de baixa energia possuía características redutoras, com períodos de exposições subaéreas, abrangendo zonas de inframaré a intermaré (Ribeiro *et al.* 2003, Tuller *et al.* 2010).

Sedimentos Inconsolidados Cenozoicos

Comumente divididos em três tipos, os sedimentos inconsolidados presentes no município ocorrem na forma de coberturas detrítico-lateríticas, terraços aluviais e aluviões. Os depósitos colúvio-aluvionares estão distribuídos em cerca de 15% do território da área de estudo, principalmente em sua área central (Figura 2.5), e foram sedimentados durante o terciário e quaternário (Pessoa 2005, Carneiro 2013).

As coberturas detríticas são formadas essencialmente por sedimentos espessos avermelhados e inconsolidados, dispostos direta e discordantemente sobre o material sotoposto. O material areno-argiloso possui alguns níveis de cascalho, estes constituídos por clastos arredondados a achatados de quartzo. Podem ocorrer laterizações, onde são encontradas cangas (derivadas de arenitos ferruginosos) em finas camadas ou em concreções e blocos, formadas por grãos mal selecionados angulosos de quartzo e cimentados por material ferruginoso. Toda a cobertura é resultado de processos erosivos que alteraram, laterizaram e desagregaram rochas já existentes na região, portanto possuem um caráter residual (Ribeiro *et al.* 2003, Tuller *et al.* 2010).

Chegando a ter até 5 m de espessura, os terraços aluviais ocorrem ao longo de grandes drenagens e seus afluentes, como o rio das Velhas. Formados principalmente por material semi-consolidado argilo-arenoso, podem apresentar variadas colorações (branco, amarelado, róseo e avermelhado) que, por vezes, ocorrem em finos níveis alternados ou como níveis maciços manchados, e estão assentados sobre vários

tipos de rochas gerando contatos bruscos e mal definidos (Ribeiro et al. 2003, Tuller *et al.* 2010, Galvão 2015).

As aluviões podem ser observadas nos meandros de grandes cursos d'água e em alguns dos seus afluentes. São compostos por sedimentos que vão de areia fina a grossa, com alguns seixos compondo níveis de quartzo arredondados e mal selecionados, além de placas de siltito e arenito. Correspondem aos sedimentos mais novos da região e normalmente registram as paleocorrentes de antigos cursos d'água, através de suas estratificações e imbricamentos de seixos presentes (Ribeiro et al. 2003, Tuller *et al.* 2010).

Por apresentarem uma boa porosidade primária, com vários vazios intergranulares, os sedimentos inconsolidados constituem um aquífero granular no município de Sete Lagoas, apresentando principalmente poços escavados (cisternas) e nascentes. Estes depósitos normalmente estão cobertos por solos diversos (nitossolo, lateritas detríticas, neossolo e solo aluvial), mas predominam na região os latossolos (Carneiro 2013, Galvão 2015).

2.2.3 –Geotectônica e Geologia Estrutural

A grande maioria das estruturas mapeadas são resultantes do fechamento da bacia durante o Ciclo Brasileiro, por isso apresentam deformação centrífuga, aumentando do centro da bacia em direção as faixas móveis à leste e oeste (Araçuaí e Brasília, respectivamente). Dentre esses estudos, destacam-se os trabalhos em que foram propostas divisões da região em grandes compartimentos/domínios estruturais (Alkmim *et al.* 1989, Ribeiro *et al.* 2003, Tuller *et al.* 2010), levando em consideração o grau de deformação dos sedimentos e o agente deflagrador de tais deformações.

Regionalmente, a divisão se dá em 4 compartimentos (Alkmim *et al.* 1989): compartimento W (área de influência da Faixa Brasília), compartimento E (área de influência da Faixa Araçuaí) e compartimentos centrais (áreas onde os sedimentos estão relativamente indeformados). O município de Sete Lagoas está inserido na parte ocidental do compartimento E, sob influência dos eventos relacionados ao desenvolvimento da Faixa Araçuaí.

Localmente, a divisão tectônica se dá por domínios (Ribeiro *et al.* 2003, Tuller *et al.* 2010), onde a caracterização se dá de acordo com a intensidade da deformação e os tipos de estruturas encontrados. De maneira geral tem-se domínios divididos em alto, médio e baixo grau de deformação (Figura 2.6). O domínio com alto grau de deformação está na região leste, próxima à Faixa Araçuaí, onde ocorre o contato tectônico do Grupo Bambuí com as rochas do Supergrupo Espinhaço. A oeste está o domínio com menor grau de deformação, com rochas do Grupo Bambuí pouco deformadas ou indeformadas. Entre esses domínios citados está a área de estudo, definida como domínio de deformação intermediária, onde o esforço deformativo foi esmaecendo, apresentando-se mais deformado a leste e menos a oeste (Tuller *et al.* 2010).

As rochas do embasamento afloram em pequenas janelas estruturais, e suas mudanças bruscas de profundidade em curtas distâncias (observadas em perfis litológicos de poços) evidenciam o sistema de falhas formador de *grabens* e *horsts* presentes na região de Sete Lagoas (Ribeiro *et al.* 2003, Galvão 2015). Em todo o domínio é possível observar estruturas de acomodação da deformação, como falhas, dobras, *boudins* e estruturas tipo duplex, sempre evidenciando o transporte tectônico para oeste (Ribeiro *et al.* 2003). As formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena têm caimento para nordeste, com planos de acamamento de mergulho suave, seguindo a tendência da bacia, onde o depocentro encontra-se na mesma direção (Assunção 2019).

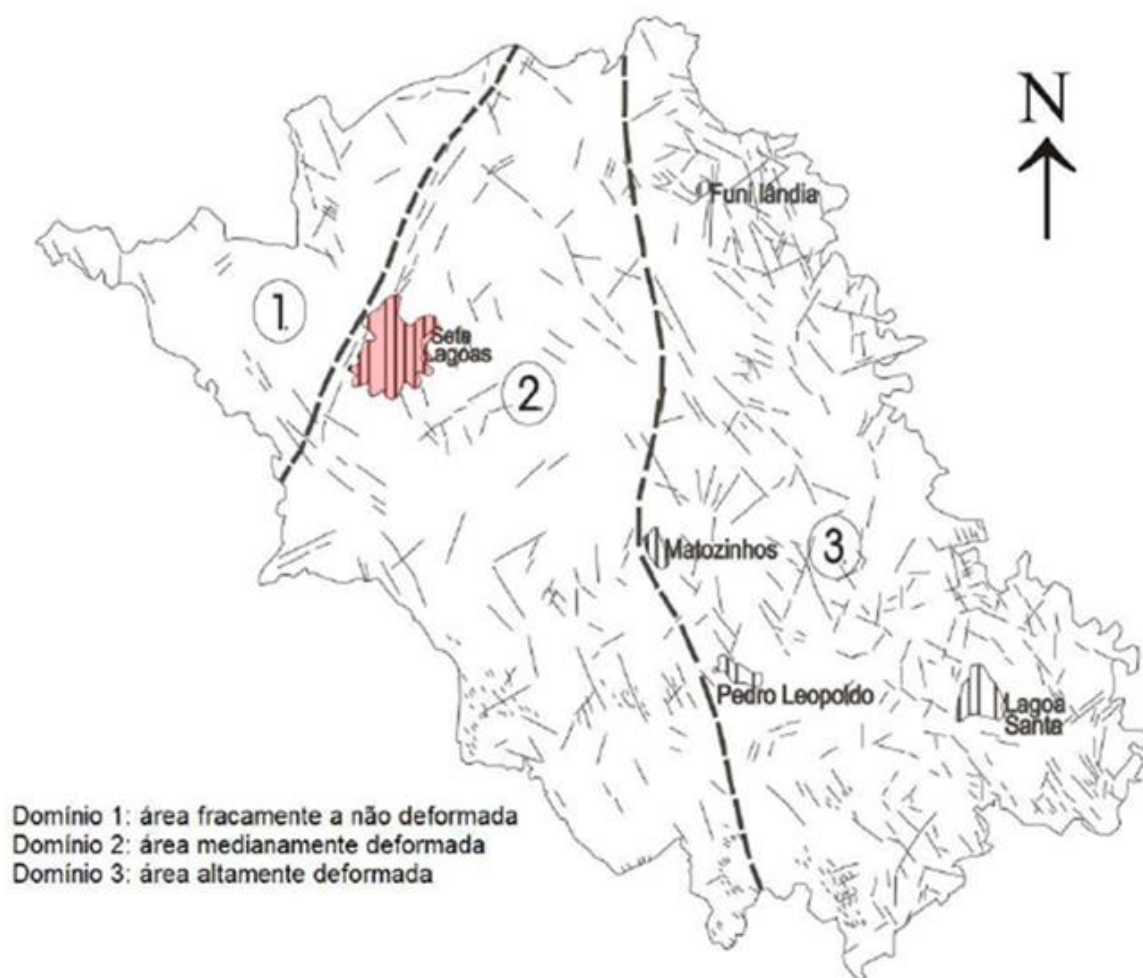


Figura 2.6 - Divisão dos domínios estruturais. Sete Lagoas encontra-se em destaque no domínio intermediário com deformação moderada a fraca (Ribeiro *et al.* 2003).

2.3 - CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

A hidrogeologia regional de Sete Lagoas foi estudada por Pessoa (1996), Galvão (2015) e Magnabosco (2019), com trabalhos acerca de modelos hidrogeológicos conceituais, as características hidrogeológica da região, e suas consequências e implicações na área urbana. Os autores identificaram três tipos de aquíferos na região: aquífero fissural, desenvolvido nas rochas do embasamento; aquífero

poroso, associado aos sedimentos inconsolidados cenozoicos; e aquífero cárstico, desenvolvido através da dissolução das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas. As rochas da Formação Serra de Santa Helena atuam na região como um aquífero.

O aquífero cárstico, de maior expressão no abastecimento do município, também está associado a outros tipos de aquíferos: quando em contato com o embasamento, os condutos do carste e as fraturas do embasamento podem se conectar formando um aquífero cárstico-fissural; assim como os sedimentos podem estar diretamente depositados sobre os carbonatos, e isso ocorre devido a um hiato na deposição ou por erosão dos pelitos da Formação Serra de Santa Helena. O fluxo subterrâneo ocorre principalmente pelos condutos coincidentes aos planos de acamamento do Membro Pedro Leopoldo, e pelas fraturas verticais que aumentam a interconectividade e permeabilidade do aquífero (Magnabosco 2019). A matriz, devido à recristalização da calcita, em resposta aos esforços tectônicos do brasiliano e ao preenchimento de fraturas por calcita e veios de quartzo, possui porosidade e condutividade hidráulica muito baixas, próximas a 3% (Peñaranda 2016) e 10-9 m/s (Galvão *et al.* 2016), respectivamente. O Membro Lagoa Santa possui paleocondutos em forma de cavernas e grutas secas, por onde ocorria o fluxo de água (Galvão 2015). A região central é a mais carstificada do município, devido aos sedimentos inconsolidados que estão diretamente sobre o calcário, o que propicia a infiltração de águas acidificadas pelo ácido húmico carregado dos sedimentos (Magnabosco 2019).

A descarga do aquífero cárstico se dá quase que exclusivamente por poços, sendo que, segundo Pessoa (1996), apenas 4 das 36 nascentes do município e mais de 80% dos poços provém deste aquífero. Magnabosco (2019) calculou o valor de $2,41 \times 10^7$ m³ de água explorada anualmente, o que equivale a 15,8% da precipitação total.

A recarga do aquífero cárstico ocorre direta e indiretamente. De maneira autogênica, ocorrem recargas através de dolinas, sumidouros, cavernas, grutas e afloramentos (35-75% da precipitação); e alogênica, quando há recargas através dos sedimentos inconsolidados e fraturas do embasamento (25-55% da precipitação) que, como dito anteriormente, podem estar em contato com os carbonatos (Magnabosco 2019) (Figura 2.7). Pessoa (1996) definiu que a taxa de recarga é 19,8% da precipitação média anual para o aquífero cárstico, onde a maior parte é destinada ao escoamento subterrâneo (15,3%), seguido da captação por poços tubulares (2,4%) e da recarga do aquífero cárstico profundo (2,1%), que também pode ser entendido como 6,2% do excedente hídrico total. A recarga anual foi novamente calculada por Magnabosco (2019), chegando a um valor de 18,2% da precipitação média; sendo 2,4% destinada à recarga profunda.

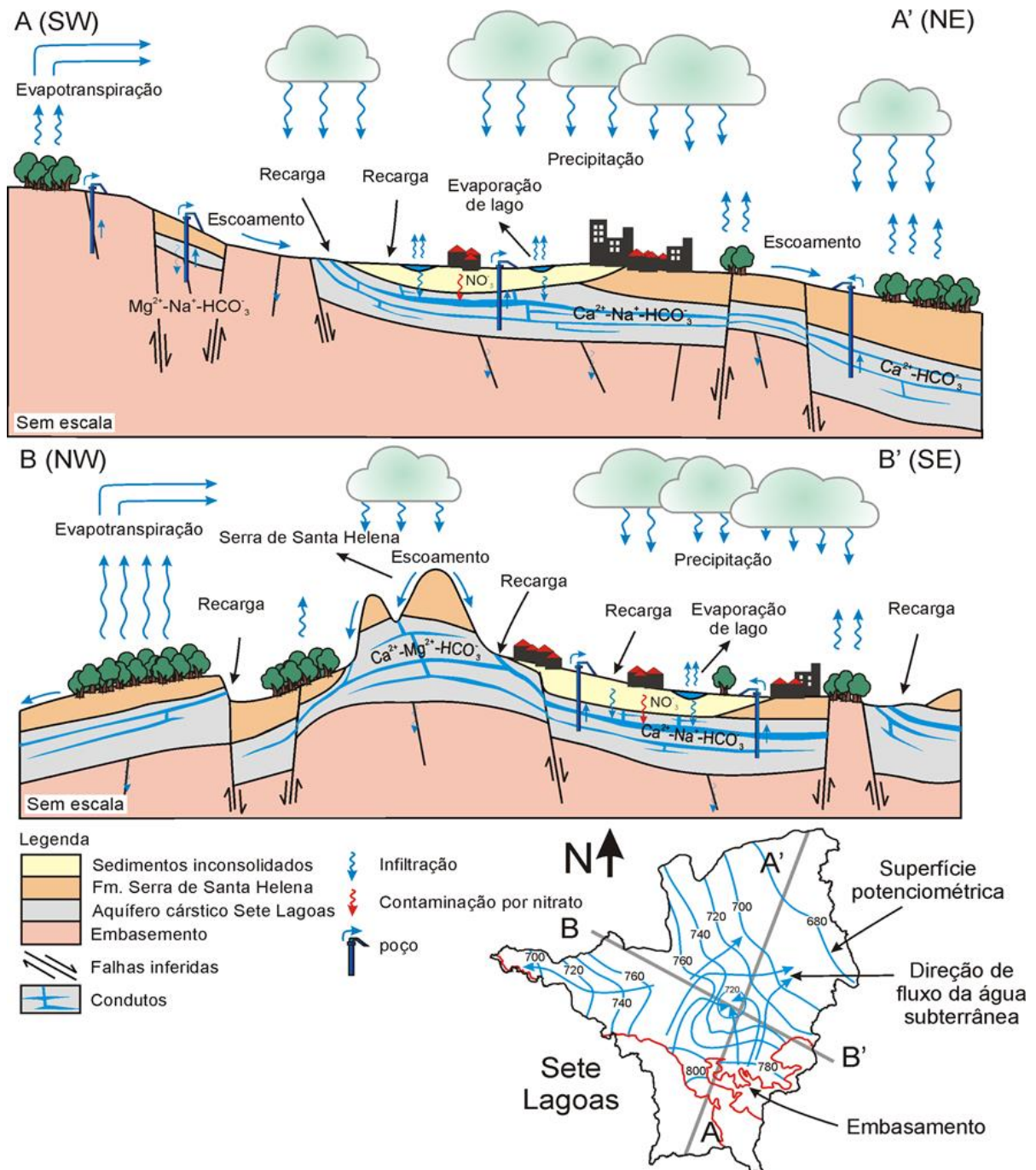


Figura 2.7 - Modelo conceitual representativo dos tipos aquíferos existentes no município de Sete lagoas e suas características geológicas, hidrológicas e hidrodinâmicas, além do mapa de superfície potenciométrica com as direções do fluxo subterrâneo e condições de contorno, referente ao aquífero cárstico (Galvão 2015).

O balanço hídrico para o município foi calculado por Pessoa (1996) e Galvão (2015), e dividido mensalmente em: excedente hídrico (novembro/dezembro a fevereiro/março), déficit hídrico (abril/maio a setembro) e reposição da água (outubro e novembro/dezembro) (Figura 2.8).

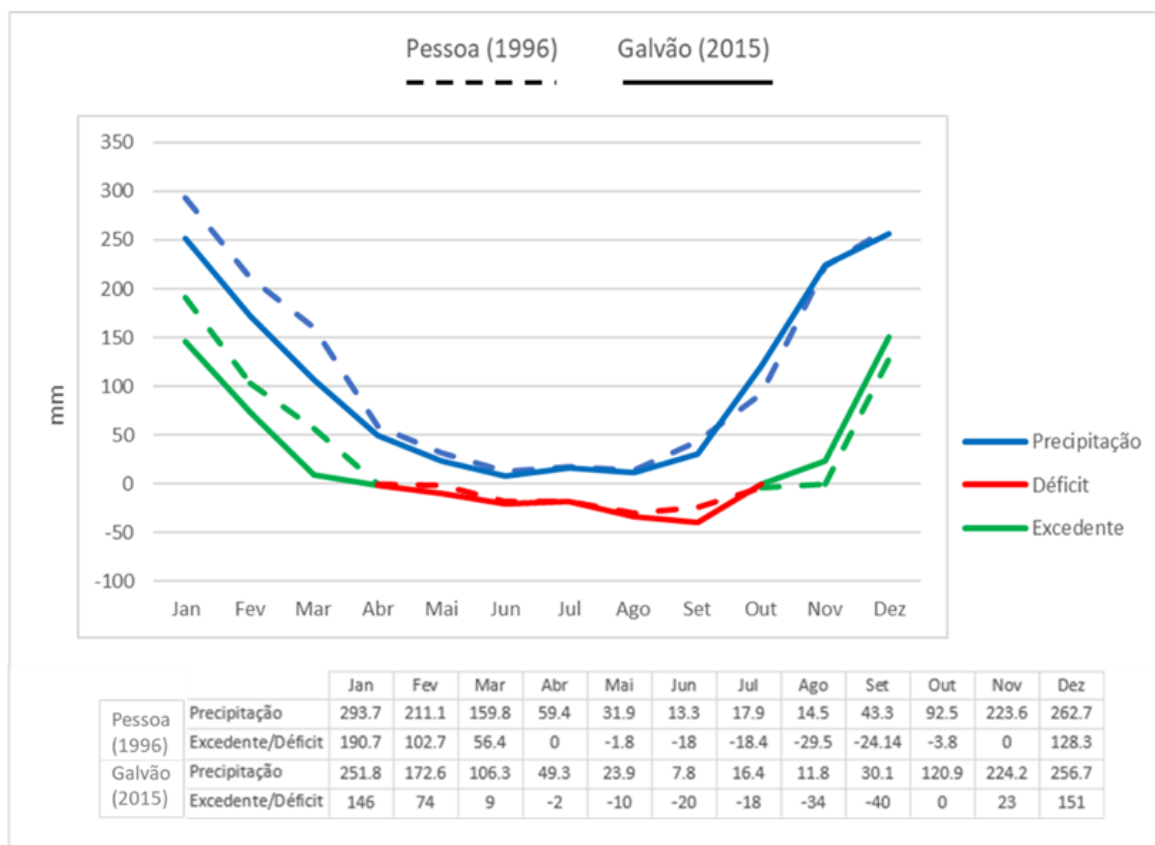


Figura 2.8 – Balanço hídrico para o município de Sete Lagoas segundo Pessoa (1996) e Galvão (2015).

Como os condutos cársticos se formaram preferencialmente seguindo planos de acamamento da Formação Sete Lagoas (Galvão 2015), o fluxo regional acompanha o caimento da bacia para NE. Destaca-se o desvio desse fluxo na região urbana central, onde se desenvolveu um considerado cone de rebaixamento resultante da concentração de poços com alta taxa de bombeamento (Gomes *et al.* 2018) (Figura 2.9).

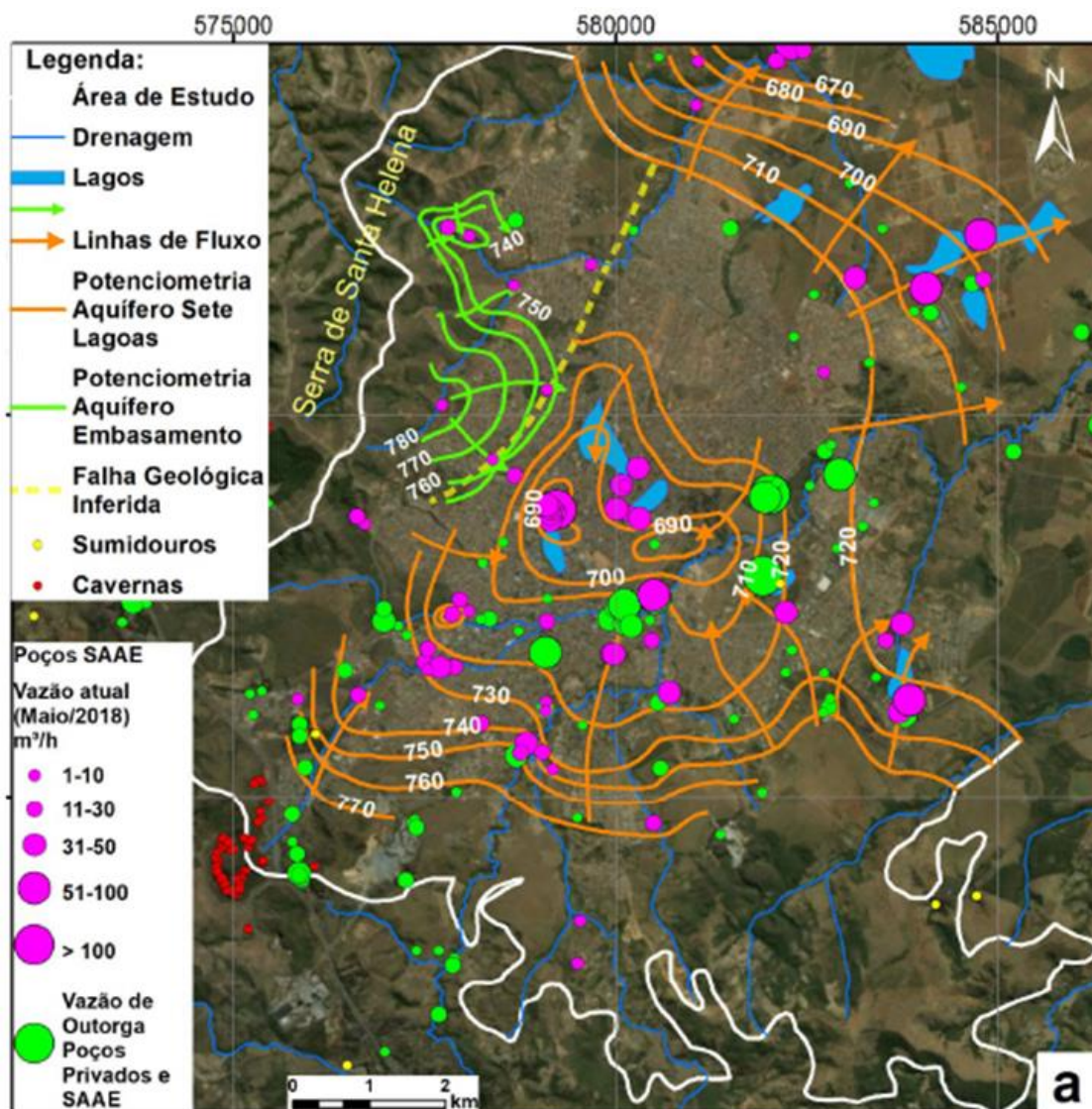


Figura 2.9 – Superfícies potenciométricas e linhas de fluxo do Aquífero Cárstico Sete Lagoas e do Embasamento em época de estiagem, na região central urbana (Gomes *et al.* 2018).

Análises químicas das águas associadas ao carste demonstram que essas podem ser definidas como bicarbonatadas-cálcicas, em sua maioria duras (100-200 mg/L de CaCO₃), com pH entre 6,5-8,1 (média de 7,2) e condutividade elétrica entre 168-590 μS/cm (média de 356 μS/cm) (Galvão *et al.* 2017). As águas não relacionadas ao carste (embasamento e próximo à Serra de Santa Helena) possuem enriquecimento em Mg²⁺ e podem aparecer associadas às águas mais ricas em Ca²⁺ e Na⁺, gerando novas composições, sendo um indicativo de interconectividade entre os aquíferos (Galvão *et al.* 2017).

Os parâmetros hidráulicos possuem um efeito de escala muito relevante devido à grande diferença de porosidade e permeabilidade da matriz da rocha, que é muito baixa quando comparada aos condutos cársticos (Galvão 2015, Magnabosco 2019) (Tabela 2.1). Quando comparados os valores do aquífero cárstico às demais unidades hidrogeológicas, o primeiro apresenta valores bem superiores (Tabela 2.2), em torno de 10 a 15x maior.

Tabela 2.1 – Parâmetros hidráulicos nas escalas matriz, poço e regional do Aquífero Cárstico Sete Lagoas (Galvão 2015).

<i>Escala</i>	<i>Matriz</i>	<i>Poço</i>	<i>Regional</i>
Permeabilidade (<i>k</i>) (m²)	1,9 x 10 ⁻¹⁶ – 4,2 x 10 ⁻¹⁵	1,2 x 10 ⁻¹² – 4,2 x 10 ⁻¹¹	1,2 – 1,8 x 10 ⁻¹¹
Condutividade Hidráulica (<i>K</i>) (m/d)	1,6 x 10 ⁻⁴ – 3,5 x 10 ⁻³	1,0 – 36,0	10,0 – 16,0
Transmissividade (<i>T</i>) (m²/d)	1,2 x 10 ⁻² – 2,6 x 10 ⁻¹	90,0 – 3600,0	750,0 – 1170,0

Tabela 2.2 – Parâmetros hidráulicos para as unidades hidrogeológicas do município de Sete Lagoas (Pessoa 1996).

<i>Unidade Hidrogeológica</i>	Transmissividade (<i>T</i>) (m²/d)	Condutividade Hidráulica (<i>K</i>) (m/d)
Aquitardo Serra de Santa Helena	8,7 – 10,3	0,22 – 0,26
Aquífero Sete Lagoas	127,6 – 1405,0	1,6 – 17,6
Aquífero Embasamento	1,4 – 38,4	0,03 – 0,77

2.4 - ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

Clima e Pluviometria

De acordo com a classificação de Köppen, o clima em Sete Lagoas é do tipo Cwa, definido como clima subtropical de invernos amenos e secos (temperaturas inferiores a 18°C) e verões quentes e úmidos (temperaturas superiores a 22°C) (Gomide *et al.* 2006). Segundo Galvão (2015), a temperatura média anual é de 20,9°C, onde em julho ocorre o menor valor médio mensal (17,5°C) e em fevereiro o maior valor médio mensal (22,9°C). Estudos apontam forte tendência no aumento das temperaturas máxima e mínima no município (Guimarães *et al.* 2004, Machado *et al.* 2012, Monteiro *et al.* 2016).

A estação seca ocorre nos meses de abril a setembro, e a estação chuvosa se estende de outubro a março, concentrando aproximadamente 90% da precipitação anual do município, que tem como média valores entre 1000 e 1500 mm. (Pessoa 1996, Gomide *et al.* 2006, Tuller *et al.* 2010, Machado *et al.* 2012, Galvão 2015). Guimarães *et al.* (2004) indicam um aumento no índice de chuvas de grande magnitude (chuvas superiores a 100 mm/dia), mas esse aumento não é observado em relação aos índices anuais de precipitação (Figura 2.10).

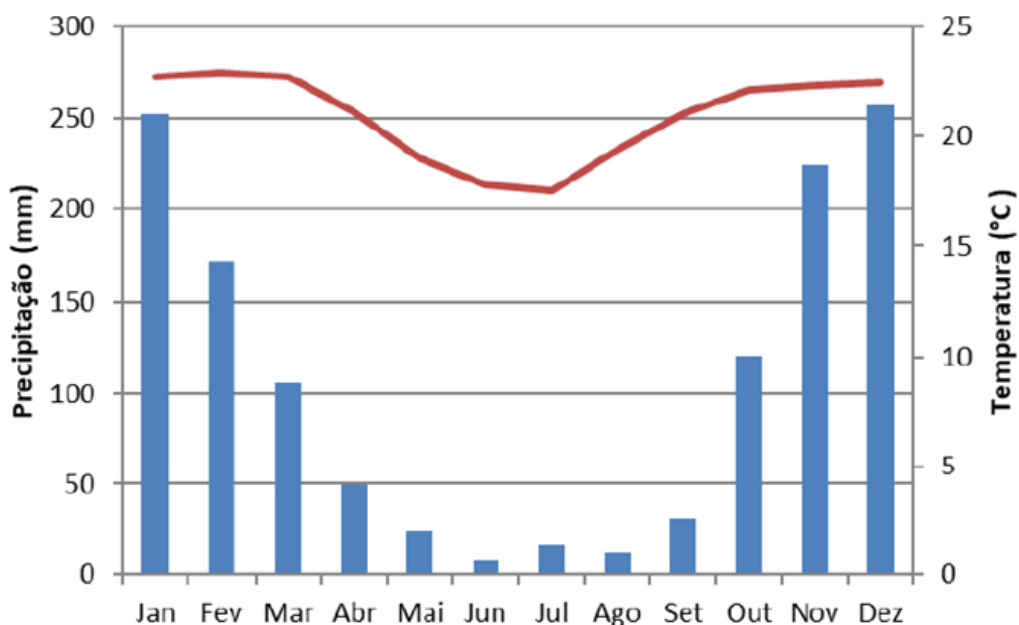


Figura 2.10 – Médias mensais de precipitação e temperatura de Sete Lagoas obtidas de normais climatológicas de 1961 a 1990, da Estação Meteorológica de Sete Lagoas (INMET) (Assunção 2019).

O balanço hídrico em Sete Lagoas pode ser dividido, segundo Pessoa (1996), em 3 situações: (1) excedente hídrico, de janeiro a março; (2) déficit hídrico, de abril a setembro; e (3) período de recarga, de outubro a dezembro (Figura 2.11).

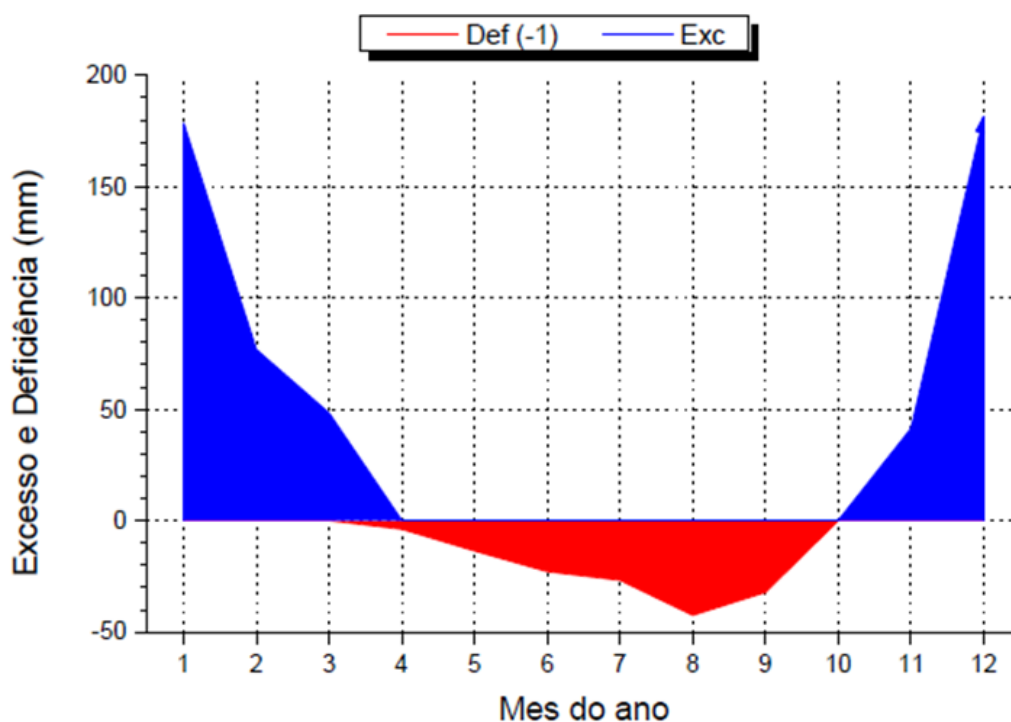


Figura 2.11 – Balanço hídrico de Sete Lagoas, utilizando dados provenientes de normais climatológicas de 45 anos (1960 a 2005) (Gomide *et al.* 2006).

Geomorfologia e Hidrografia

De maneira geral, a hidrografia está relacionada à geomorfologia, que, por sua vez, está interligada à litologia predominante da área.

O relevo do município pode ser compartimentado em 4 domínios geomorfológicos (Pedrosa 1992): 1) Superfície Rebaixada de Lagoa Santa-Sete Lagoas, com altitudes próximas a 700 m, contida no grande domínio Depressão São Franciscana; 2) Planalto Dissecado de Santa Helena, na porção centro noroeste do município e constitui o interflúvio das bacias dos rios das Velhas e Paraopebas; 3) Planalto Dissecado do rio das Velhas, constituindo-se de segmentos situados no norte e nordeste de Sete Lagoas; e 4) Planalto Dissecado do ribeirão da Mata, encontrado ao sul da região e estruturado pelas rochas do embasamento cristalino.

As colinas de formas convexas são desenvolvidas sobre as rochas pelíticas do Grupo Bambuí, onde as maiores elevações (750-1000 m) estão na serra de Santa Helena. Esta serra atua como divisor de águas, juntamente com a serra do Tombador, dividindo as bacias dos rios das Velhas e Paraopeba, pertencentes à bacia do São Francisco (Pessoa 1996). As drenagens situadas nas rochas pelíticas geralmente obedecem a um padrão dentrítico, condicionado por fraturas e/ou falhas da região (Tuller *et al.* 2010).

Devido à presença das rochas carbonáticas carstificadas, a maior parte da água do município é subterrânea, o que faz com que seu território não possua cursos d'água superficiais de grande expressão. A bacia do rio Paraopeba é representada no município pelo ribeirão São João, localizado na parte noroeste do município, e seus afluentes são os ribeirões dos Macacos, Inhaúma e o córrego do Lontra. A bacia do rio das Velhas é representada pelo ribeirão Jequitibá e seus afluentes os ribeirões Paiol e Matadouro e o córrego Vargem do Tropeiro (Botelho 2008).

Por se tratar de uma região cárstica, Sete Lagoas apresenta feições típicas desse tipo de ambiente, como dolinas, cavernas, lagoas, lapiez, vales cegos e escarpamentos (CPRM 1994, Assunção 2019). As lagoas possuem destaque por serem feições cársticas de dolinamento, e por darem nome ao município (Lagoas Paulino, Boa Vista, José Félix, Cercadinho, Matadouro, Catarina e da Chácara). Na mesma região encontram-se conjuntos de condutos e galerias que são alimentados por inúmeros sumidouros (CPRM 1994). Muitos dos sumidouros estão localizados no fundo das lagoas, como identificado por Assunção (2019) (e.g. lagoas Grande e Matadouro). Outra feição cárstica que merece destaque na região são as grutas, dentre elas a do Esquecimento, Pendentes, Torre e a maior e mais conhecida, a Rei do Mato, onde o maciço que a contém está localizado entre dois poljes. A gruta Rei do Mato se tornou 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 998 m de extensão, sendo 220 m visitáveis, a gruta Rei do Mato possui salões com desnível de 30m contendo estagmites e estalactites raras (Associação do Circuito Turístico das Grutas – ACTG 2019).

Uso e ocupação do solo e Vegetação

A história e o desenvolvimento de uma região modificam a paisagem ao seu redor. A vegetação nativa é modificada, dependendo do uso e da ocupação dado à terra.

Atualmente, com uma população estimada de 242 mil habitantes em uma área de 537 km² (IBGE 2020), Sete Lagoas, considerada uma cidade média, teve sua região inicialmente ocupada no final do século XVIII através da agricultura e pecuária. Mas somente em 1872, com a chegada da Estrada de Ferro Central Brasil que o município apresentou uma grande evolução populacional, urbana e econômica (Botelho 2008).

Sua ocupação inicial se deu em torno da lagoa Paulino, e seu crescimento urbano se desenvolveu em direção à periferia e seguindo a construção dos corredores viários (principalmente a BR-040) (Santos 2016).

Com a facilidade do transporte ferroviário, houve o surgimento de novos empreendimentos, como o beneficiamento do leite e derivados, o que intensificou a produção de gado na região (Botelho 2008). Tal fato justifica a grande área do município definida como solo agropecuário (32% – Santos 2016) ou pastagens (60% – CPRM 1996). Estas áreas substituíram grande parte da vegetação de cerrado nativa predominante na região (Rizzini 1997, Tuller *et al.* 2010), caracterizada por árvores de até 8 m de altura, espaçadas, de galhos tortuosos e com folhas coriáceas e/ou pilosas (Ferri 1980).

A partir de 1950, Sete Lagoas intensificou o processo de industrialização através das indústrias de ferro-gusa, período em que o município teve sua maior expansão socioeconômica (Botelho 2008). Da década em questão até o início do século XXI, o crescimento populacional foi muito acelerado (Figura 2.12).

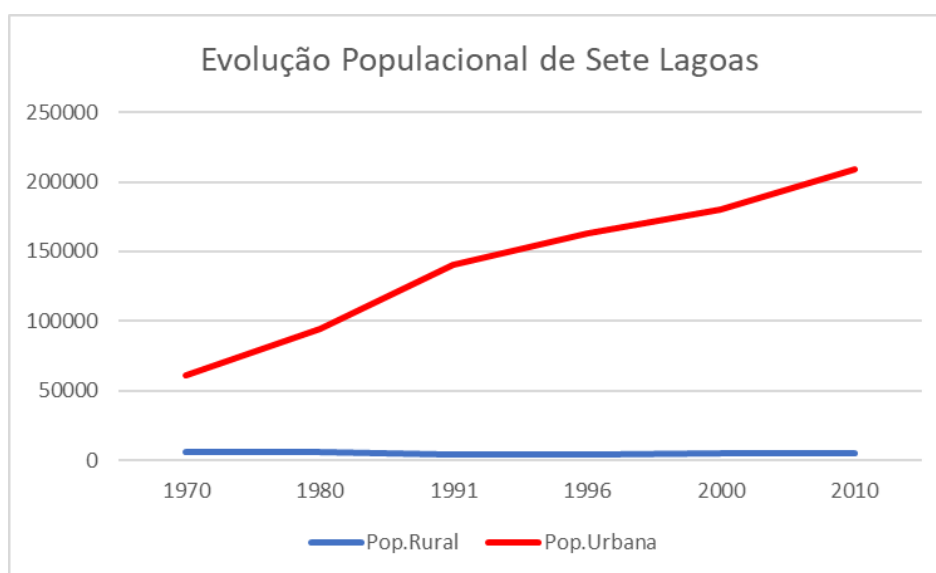


Figura 2.12 – Gráfico da evolução populacional rural e urbana de Sete Lagoas, segundo dados do IBGE e Prefeitura Municipal de Sete Lagoas (Adaptado de Botelho 2008).

Nesse momento de acréscimo populacional há o declínio da indústria siderúrgica devido à competitividade do mercado exterior e, dessa forma, instalam-se atividades industriais de outros segmentos no município – automobilística e autopeças, alimentícia, material de limpeza, bebidas, óptica, dentre outras, diversificando o segmento industrial e intensificando a industrialização no município (Nogueira 2005).

Segundo Santos (2016), a área industrial e/ou mineral passou de 387,54 há (4km²), em 1990, para 1.228 há (12 km²), em 2015; e a partir de 2000, o município apresenta uma grande ampliação do seu parque industrial, com a instalação de importantes indústrias multinacionais (e.g. Iveco 2000, Ambev 2009, Elma Chips 2011, Caterpillar 201). Ocorre uma migração de pessoas oriundas de vários estados do Brasil para o município em busca de empregos nas empresas e, também, nas suas prestadoras de serviço.

Além da vegetação rasteira (pasto) e do cerrado, nas regiões mais planas, grande parte da vegetação nativa foi substituída por plantações de cana-de-açúcar e eucalipto, que suprem a demanda dos produtores de álcool combustível, açúcar e carvão vegetal para siderurgia; e, ao longo das drenagens, estão matas ciliares bem desenvolvidas (Tuller *et al.* 2010) que podem ser definidas como formações florestais que ocorrem ao longo de cursos d'água e no entorno de nascentes, e que são fundamentais na manutenção da quantidade e qualidade da água de um reservatório, sendo responsáveis pelo aumento da infiltração de água no solo, redução do processo erosivo, contenção de barrancos, dentre outras vantagens (Ferreira *et al.* 2009).

Magnabosco (2019) desenvolveu o mapa de uso e ocupação do solo de Sete Lagoas, onde foram definidas, mapeadas e obtidas as porcentagens de 6 classes de uso no município (Figura 2.13).

Os aspectos socioeconômicos estão relacionados às atividades de serviços e bens existentes nas zonas urbanas, seguido da extração de bens minerais utilizados nas indústrias de calcinação e uso da terra para a pecuária e agricultura, promovendo

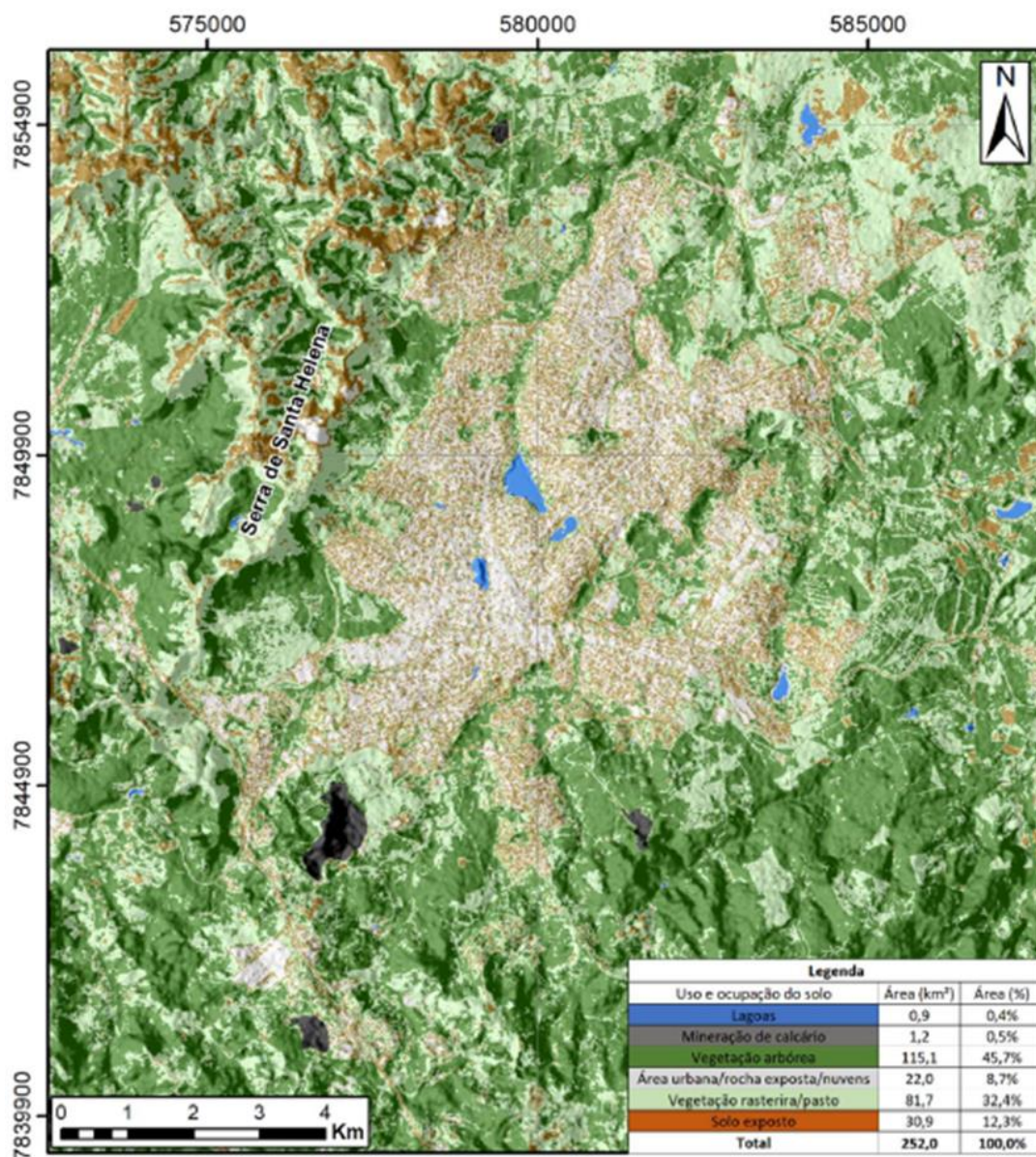


Figura 2.13 – Uso e ocupação do solo da região central urbana de Sete Lagoas (Magnabosco 2019).

2.5 – CONTEXTO DA GESTÃO DE ÁGUA

Segundo o Art. 3º da Lei Municipal nº 5.749, compete ao SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto – a administração direta e exclusiva dos serviços públicos de água e esgoto no município de Sete Lagoas. O SAAE é uma autarquia municipal sem fins lucrativos, criada pela Lei Municipal nº 1.083/65, e atuante desde 1969. Sua receita proveniente do recebimento de tarifas de água e esgoto destina-se ao pagamento de despesas da própria autarquia, manutenção dos sistemas de água e esgoto e também para novos investimentos e ampliação desses sistemas. A principal vantagem da autarquia, quando comparada à administração direta, diz respeito à autonomia administrativa e financeira, que permite melhor controle e desempenho operacionais (Peixoto 1994).

De acordo com o SAAE, atualmente, o serviço conta com 492 funcionários responsáveis pelo abastecimento de 99,9% da população de Sete Lagoas, através da captação subterrânea de água por poços profundos (aproximadamente 150 m de profundidade) e superficial por meio do rio das Velhas, responsável pelo abastecimento de 30% do município. A rede de abastecimento possui 1038 km de extensão, além de 54 reservatórios, 2 ETA's – Estações de Tratamento de Água, 29 UTS - Unidades de Tratamento Simplificado, 31 EEA - Estações Elevatórias de Água e 105 poços (em sua maioria localizados no aquífero cárstico) (SAAE 2019).

Desde 2009, o SAAE iniciou o planejamento da captação de água do rio das Velhas através de uma instalação no município de Funilândia, em busca de fontes alternativas a fim de proteger o aquífero cárstico (Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Sete Lagoas 2015). A questão hídrica é complexa nos municípios que têm seu abastecimento de água realizado principalmente por águas subterrâneas, uma vez situados em domínios cársticos (Santos 2016). Hoje, a Estação de Captação Rio da Velhas que iniciou suas atividades em junho de 2016, retira aproximadamente 10 milhões de litros de água por dia, atendendo 1/3 da população de Sete Lagoas. Com o crescimento demográfico do município, atingindo uma projeção de 317.012 habitantes em 2035, haverá uma constante demanda por infraestrutura urbana, como distribuição energética, educação, saúde, moradia, lazer, entre outros e, principalmente, abastecimento público de água e saneamento (Santos 2016). A escassez hídrica qualitativa e quantitativa constitui fator limitante ao desenvolvimento de determinada região (Botelho 2008).

De acordo com Nunes Jr. *et al.* (2010), o SAAE possui uma disponibilidade de oferta que tende a não acompanhar a crescente demanda, surgindo a necessidade de captar água em áreas longínquas, como é o caso de Sete Lagoas ao captar água do rio das Velhas.

O município possui mais 198 poços privados, totalizando 313 poços (Figura 2.14), sendo 204 ativos considerando os poços ativos do SAAE, SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, outorgados, em processo de outorga ou em andamento na SUPRAM - Superintendência Regional de Meio Ambiente (Magnabosco 2019).

O Instituto Trata Brasil, através de um estudo juntamente 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 cadastros oficiais do poder público, o que resulta em uma defasagem de informações muito importante para a gestão hídrica (Hirata *et al.* 2019). Em Sete Lagoas, dados do Censo de 2010 (IBGE) indicam que mais de 1000 domicílios são abastecidos por poços/nascentes, ou seja, grande parte dos poços do município estão em situação de clandestinidade.

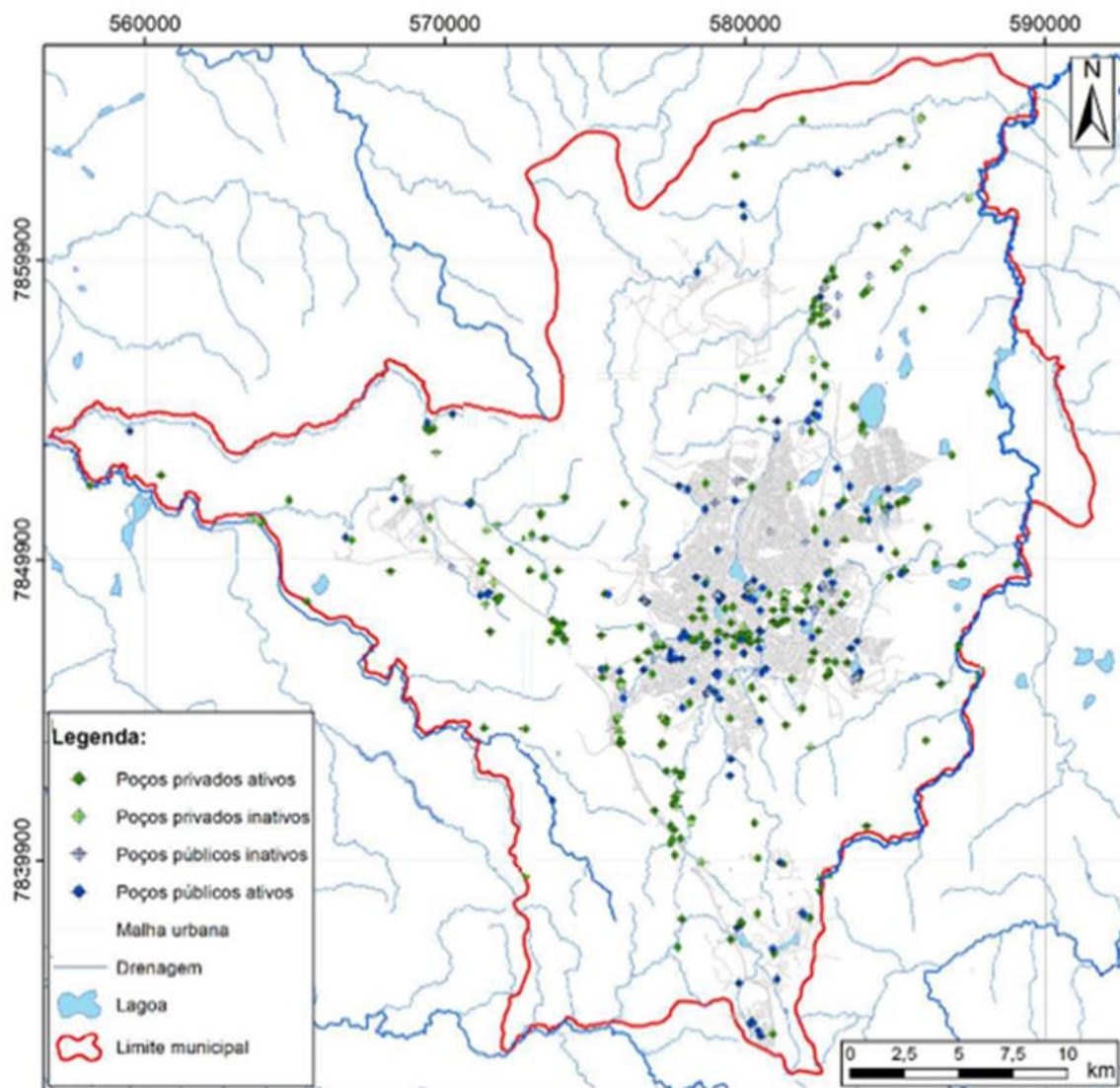


Figura 2.14 - Distribuição dos poços públicos (SAAE) e privados, em Sete Lagoas (Magnabosco, 2019).

2.6 – RISCOS DA SUPEREXPLOTAÇÃO

A humanidade sempre se desenvolveu em torno de fontes hídricas, sejam superficiais ou subterrâneas, pois as pessoas necessitam deste recurso para prosperar. Seja para consumo direto, dessedentação animal ou para irrigação, a água é um bem natural de fundamental importância para a sobrevivência e desenvolvimento das populações e suas regiões. A falta de água produz diretamente fome, doença e, finalmente, deterioração da estabilidade ambiental e política (Stevanović 2018).

O crescente aumento demográfico da população mundial, o desenvolvimento econômico e social, a evolução tecnológica, as conseqüentes pressões advindas da necessidade por maiores volumes de alimentos, o atendimento aos atuais paradigmas de consumo e os modelos de uso e ocupação da superfície terrestre têm sido os responsáveis pelo aumento do estresse hídrico, provocado por excessivas taxas de exploração das águas (Simonato 2012). Tratando-se de aquíferos cársticos, o bombeamento intensivo das

águas subterrâneas resulta não apenas no esgotamento das reservas, mas também causa outras consequências negativas (Stevanović 2018), podendo ser instaurado um quadro de superexploração.

Segundo Bosch (2001) e Custodio (2002), superexploração pode ser definido como a extração de água do aquífero em uma quantidade superior a correspondente a sua recarga, em um referido tempo suficientemente grande para que se possa diferenciar de períodos anômalos de estiagem. E como consequência imediata, o autor cita a diminuição continuada dos níveis piezométricos, acompanhado normalmente da exaustão das surgências de água do aquífero. De acordo com Rodrigues-Estrella (2012), o período suficientemente longo para se definir a superexploração muda de acordo com o aquífero. No caso do sudeste da Espanha, esse período foi de 25 anos, o que tornou possível distinguir um período de seca de 4-5 anos que ocorreu na região.

Como consequências da superexploração além dos citados acima, tem-se o aumento dos custos de bombeamento, abandono de poços devido à condutos secos, deterioração da qualidade da água, contaminação e compartimentação do aquífero, compactação da terra, modificação de vazões de cursos d'água superficiais, subsidência e colapso de terrenos gerando problemas geotécnicos, salinização de solos e desertificação progressiva, desaparecimento de fauna e flora, mudança de paisagens, problemas no abastecimento de água, e em casos de aquíferos costeiros, a intrusão de água do mar (Bosch 2001, Custodio 2002, Rodrigues-Estrella 2012, Stevanović 2018). Mas resultados negativos não implicam necessariamente que a exploração seja maior que a recarga do aquífero; tais resultados podem ser simplesmente devido às interferências dos poços que seguem as mudanças do balanço hídrico do aquífero (Custodio 2002). Por isso, o estudo das condições do aquífero deve ser feito por períodos prolongados antes de se definir o estado de superexploração.

Em Sete Lagoas, algumas das consequências da exploração excessiva do aquífero cárstico já podem ser observadas, como problemas no abastecimento público, poços secos devido a condutos agora em zona vadosa, problemas geotécnicos relacionados a abatimentos e colapsos de terrenos, contaminação da água e mudanças na paisagem. Vários estudos foram realizados no município a fim de se entender melhor esses efeitos. Assunção (2019) comprovou que lagoas contaminadas podem e estão contaminando o aquífero ao serem drenadas por sumidouros, além de informar que cerca de 30 poços públicos foram tamponados ou estão inativos por estarem secos/ contaminados. As crises no fornecimento de água forçaram o SAAE a buscar novas fontes hídricas, como o rio das Velhas, para suprir as demandas do município (Nunes Jr *et al.* 2010). As lagoas que dão nome ao município estão em risco de desaparecer, o que levou à Câmara Municipal a instaurar uma Comissão Especial pra estudar o porquê desde fenômeno estar ocorrendo, e a procurar soluções para impedir a extinção das lagoas, como a impermeabilização destas. Galvão *et al.* (2015) identificou condutos inteiramente em zona não saturada, em consequência de grandes extrações de água que geraram um grande cone de rebaixamento situado na zona central urbana de Sete Lagoas, e que têm correlação geográfica com a consequência mais frequente na região e

que merece especial destaque: a subsidência/colapso de terrenos.

Segundo Oliveira (2010), o processo de carstificação gera redes de condutos, grutas e cavernas que podem ceder, o que resulta em afundamentos cársticos que podem se manifestar na forma de colapsos ou subsidência do solo, desenvolvendo-se de forma natural ou acelerados por ações antrópicas. Em Sete Lagoas foram registrados vários eventos de afundamento, sendo o mais expressivo em 1988, quando Silva estudou o maior abatimento de solo já registrado no município, onde uma cratera de 22 m de diâmetro e 5 m de profundidade se desenvolveu no centro urbano em questão de horas. Mais estudos foram desenvolvidos com o intuito de se caracterizar a região geotecnicamente (CPRM 1994, Galvão *et al.* 2015, Rei Junior 2016, Oliveira 2018), mas deve-se destacar relatórios técnicos realizados pela Secretaria de Agricultura e Meio Ambiente de Sete Lagoas e pela Secretaria Municipal de Obras Públicas que apontam o bombeamento excessivo, gerando variações bruscas nas condições hidrodinâmicas do aquífero, como catalisador dos processos de subsidência (Botelho 2008).

Cruzando dados de mapeamento geológico (1:25.000), localização de feições cársticas, interpretação de fotografias aéreas, análise de perfis litoconstrutivos e perfilagem ótica de poços, mapeamento das estruturas em profundidade e elaboração de mapas de superfície potenciométrica, Galvão *et al.* (2015) percebeu que os principais fatores de risco geotécnico eram o fator de risco geológico e o hidrogeológico. Tais dados resultaram em um mapa de risco geotécnico do município, onde 5 estágios de risco geotécnico foram definidos, indo de alto risco a risco negligenciável (Figura 2.15).

Para que a superexploração seja definida, é necessário se conhecer os valores de recarga e descarga, mas a taxa e extensão das áreas de recarga são muitas vezes muito incertas (Custodio 2002). As mudanças projetadas na recarga das águas subterrâneas como resultado das mudanças climáticas foram feitas com base em vários modelos hidrológicos e mostram que, nos próximos 50 anos, a recarga de aquíferos no Hemisfério Sul poderá diminuir em 30% e, em determinados locais, em 70% (Stevanović 2018). Medidas de gestão podem ser tomadas visando a proteção do aquífero. Assim como o proposto por Galvão *et al.* (2015), as recomendações para se diminuir o risco geotécnico, e que servem também para as demais consequências da superexploração, incluem a redução do uso de água subterrânea com base na elevação potenciométrica da superfície; a proibição de perfuração de novos poços, priorizando os poços públicos; a mudança para suprimento de água superficial sempre que possível; tendo como principal objetivo preservar os recursos hídricos subterrâneos.

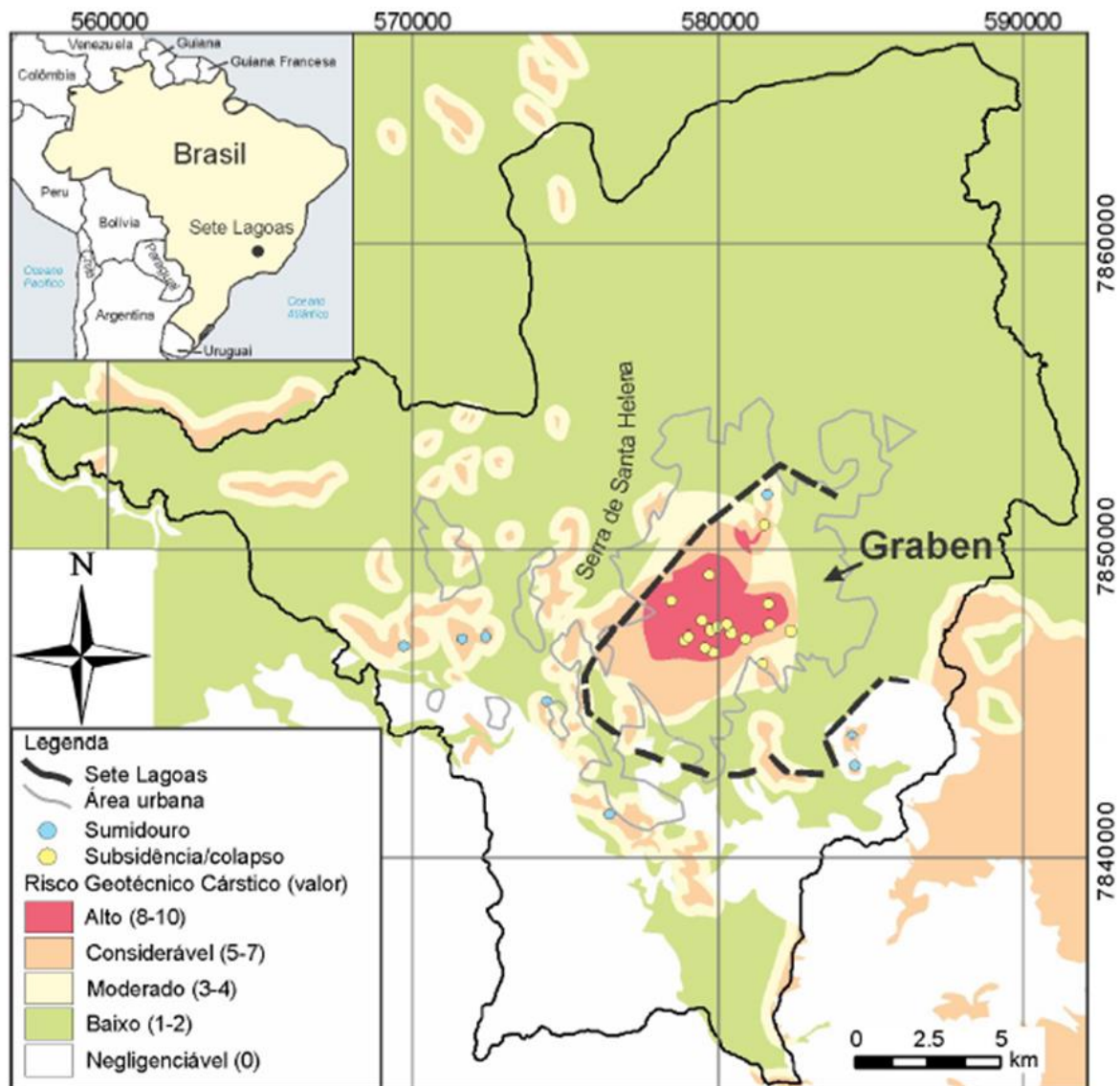


Figura 2.15 – Risco geotécnico para o carste de Sete Lagoas, mostrando a localização de sumidouros e dos colapsos de solo induzidos (modificado de Galvão *et al.* 2015).

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – HIDROGEOLOGIA CÁRSTICA

Afloramentos de rochas carbonáticas, principalmente calcários e dolomitos, ocupam quase um quarto da superfície terrestre (Ford & Williams 2007). No Brasil, o carste se desenvolve predominantemente em calcários e dolomitos do Proterozoico Superior e Cambriano Inferior, constituindo cerca de 2,5% da parte continental do país (Auler & Farrant 1996). Em sua maioria, as rochas carbonáticas são formadas em ambientes marinhos sedimentares, mas muitas rochas metamórficas e ígneas também possuem minerais carbonáticos, que entram em contato com águas subterrâneas pelo menos durante uma parte da história de seu fluxo. Compactação, cimentação e dolomitização podem alterar consideravelmente a porosidade e permeabilidade de rochas que contêm minerais carbonáticos em sua composição, mas o principal processo pós-deposicional é chamado de carstificação (Margat & Gun 2013, Sánchez & Lobo 2016, Freeze & Cherry 2017).

Carstificação é o conjunto de processos comandados pela dissolução de rochas (principalmente carbonáticas, por serem mais solúveis) que geram paisagens ruiformes identificadas como carste. Com hidrologia distinta e porosidade secundária bem desenvolvida, o carste é composto por formas de relevo típicas e únicas desse tipo de paisagem (Figura 3.1) (Ford & Williams 2007, Beynen 2011, Bonacci 2015, Travassos *et al.* 2015).

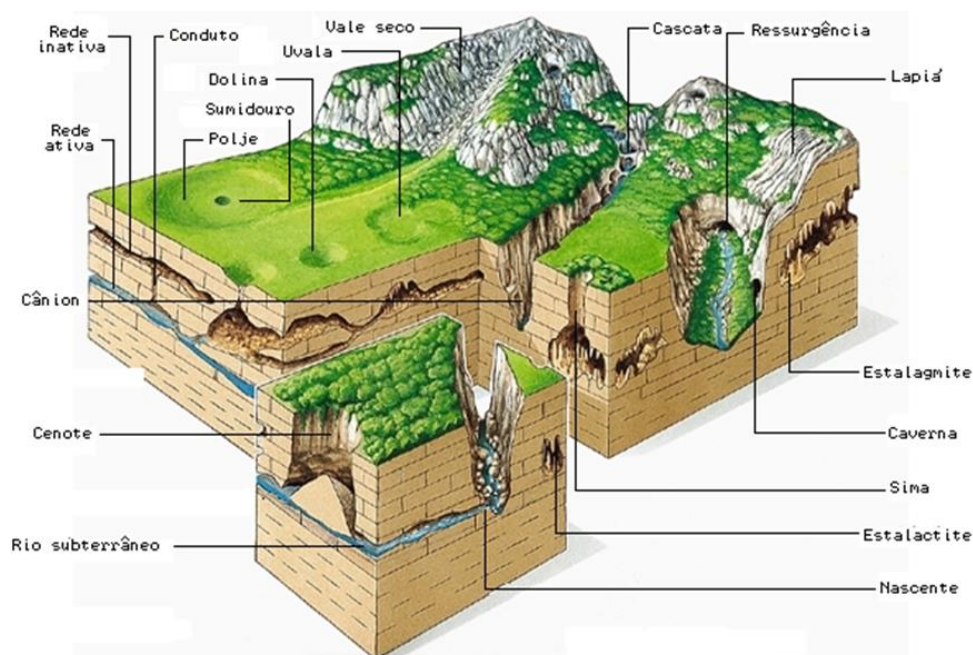


Figura 3.1 – Paisagem cárstica e algumas feições típicas (adaptado de Enciclopédia Larousse, acesso em 14/01/2020)

A carstificação clássica acontece da seguinte maneira (Figura 3.2): a chuva que cai na atmosfera absorve o CO_2 do ar e penetra no solo, onde agrega mais CO_2 , formando uma solução fraca de ácido carbônico: $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{H}_2\text{CO}_3$. A água ácida infiltrada explora naturalmente qualquer junta, fissura ou fratura já existente na rocha carbonática e começa a dissolvê-la ($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 = \text{Ca}^{++} + 2\text{HCO}_3^-$) criando aberturas cada vez maiores para a água seguir. Como o suprimento de água enriquecida em CO_2 é contínuo, as regiões cársticas mudam muito rapidamente ao longo do tempo e no espaço (British Columbia 2003, Bonacci 2015).

O sistema cárstico pode ser dividido verticalmente em duas porções: exocarste, porção mais superficial; e endocarste, parte mais profunda em subsuperfície. O endocarste se subdivide em relação à água responsável pela dissolução da rocha em hipocarste (águas meteóricas) e hipocarste (águas juvenis ou conatas). O exocarste contém em sua parte mais rasa e superficial o epicarste, região onde o clima, as raízes das árvores e os processos cársticos alteram e aumentam as discontinuidades da rocha, criando uma zona mais permeável (Bakalowicz 2004, Ford & Williams 2007).

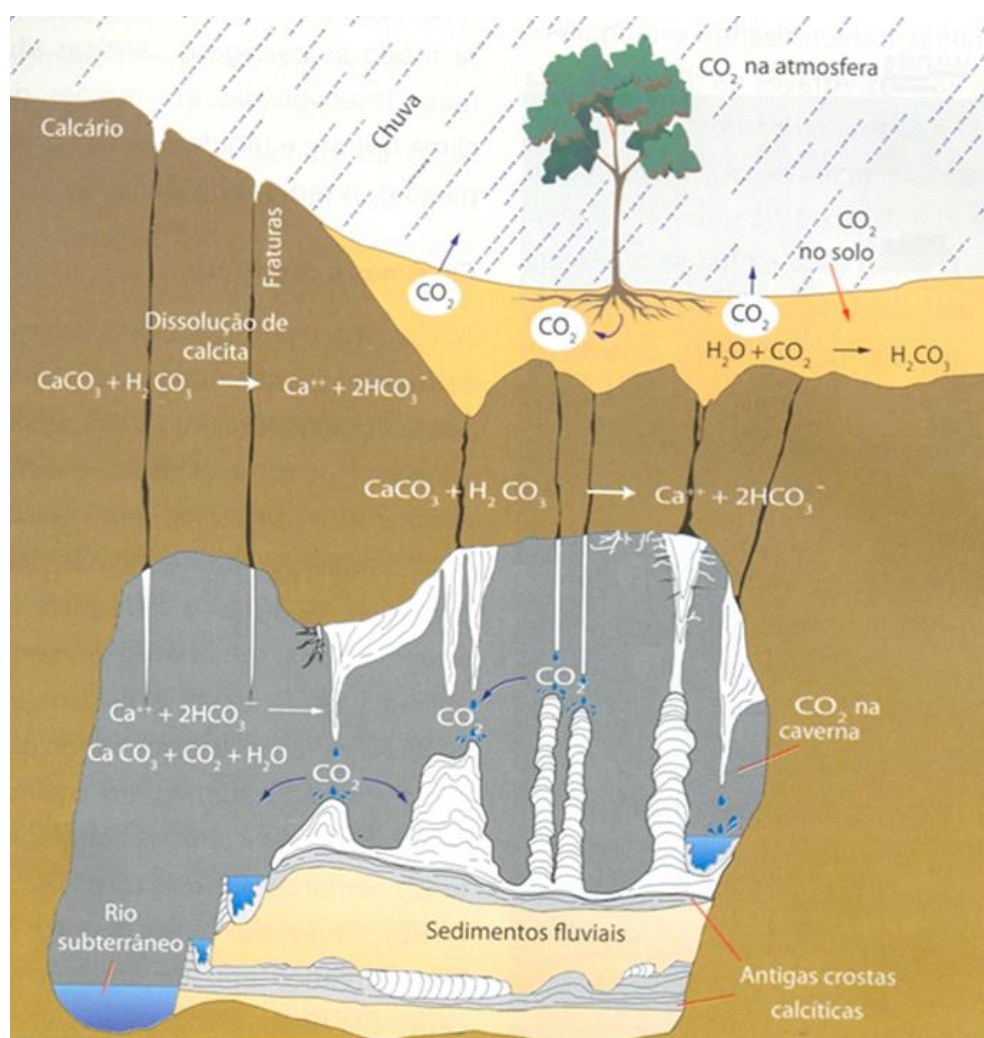


Figura 3.2 – Processo de carstificação (adaptado de Teixeira *et al.* 2003)

Três grupos podem ser distinguidos dentre as formas cársticas de relevo (Feitosa *et al.* 2008): formas de recarga – responsáveis pela absorção epigênica, onde ocorre a infiltração das águas no carste que irão esculpir a morfologia (e.g. dolinas, uvalas, poljes, vales cegos, simas, sumidouros e cavernas); formas de condução – hipogênicas, responsáveis pela circulação das águas no subsolo (e.g. condutos, cavernas e rios subterrâneos); formas de descarga – responsáveis pela emissão de água, por onde a circulação hipogênica retorna à forma epigênica normal (e.g. surgências/nascentes e ressurgências) (Figura 3.1).

As formas variadas de relevo podem ser consideradas um guia indireto para a presença de condutos, fissuras e cavidades em subsuperfície. Mas, ao mesmo tempo, esses recursos podem ocorrer mesmo quando as formas cársticas superficiais estão completamente ausentes. As águas subterrâneas e as superficiais são conectadas hidraulicamente através de inúmeras formas cársticas que facilitam e governam a troca de água entre a superfície e o subsolo. Devido a isso, uma das características quase inevitáveis de córregos abertos, riachos e rios nas regiões cársticas é que apresentem perda parcial de água ao longo do curso ou que corram completamente no subsolo (Katz *et al.* 1997, Bonacci 2015).

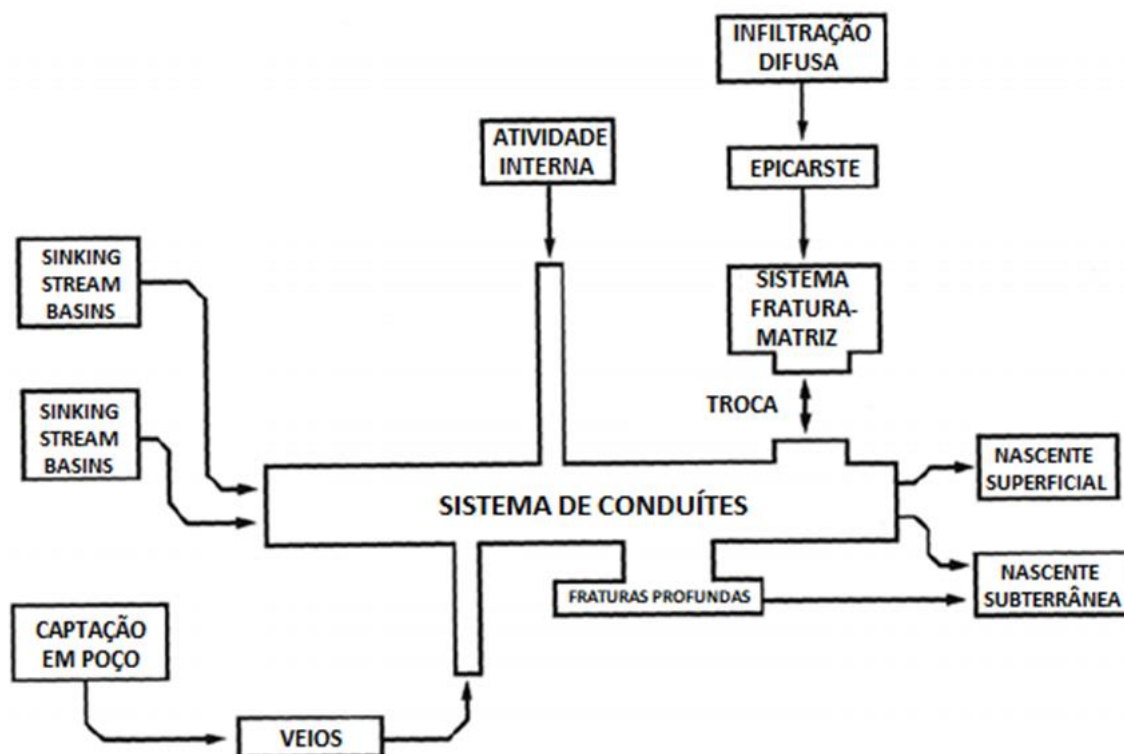


Figura 3.3 – Modelo conceitual para um aquífero cárstico (adaptado de White 2013)

A circulação das águas subterrâneas nos aquíferos cársticos (Figura 3.3) é bem diferente da circulação da água em outros aquíferos do tipo não cárstico. Nos aquíferos cársticos, a água está sendo coletada em redes de fendas/fissuras ou através de solos sobrepostos ao carste (recarga difusa), e através de sumidouros, dolinas e cavernas (recarga pontual), e em geral, recebem a maior parte do excedente

local de precipitação (geralmente de 80 a 90%), o que tende a ser relativamente alto. A recarga pode ser originária da própria área cárstica (autogênica) ou de áreas adjacentes não cársticas (alogênica) (Figura 3.4). Sua descarga é comumente concentrada no espaço e, conseqüentemente, grande. Na maioria das vezes, existe apenas uma saída de descarga principal por sistema aquífero. Essas saídas formam as maiores fontes da Terra, com taxas médias de descarga de dezenas de metros cúbicos por segundo (Ford & Williams 2007, Goldscheider & Drew 2007, Margat & Gun 2013, Bonacci 2015).

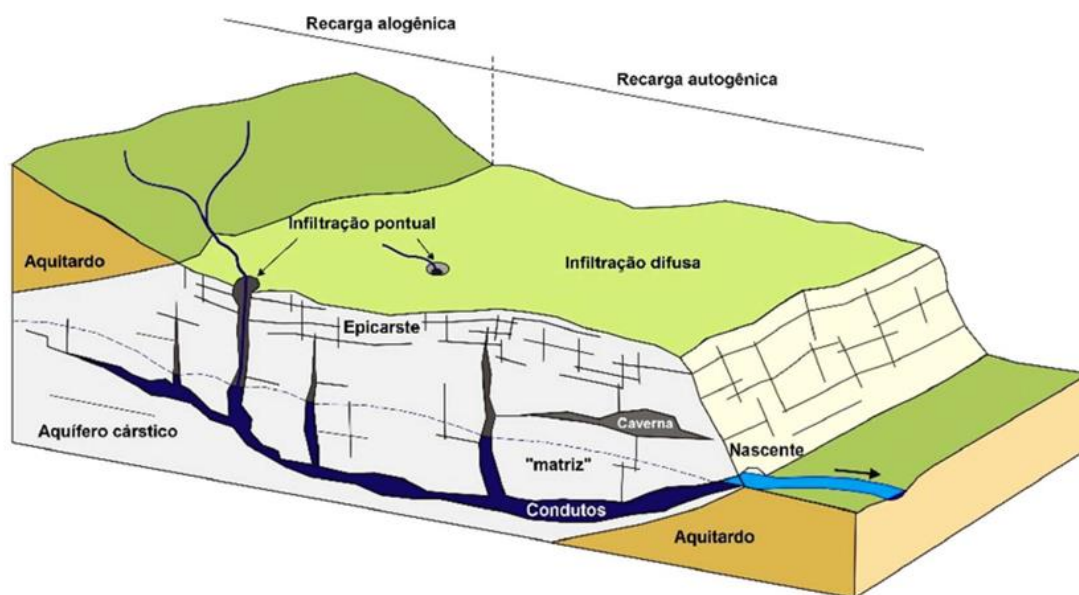


Figura 3.4 - Ilustração esquemática de um aquífero cárstico e as dualidades de recarga (alogênica e autogênica) e infiltração (difusa e pontual) (modificado de Goldscheider & Drew 2007).

A heterogeneidade extremamente alta desses aquíferos é causada por porosidade múltipla (matriz, fissuras, fraturas e condutos) e anisotropia. O processo de carstificação é temporalmente variável e relativamente rápido em comparação com processos geológicos comuns (Ford & Williams 2007, Bonacci 2015). Segundo Feitosa *et al.* (2008), o carste apresenta características especiais, do ponto de vista geomorfológico e hidrogeológico:

- extensas zonas sem correntes de águas superficiais, inclusive em climas úmidos;
- ocorrência de depressões relativamente grandes, cuja drenagem é subterrânea;
- existência de cavidades no subsolo (simas ou cavernas) pelas quais circulam correntes de água subterrânea;
- pequeno valor de escoamento superficial;
- complexa circulação de águas subterrâneas tanto nas zonas saturadas como acima da superfície potenciométrica;
- existência de zonas desnudas, sem vegetação;

- grande rapidez da infiltração das chuvas e outras águas superficiais;
- anomalias na direção do fluxo de água com relação ao gradiente hidráulico regional;
- grande diferença entre a média e a mediana da distribuição estatística dos valores de permeabilidade;
- muita variação espacial dos valores do coeficiente de armazenamento e da transmissividade.

Hidraulicamente, o aquífero cárstico pode ser dividido em três zonas (Ford & Williams 2007): zona insaturada/vadosa (composto pelo solo, epicarste e zona de transmissão de livre percolação, onde os espaços vazios estão parcialmente preenchidos de água), zona epifreática/de oscilação (intervalo onde a superfície freática oscila em relação ao nível basal) e zona saturada/freática (de espessura variável, é o intervalo em que os espaços vazios estão totalmente preenchidos por água).

Os aquíferos cársticos podem ser descritos como uma rede de condutos incorporados e interagindo com uma matriz de rochas menos cárstica. O fluxo nos condutos é rápido (geralmente > 100 m/h) e turbulento, enquanto as velocidades de fluxo na matriz são muito menores. No entanto, o armazenamento de água nos condutos é limitado (na maioria das vezes uma pequena porcentagem do volume do aquífero), enquanto um armazenamento significativo pode ocorrer na matriz e em outras partes do sistema, como o epicarste (Goldscheider & Drew, 2007).

Os aquíferos cársticos são frequentemente caracterizados por uma reação rápida e forte a eventos hidrológicos, como chuvas torrenciais. O lençol freático cárstico pode subir rapidamente (geralmente em algumas horas) e dramaticamente (às vezes mais de 100 m); a descarga de fontes cársticas também pode ter várias ordens de magnitude em um curto espaço de tempo. Essa variabilidade temporal requer estratégias de amostragem e monitoramento especialmente adaptadas. Por exemplo, amostragens baseadas em eventos precisam ser empregadas, ou seja, intervalos de amostragem significativamente mais curtos durante eventos de alto fluxo. Pela mesma razão, dispositivos de monitoramento contínuo são particularmente úteis em sistemas cársticos (Goldscheider & Drew 2007).

Da mesma forma, a água e sua qualidade podem exibir uma grande variabilidade, como no conteúdo de partículas minerais em suspensão, carbono orgânico e bactérias, incluindo patógenos. O rápido tempo de trânsito e os limitados mecanismos naturais de limpeza e filtragem associados aos sistemas de rios subterrâneos podem facilmente transportar materiais perigosos, como contaminantes ou sedimentos, de uma área para outra (British Columbia 2003, Goldscheider & Drew 2007).

Grandes afloramentos de rochas carbonáticas em todo o mundo e sua alta permeabilidade garantem que seu uso para o abastecimento de água seja generalizado. No entanto, a alta permeabilidade tem várias consequências adversas. Uma delas é que a contaminação pode se mover rapidamente através desses aquíferos. As águas subterrâneas nos aquíferos cársticos são mais vulneráveis a todos os processos de poluição, independentemente de serem locais e crônicos (resíduos industriais, efluentes, perdas de

esgotos), acidentais (transporte) ou difusos em grandes áreas (excesso de fertilizantes e pesticidas na agricultura). Além disso, esses aquíferos podem receber águas superficiais de qualidade degradada (Beynen 2011, Margat & Gun 2013).

O problema da poluição dos recursos hídricos subterrâneos em carstes está na indefinição das áreas e dos mecanismos pelos quais os poluentes são incorporados ao fluxo subterrâneo. A presença de redes de canais interconectados nos aquíferos cársticos significa que as águas subterrâneas podem se mover rapidamente através desses canais, e a contaminação pode se mover igualmente rápido através deles. Plumões contaminantes em carbonatos são substancialmente diferentes das plumões em aquíferos médios porosos porque a contaminação se espalhará rapidamente ao longo da rede de canais em direção às nascentes. Ao mesmo tempo, o movimento de contaminantes em fraturas e na matriz da rocha podem ser várias ordens de magnitudes mais lentas. Consequentemente, plumões contaminantes nas rochas carbonáticas são muito mais complicadas do que as formas ovais simples encontradas em meios porosos homogêneos (Feitosa *et al.* 2008, Beynen 2011, Margat & Gun 2013).

3.2 – CÁLCULO DE RECARGA

Existem várias maneiras de se determinar a recarga de um aquífero, utilizando-se de modelos numéricos, isotópicos ou hidroquímicos, ou via cálculos de equilíbrio hidrológico ou hidrodinâmico. Geralmente esses métodos são desenvolvidos utilizando aquíferos detríticos como objeto de estudo, e para serem utilizados em meios cársticos precisam ser adaptados devido às suas características únicas. Muitos desses métodos também necessitam de dados de entrada que não são tão fáceis de adquirir e de serem aplicados.

Diante das dificuldades acerca de um método específico para aquíferos cársticos, Andreo *et al.* (2008) desenvolveu o método APLIS, que leva em consideração parâmetros que influenciam diretamente na recarga em meios cársticos. Além disso, o método permite uma avaliação espacial da recarga, utilizando dados que normalmente já estão disponíveis. A avaliação da recarga e sua distribuição espacial em grandes áreas são questões-chave para a gestão da água subterrânea, particularmente onde a água subterrânea é a única água doce disponível (Andreo *et al.* 2008).

O método APLIS utiliza variáveis significativas para recarga, classificadas e pontuadas de acordo com sua influência e que são combinadas e aplicadas em um sistema de informações geográficas, sendo possível estimar a taxa de recarga e sua distribuição espacial. A utilização de um sistema de pontuação e classificação de parâmetros já é conhecida quando o assunto é a proteção de aquíferos carbonáticos, como visto nos métodos EPIK (Doerfliger *et al.* 1999), PI (Goldscheider 2005) ou COP (Vías *et al.* 2006). Os parâmetros utilizados para o cálculo do APLIS são: altitude (A), declividade (P), litologia (L), formas de infiltração (I), tipos de solo (S) e fator de correção da unidade hidrogeológica (Fh). Por fim, esses parâmetros foram combinados através de uma equação que permite a determinação do valor médio de

recarga expresso em porcentagem por unidade espacial:

$$(\% \text{ da precipitação}) = [(A+P+3L+2I+S)/0.9] \times Fh$$

Os métodos citados anteriormente foram desenvolvidos em locais que não condizem com a realidade do clima tropical, por isso foi necessária a adaptação deles. Podemos citar como exemplo, a adaptação ao método EPIK realizado por Pereira *et al.* (2019) e do método APLIS por Magnabosco *et al.* (2020), que foi utilizado como referência para a realização do cálculo de recarga deste trabalho por se tratar da mesma área de estudo. Magnabosco *et al.* (2020) utilizou pesos diferentes em algumas formas de infiltração que resultavam em recargas autogênicas ou que possuíam interligação entre o aquífero cárstico e estruturas superficiais. Outra adaptação foi a utilização do mapa de índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) em substituição ao mapa pedológico. Os pesos adotados para cada parâmetro são expostos na tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1 - Pesos dos parâmetros usados no método APLIS para mapa de recarga (Magnabosco *et al.* 2020).

Altitude (m)	Slope (%)		Lithology	Infiltration landforms		NDVI	
<300	1	<3	10 Limestone	8 Sinkholes	10 Mining and exposed rocks	10	
300–600	2	3–5	9 Mudstones	1 Caves	10 Dense vegetation	8	
600–900	3	5–10	8 Unconsolidated sediments	4 Morphostructural lineaments	5 Undergrowth or pasture	5	
900–1200	4	10–15	7 Basement	2 Lakes connected with karst aquifer	5 Exposed soil	4	
1200–1500	5	15–20		Non-connected lakes	1 Surface water	2	
1500–1800	6	20–30		Remaining area	1 Urban area	1	
1800–2100	7	30–45					
2100–2400	8	45–60					
2400–2700	9	60–100					
>2700	10	>100					

3.3 – SUPEREXPLOTAÇÃO

Pesquisas sobre superexploração estão sendo desenvolvidas ao longo dos anos e, como consequência, muitos autores estão avançando na melhor definição dos conceitos relacionados a esse tema (Pulido 1989, Candela *et al.* 1991, Simmers *et al.* 1991, Llamas & Custodio 2003, Malik *et al.* 2004, Molina *et al.* 2009, 2010, 2011, Gleeson 2010, Qureshi *et al.* 2010, Ali *et al.* 2011). Inicialmente, o termo superexploração se limitava a considerar apenas valores quantitativos, onde o saldo final entre volume explorado e recarga era de déficit (Pulido 1989). Entretanto, esse tipo de observação não levava em conta algumas questões temporais, sociais e de qualidade. Com relação ao tempo, Pulido (2001) destaca que períodos suficientemente longos deveriam ser analisados, com o objetivo de distingui-los de períodos de seca. Em termos sociais e da qualidade da água, Candela *et al.* (1991) e Simmers *et al.* (1991) destacam que superexploração é toda exploração que produz efeitos indesejados, incluindo questões físicas, bióticas e ambientais. Dentre todos os autores há consenso de que a superexploração é resultado de uma má gestão onde os malefícios superam os benefícios. Ou seja, o uso intensivo de água subterrânea, sem o devido controle e planejamento do uso dos recursos renováveis do aquífero, resulta em um desequilíbrio onde os benefícios da exploração não compensam os efeitos colaterais negativos gerados por ela.

Neste trabalho, adota-se a definição de Pulido (2001) e Rodríguez-Estrella (2004), em que a

superexploração ocorre quando, por anos, a quantidade de água retirada do aquífero excede sua recarga plurianual, gerando uma queda contínua do nível piezométrico, causando impactos negativos (físicos, biológicos, sociais etc.), onde o equilíbrio original dificilmente poderá ser reestabelecido. Tal definição foi escolhida por ter o cuidado de considerar aspectos acerca do tempo de exploração intensiva (evitando que sejam considerados períodos de anormalidade climática), incluindo aspectos negativos que vão além da questão hidrogeológica e expondo o caráter não sustentável do quadro de superexploração.

Para fins ilustrativos, países como China, Estados Unidos, México e Espanha passam por problemas relacionados à superexploração, tendo como consequências o desenvolvimento de grandes cones de rebaixamento provenientes da diminuição contínua do nível piezométrico, subsidências de solo, aumento no custo econômico do bombeamento, abandono de poços, diminuição do fluxo de corpos d'água superficiais e intrusões de água salina (Esteller & Diaz 2002, Molina 2009, Rodríguez-Estrella 2012, Sophocleous 2012, Huang *et al.* 2014). Países como Tunísia, Síria, Líbia, Iran, Iraque, Canadá e Austrália também já enfrentam dificuldades relacionadas à exploração excessiva. No Brasil, os municípios de Cajamar e Mairinque (São Paulo), Almirante Tamandaré e Colombo (Paraná), Teresina (Piauí), Lapão (Bahia), Lagoa Santa e Sete Lagoas (Minas Gerais) são bons exemplos de lugares que enfrentam consequências negativas da superexploração, principalmente subsidência e colapso de solo (Galvão 2015).

Os aquíferos cársticos são fontes de água amplamente utilizadas e, em muitos países, representam o único recurso para o abastecimento de água potável e irrigação de terras aráveis (aproximadamente 10% da população mundial está nessa situação). Em muitos lugares, os usuários de águas cársticas enfrentam problemas causados principalmente por regimes instáveis de descarga. Esses tipos de aquíferos são especialmente sensíveis às mudanças naturais e antropogênicas no ambiente. A situação é especialmente problemática nas regiões de clima mais seco, onde, além de ter uma recarga limitada, há um aumento da demanda de água como resultado da população em crescimento e necessidade de melhoria das condições de vida (urbanização, industrialização, produção de alimentos) (Stevanovic 2018, Younos *et al.* 2019).

A Organização para Agricultura e Alimentação desenvolveu um Sistema Global de Informações sobre Água e Agricultura (AQUASTAT) que reúne dados estatísticos dos recursos hídricos de fontes nacionais em todo o mundo. O cruzamento de dados populacionais e da captação de água pelos principais setores (agricultura, indústrias e municípios), além da evaporação de reservatórios antrópicos superficiais, demonstra que enquanto a população mundial aumentou cerca de 4,4 vezes (340%) no último século, a retirada global de água aumentou 7,3 vezes (630%) no mesmo período, ou seja, 1,7 vezes mais rápido que a população. Se essa tendência prevalecer, em 2050 a estimativa populacional é de 9,7 bilhões de pessoas (ONU 2019), um aumento de 26% em relação aos 7,7 bilhões atuais. Dessa forma, a captação de água pode ter um acréscimo preocupante para a sustentabilidade do recurso hídrico mundial.

Para evitar o esgotamento das reservas de água subterrânea, a deterioração de sua qualidade e as demais consequências da retirada excessiva de água do aquífero, é necessário manter uma avaliação constante do aquífero cárstico. Dados sistematicamente coletados e avaliados tecnicamente podem fornecer uma base para o gerenciamento da água e possíveis medidas corretivas no nível regional (sistemas aquíferos) ou local (fonte) (Younos *et al.* 2019). Algumas cidades no México e na Espanha implantaram medidas que visavam aliviar o déficit hídrico e impedir maiores problemas, como o uso combinado de águas subterrâneas e superficiais para o abastecimento populacional, a educação hídrica, redistribuição espacial das explorações já existentes e limitação de novas explorações, instalação de sistemas de irrigação mais eficientes, utilização de recargas artificiais, recuperação de áreas úmidas, redução das taxas de bombeamento e criação de zonas de reserva hidrogeológicas e de uma rede de monitoramento como ferramentas de gerenciamento de águas subterrâneas (Escolero *et al.* 2002, Esteller & Diaz 2002, Molina 2009, Rodríguez-Estrella 2012).

3.4 – GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

A pressão sobre os recursos hídricos globais está aumentando de uma maneira sem precedentes e, portanto, práticas de gerenciamento sustentáveis das águas subterrâneas ganham importância mais do que nunca, tornando-se um grande desafio e uma das principais prioridades da humanidade (Sen 2015, Jakeman *et al.* 2016). Durante séculos, as águas subterrâneas foram exploradas e usadas por uma variedade de atores sem avaliações prévias dos recursos hídricos subterrâneos e sem nenhuma tentativa de gerenciar racionalmente esses recursos (Margat & Gun 2013).

Tem-se um consenso no meio científico de que a gestão de águas subterrâneas deve ser integrada, ou seja, pensada além do aquífero, considerando um contexto mais amplo de ligações com águas superficiais, gestão de bacias hidrográficas e questões intersetoriais como economia, energia, clima, agricultura e meio ambiente (Jakeman *et al.* 2016). As populações que utilizam recursos hídricos subterrâneos têm dependências e desafios variáveis em todo o mundo. O gerenciamento das águas subterrâneas deve equilibrar as demandas humanas por água doce no presente com a necessidade de segurança hídrica no futuro, e isso requer uma análise dos aquíferos para que o comportamento das águas subterrâneas possa ser estimado, respeitando os níveis de abstração considerados sustentáveis (Custodio 2002, Alley & Leake 2004, Giordano 2009). A gestão de recursos hídricos subterrâneos é mais do que simplesmente reagir a problemas observados ou previstos, é garantir que o potencial das águas subterrâneas como recurso não seja negligenciado ou superestimado. Deve-se aproveitar ao máximo as oportunidades oferecidas pelas águas subterrâneas, encontrando um equilíbrio entre a exploração e a conservação, em harmonia com as preferências políticas em relação à água, desenvolvimento socioeconômico e meio ambiente (Margat & Gun 2013).

Apesar da sua importância, as águas subterrâneas têm uma menor participação na gestão hídrica,

muito devido à sua subestimação histórica, o que fez com que o uso dessas águas recebesse menos atenção em muitas regiões do que os recursos hídricos superficiais. Muitos aquíferos vitais para a agricultura, principalmente na Índia, Paquistão, Arábia Saudita, EUA, China, Irã e México, estão sob ameaça de superexploração devido à uma gestão ineficiente (Gleeson *et al.* 2012, Wada *et al.* 2012). É praticamente impossível fornecer soluções gerais de gerenciamento, porque cada aquífero requer soluções em condições especiais, locais e ambientais, que podem não ser exatamente válidas para outras regiões (Sen 2015).

No Brasil, as questões legais acerca do uso da água no país têm como norte a Constituição Federal de 1988 que, conforme o art. 26, I, inclui como bens dos Estados as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito. O texto constitucional também atribui a competência de legislar as regras sobre as águas à União, através do art.22, IV. Com o objetivo de cumprir seu dever constitucional, a União estabeleceu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) – Lei federal n. 9.433/1997, que define os fundamentos, objetivos, diretrizes e instrumentos necessários para a gestão dos recursos hídricos. No âmbito estadual, as 27 unidades da federação (UF) possuem uma Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH), que se diferem da PNRH por conter artigos voltados às águas subterrâneas e aquíferos. Mas apenas 12 UF legislaram especificamente sobre águas subterrâneas, e dentre elas está Minas Gerais (Fernandes & Oliveira 2018).

A PERH e o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SEGRH-MG) foram disciplinados através da lei 13.199/1999 na forma de legislação federal aplicável, visando assegurar o controle, pelos usuários atuais e futuros, do uso da água e de sua utilização em quantidade, qualidade e regime satisfatórios. De acordo com o art.18, I, são sujeitos a outorga pelo poder público, independente da natureza pública ou privada dos usuários, a extração de água de aquífero para consumo final ou insumo de processo produtivo. A outorga deve ser solicitada antes da implantação de qualquer intervenção que venha a alterar o regime, a quantidade ou a qualidade de um corpo de água, e será efetivada por ato do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), conferindo ao usuário o direito de uso do corpo hídrico, condicionado à disponibilidade de água (art. 19 e 21); tendo por objetivo assegurar os controles quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água (art.17). As infrações definidas pela lei, através do art.50, são:

- I - derivar ou utilizar recursos hídricos sem a respectiva outorga de direito de uso;
- II - ampliar e alterar empreendimento relacionado com a derivação ou a utilização de recursos hídricos que importe alterações no seu regime, quantidade e qualidade, ou iniciar a sua implantação, sem autorização do órgão ou da entidade da administração pública estadual integrante do SEGRH-MG;
- III - utilizar recursos hídricos ou executar obra ou serviço relacionado com eles, em desacordo com as condições estabelecidas na outorga;

IV - perfurar poços para a extração de águas subterrâneas ou operá-los sem a devida autorização, ressalvados os casos de vazão insignificante, assim definidos em regulamento;

V - fraudar as medidas dos volumes de água captados e a declaração dos valores utilizados;

VI - infringir instruções e procedimentos estabelecidos pelos órgãos e pelas entidades competentes da administração pública estadual que integram o SEGRH-MG;

VII - obstar ou dificultar a ação fiscalizadora das autoridades competentes, como referido no inciso anterior, no exercício de suas funções.

O decreto n. 41.578/2001 que regulamenta a lei 13.199/1999, tem uma importante menção em relação aos possíveis quadros de superexploração. No art.38, I, o decreto define que o processo de outorga será regulamentado pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH-MG), mediante proposta do IGAM, observado os critérios de outorga de água superficial e subterrânea, visando especialmente a mitigação dos efeitos da sobre-exploração, rebaixamento de lençol e contaminação dos aquíferos.

Em 2000 entrou em vigor a Lei de Águas Subterrâneas, n.13.771, que dispõe sobre a administração, a proteção e a conservação das águas subterrâneas de domínio do Estado de Minas Gerais. Referente à gestão, compete ao IGAM desenvolver ações visando promover o gerenciamento eficaz das águas subterrâneas, que segundo o art. 3, compreende:

I - a sua avaliação quantitativa e qualitativa e o planejamento de seu aproveitamento racional;

II - a outorga e a fiscalização dos direitos de uso dessas águas;

III - a adoção de medidas relativas à sua conservação, preservação e recuperação.

Em alguns casos específicos, existe a opção de cadastro de Uso Insignificante para captações subterrâneas, que tem como objetivo estimular e facilitar a regularização do uso da água. Os critérios estão dispostos na Deliberação Normativa CERH n° 09/2004, para captações subterrâneas por meio de cisternas, nascentes e surgências, e na Deliberação Normativa CERH n° 34/2010, para captações de águas subterrâneas por meio de poços tubulares. Porém, esse status não se aplica para todo o território estadual de maneira homogênea. O estado é dividido em Unidades de Planejamento de Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH), e as regiões possuem critérios diferentes (Figura 3.5). A UPGRH SF3, onde está inserido o município de Sete Lagoas, não há cadastro de Uso Insignificante para poços tubulares; para poços manuais, nascentes, surgências e cisternas, o valor de exploração de 10 m³/dia é determinado, como para todo o Estado. A adoção do Uso Insignificante para poços tubulares somente para unidades ao norte, noroeste e nordeste é justificada pela disponibilidade menor de água nessas regiões (principalmente águas superficiais).

Apesar da obrigatoriedade por lei do registro e/ou de autorização de extração (outorga) de água, mais de 88% dos poços tubulares são desconhecidos, ou seja, não estão em nenhum cadastro oficial dos

órgãos gestores, que têm a responsabilidade do controle do acesso e uso do recurso; e a quantidade de água extraída ou o seu valor são mascarados por essa condição de clandestinidade (Hirata *et al.* 2019).

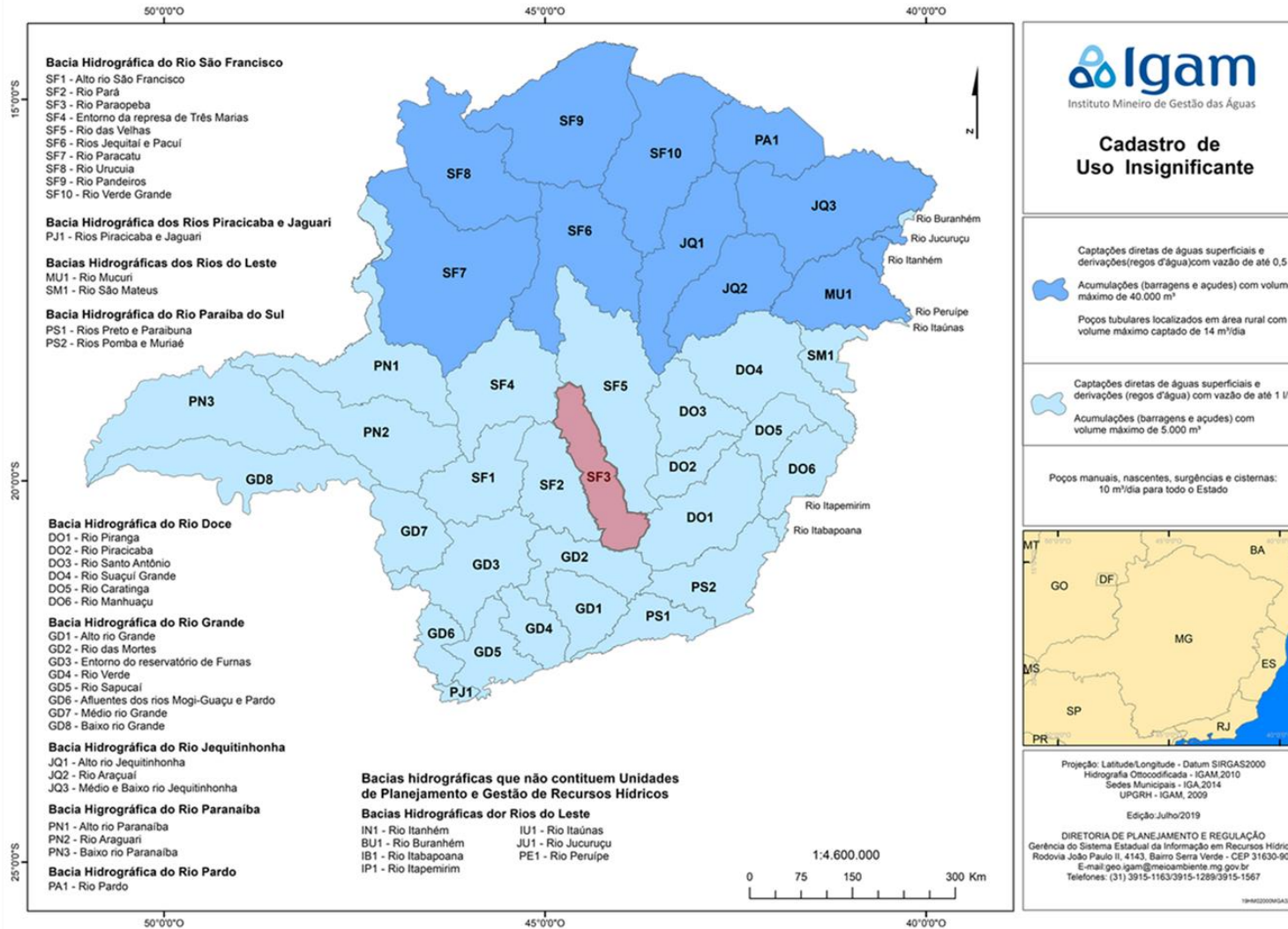


Figura 3.5 – Cadastro de uso insignificante do Estado de Minas Gerais, com destaque para bacia hidrográfica do rio Paraopeba (SF3), ao qual o município de Sete Lagoas está inserido (IGAM 2020).

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada nessa dissertação consiste em três etapas: 1) levantamento bibliográfico e compilação de dados; 2) confecção de mapas e tratamento de dados, e a integração dos produtos; e 3) a análise da evolução da exploração e elaboração de sugestões de gestão. Diferentes abordagens foram utilizadas e associadas neste estudo com o objetivo de compreender e avaliar as interações entre clima, evolução urbana e econômica, e as consequências geradas no aquífero cárstico. Tais abordagens são descritas a seguir e podem ser visualizadas no fluxograma apresentado na Figura 4.1.

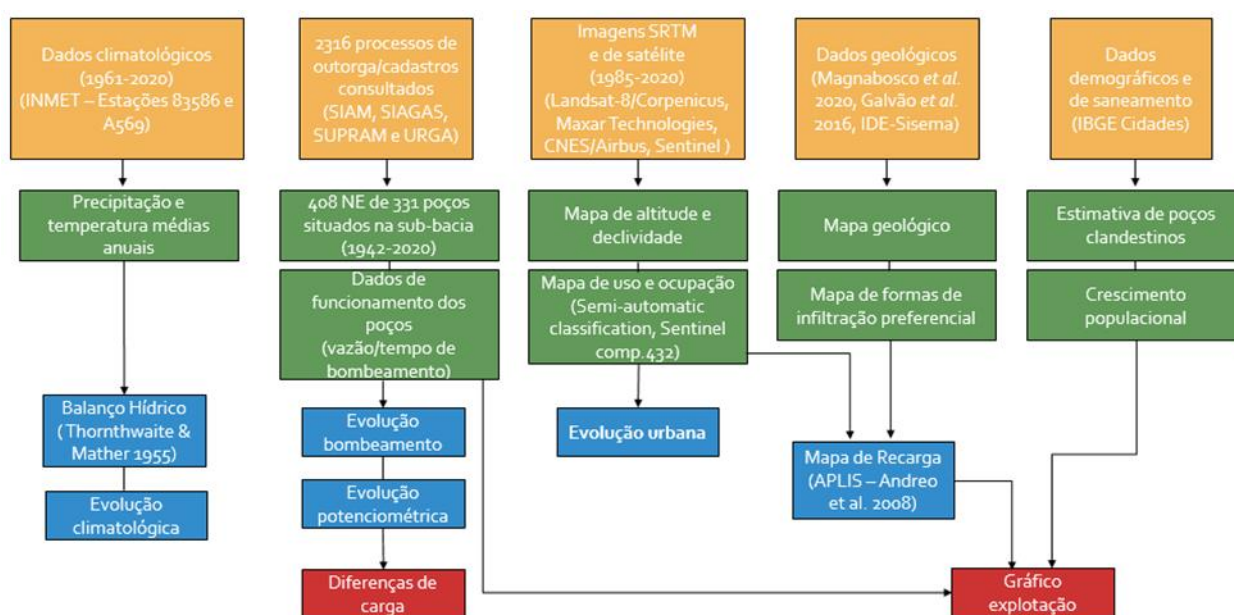


Figura 4.1 – Fluxograma dos métodos utilizados no estudo.

4.1 – LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO E COMPILAÇÃO DE DADOS

O levantamento bibliográfico teórico necessário ao desenvolvimento do estudo teve como foco referências sobre geologia, hidrogeologia e gestão de águas em meios cársticos e não cársticos, e sobre a evolução do crescimento econômico e populacional do município. Os meios de busca online utilizados para a pesquisa foram: sites de revistas científicas, repositórios institucionais, portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), Google Acadêmico e ResearchGate. Os materiais utilizados como fonte são artigos científicos, trabalhos acadêmicos (teses, dissertações e trabalhos de conclusão de curso), livros, além de informações contidas em sites de instituições públicas e organizações ligadas a temas relevantes ao estudo.

Todos os dados coletados foram reunidos em grupos temporais de 10 anos, com início na década de 1980 e finalizando em 2020. Assim, tem-se como objetivo analisar a evolução ao longo de 4 décadas.

As informações de poços tubulares tiveram como fonte dados já existentes gerados por instituições públicas, e dados coletados durante o desenvolvimento de outros trabalhos acadêmicos (Pessoa 1996, Galvão 2015, Assunção 2019, Magnabosco 2019, Alves *et al.* 2021). Os dados de instituições são provenientes de requerimentos de outorga e documentações a ele relacionadas (e.g. relatórios de perfuração, testes de bombeamento e de interferência de poços, certificados de outorga e formulários técnicos para uso de água subterrânea) e de cadastros realizados por pesquisas de campo. Foram analisados um total de 2.316 processos/cadastros de poços tubulares profundos situados no município.

Em relação aos dados demográficos, administrativos e históricos de Sete Lagoas, as fontes utilizadas foram: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Câmara Municipal de Sete Lagoas, Prefeitura Municipal de Sete Lagoas e sites jornalísticos com reportagens referentes ao município.

Os dados climatológicos utilizados foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referentes às estações meteorológicas presentes no município, que serão detalhados a seguir.

Para a análise de uso e ocupação do solo foram utilizadas imagens de satélite disponibilizadas online pelo Google Earth e pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (United States Geological Survey - USGS), assim como imagens SRTM utilizadas posteriormente para gerar mapas de hipsometria e de declividade, além da delimitação da sub-bacia de estudo por meio da ferramenta “*Channel network and drainage basins*” pertencente ao plugin SAGA, no software QGis 3.16 Hannover.

O mapa geológico utilizado para a avaliação da recarga foi proveniente do trabalho de Magnabosco *et al.* (2020), e os dados relacionados às feições cársticas (e.g. cavernas, sumidouros, dolinas e descontinuidades) tiveram como fonte o trabalho de Galvão *et al.* (2016) e a Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-SISEMA), disponível online.

4.2 – CONFECÇÃO DE MAPAS E TRATAMENTO DE DADOS

4.2.1 – Análise climatológica e balanço hídrico

A base de dados utilizada foi proveniente de estações climáticas meteorológicas pertencentes ao órgão governamental de monitoramento climático INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Foram utilizados dados médios mensais de precipitação (mm) e temperatura (°C) de janeiro de 1961 a julho 2016 da estação convencional código 83586 (UTM 578734mE, 7848093mS), e de agosto de 2016 a dezembro de 2020 da estação automática código A569 (UTM 586769mE, 787858mS), ambas em Sete Lagoas. Devido à falta de dados entre 1983 e 1992, os valores foram organizados em dois blocos, o primeiro sendo de 1961 a 1982 (22 anos), e o segundo de 1993 a 2020 (28 anos).

Baseado no método de Thornthwaite & Mather (1955), foram gerados os balanços hídricos, ano a ano, com a finalidade de verificar alterações significativas que pudessem influenciar a recarga do aquífero. O método utiliza a equação $P = Q + E + \Delta S$, onde P é a precipitação (mm); Q a vazão ou escoamento superficial (mm); E a evapotranspiração (mm); e ΔS é a variação do armazenamento no solo/rocha (mm). Os parâmetros de entrada para o método são as médias mensais de temperatura e precipitação, além do mesmo valor de capacidade de campo de 150 mm adotado por Galvão *et al.* (2018) e Alves *et al.* (2021) para a mesma região de estudo, valor definido por Koerner & Daniel (1997) para o tipo de solo e vegetação predominante na área de estudo. Como resultado, foram obtidos os valores anuais de déficit hídrico (WD, mm), excedente hídrico (WE, mm) e armazenamento hídrico (ΔS , mm).

Linhas de tendência foram geradas para precipitação, temperatura, armazenamento, déficit e excedente hídricos a fim de avaliar o comportamento dos parâmetros, excluindo-se dados fora do desvio padrão para evitar chuvas atípicas que poderiam distorcer a reta.

4.2.2 – Avaliação temporal da evolução urbana e de bombeamento

A avaliação da área urbana foi realizada utilizando imagens históricas disponíveis no Google Earth dos anos 1990, 2000, 2010 e 2020; referentes aos programas de imagens de satélite Corpenicus, Maxar Technologies, CNES/Airbus e Sentinel. A delimitação e cálculo das áreas foram realizados por meio de ferramentas do software QGIS 3.16 Hannover.

Os dados populacionais são provenientes do Censo Demográfico realizado de forma decenal pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), onde somente o valor apresentado para a última década é estimado, pois o censo de 2020 foi adiado devido à pandemia do COVID-19.

Os valores de bombeamento acumulados na década foram obtidos em bases de dados disponíveis por órgãos públicos, são eles: Sistema Integrado de Informações Ambientais de Minas Gerais (SIAM), Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Brasil (SIAGAS), Superintendência Regional de Meio Ambiente (SUPRAM) e Unidade Regional de Gestão das Águas (URGA). São dados referentes a poços públicos e privados que retiram água do aquífero cárstico, georreferenciados, que já tenham sido aprovados ou estejam em processo de aprovação de outorga, ou que tenham sido cadastrados em pesquisas de campo do Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

Grande parte dos poços selecionados possuem dados de vazão (284 poços do total de 331), mas para poços sem dados (47 poços - 14,2%) foram adotados valores médios de vazão calculados dentro do desvio padrão e de acordo com o uso da água declarado na documentação (e.g., consumo humano - 9,2 m³/h, consumo industrial - 16,7 m³/h, consumo rural - 10,7 m³/h, consumo humano/comercial - 3,7 m³/h, consumo humano/industrial - 17,3 m³/h, consumo humano/rural - 10 m³/h, consumo múltiplo - 9,1 m³/h e abastecimento urbano - 28,4 m³/h). Para o tempo de bombeamento utilizou-se o tempo médio de 11,3 h/dia aplicado pelo IGAM/SUPRAM para documentação incompleta. Para definir quais poços seriam

considerados para cada década de estudo, a data de referência considerada foi a da perfuração ou do primeiro registro em algum dos órgãos mencionados.

Com o objetivo de evitar a duplicidade de dados de um mesmo poço estar cadastrado em mais de um órgão, quando identificados poços muito próximos espacialmente, foram cruzados os dados de data de perfuração, profundidade e proprietário para averiguação e, assim, eliminar tal possível duplicidade.

4.2.3 – Análise das superfícies potenciométricas representativas

Superfícies potenciométricas ideais são geradas a partir de dados de nível de água estático, coletados em um mesmo momento, quando todos os poços da região estão estabilizados em repouso. Porém, estes requisitos não são possíveis de serem implementados para datas passadas. Com o objetivo de adquirir mapas potenciométricos representativos de cada década, a solução encontrada foi a utilização de dados provenientes da perfuração do poço e de testes de bombeamento feitos anteriormente.

As superfícies potenciométricas representativas de cada década, entre 1980 e 2020, foram elaboradas a partir de dados coletados pelo próprio órgão público durante vistorias ou dados de níveis estáticos de água fornecidos para a regulamentação do poço (níveis de água durante a perfuração e testes de bombeamento), seja para a obtenção de outorga ou para sua renovação. Os usuários precisam informar a presença de outros poços num raio de 200 m e, em caso afirmativo, é necessário um teste de interferência. Poços que declararam a presença de outro poço próximo foram descartados para este estudo.

Os mapas foram gerados com objetivo de visualizar a evolução da direção do fluxo de água subterrânea, das linhas equipotenciais e dos níveis de água.

Para esses mapas de superfície potenciométrica foram selecionados poços georreferenciados, com exploração apenas proveniente do Aquífero Cárstico Sete Lagoas e com níveis estáticos de água. A fim de evitar erros que resultassem em distorções nos mapas, na presença de dados muito discrepantes com poços próximos, o nível de água era comparado ao perfil litológico da região ou do próprio poço quando possível. Caso o dado se mostrasse incompatível com a profundidade do aquífero na localidade, o valor era descartado. As cargas hidráulicas foram determinadas a partir da diferença entre os dados de elevação do terreno do poço, obtidos a partir do Google Earth, e a profundidade do nível estático de água. Os valores selecionados após a avaliação foram interpolados pelo método de krigagem, do software Surfer 13, gerando isolinhas referentes às superfícies potenciométricas, que foram ajustadas e finalizadas manualmente utilizando o software Corel Draw 2020.

Os mapas de diferença de carga foram obtidos por meio da subtração das imagens raster dos mapas potenciométricos representativos, realizados pela ferramenta “Calculadora raster” do software QGIS 3.16 Hannover, e as isolinhas obtidas via ferramenta “Extrair contornos” do mesmo software.

4.2.4 – Cálculo de poços clandestinos

O ponto de partida para a estimativa de poços clandestinos é o recenseamento realizado pelo IBGE a cada 10 anos no Brasil. O censo demográfico é a principal fonte de informações sobre a população brasileira e suas condições de vida. O questionário respondido por residentes no território nacional investiga as principais características dos moradores e do domicílio. Em uma das questões, o residente é indagado sobre a forma de abastecimento de água do seu domicílio, tendo como opções as seguintes respostas: poço ou nascente na propriedade, poço ou nascente fora da propriedade, rede geral de abastecimento, outras fontes (cisternas, carro-pipa, rio, açude...). Para obter o valor total de poços no município, somou-se o número de afirmativas para as duas primeiras opções e subtraiu-se o número de nascentes identificadas em Sete Lagoas que, segundo Pessoa (1996) são 36.

O passo seguinte foi excluir desse total estimado na etapa anterior os poços cadastrados contabilizados a partir das bases de dados dos órgãos públicos (SIAM, SIAGAS, SUPRAM e URGAs). Para esse cálculo, foram considerados, para essa etapa, somente os poços com dados até 2010, pois o Censo de 2020 foi adiado devido à pandemia do COVID-19.

4.2.5 – Avaliação e cálculo da recarga

A avaliação e o cálculo da recarga foram realizados a partir da adaptação do método APLIS, de Andreo et al. (2008), por se tratar de uma técnica que considera as particularidades hidrogeológicas de aquíferos cársticos, além de permitir a visualização da distribuição espacial da taxa de recarga. O método consiste na classificação de 6 parâmetros influentes na taxa de recarga, e que recebem pesos diferentes de acordo com essa influência. Os pesos adotados são os mesmos adaptados e utilizados por Magnabosco *et al.* (2020), apresentados na Fig. 4.

Todos os mapas temáticos do método foram feitos utilizando o software QGIS 3.16 Hannover e suas ferramentas. Os parâmetros são: altitude (A), declividade (P), litologia (L), formas de infiltração (I), tipo de solo (S) e fator de correção da unidade hidrogeológica (Fh). Houve duas adaptações ao método proposto por Magnabosco *et al.* (2020). A primeira foi a utilização do mapa de uso e ocupação, gerado por meio de uma classificação semi-automática (plugin SPC Versão 7.8.30-Matera presente no software QGIS 3.16 Hannover) a partir de uma imagem Landsat 8, com resolução de 30 m, utilizando a composição RGB 432, em substituição ao mapa NDVI. A segunda adaptação foi a utilização do mapa de exposição de calcários, em substituição ao mapa litológico, onde as litologias foram delimitadas e separadas em calcários expostos, calcários cobertos por sedimentos cenozoicos, calcários cobertos por metapelitos e embasamento aflorante. Essas informações foram possíveis com base no modelo geológico 3D detalhado feito em Leapfrog, desenvolvido por Magnabosco *et al.* (2020). Para o mapa de formas de infiltração foi utilizado um buffer de 250 m.

Após a confecção dos mapas temáticos, o mapa final de recarga foi obtido a partir da combinação destes utilizando a equação: (% de precipitação) = $[(A + P + 3L + 2I + S) / 0,9] \times Fh$. O resultado foi, então, reclassificado separando 5 níveis de taxa de recarga, variando de “muito baixa” a “muito alta”.

4.3 – ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA EXPLOTAÇÃO E ELABORAÇÃO DE SUGESTÕES DE GESTÃO

A partir da análise conjunta da evolução climática, urbana, de bombeamento via poços tubulares, de superfície potenciométrica e de diferença de cargas, além da avaliação territorial da recarga, foi possível estabelecer uma relação temporal e espacial entre acontecimentos históricos, geotécnicos e climáticos e a evolução hidrodinâmica do aquífero cárstico.

Linhas de tendência referentes aos dados climáticos e o conhecimento do mapa de recarga e seus valores de taxa de infiltração permitem o planejamento consciente da situação global do aquífero, visando mitigar os efeitos da exploração intensiva, agora bem definidas pelo estudo.

A elaboração de sugestões de gestão hídrica foi baseada nos resultados obtidos no estudo, em estudos desenvolvidos em outras localidades que também possuem problemas de exploração intensiva, e na legislação vigente no município.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussão são apresentados em formato de artigo científico submetido a uma revista científica, conforme abaixo:

Causas e Consequências da Superexploração em uma Cidade Brasileira em Contexto Hidrogeológico Cárstico

Camila Schuch¹, Paulo Galvão^{1,2}, Marília Carvalho de Melo^{3,4}, Simone Pereira¹

Resumo

A extração intensiva de aquíferos cársticos, mais heterogêneos e anisotrópicos que outros tipos de aquíferos, resulta no potencial esgotamento das reservas hídricas, causando efeitos adversos diretos, como subsidência de terrenos, secas de nascentes e lagoas, contaminação de água, e indiretamente, em problemas ambientais, socioeconômicos e políticos. Muitas das vezes, as causas e consequências são reflexos de crescimentos populacionais e econômicos desordenados que, sem o conhecimento hidro(geo)lógico prévio da região, aumentam tanto a demanda por água quanto o descontrole de seu uso. Todas essas questões são reconhecidas de longa data no município de Sete Lagoas, Estado de Minas Gerais, região sudeste do Brasil. Utilizando-se de dados de estudos anteriores e de órgãos públicos, analisou-se a evolução urbana, industrial, climatológica e de comportamento do aquífero durante os últimos 40 anos (1980-2020) a fim de reconhecer os fatores influentes na superexploração e desde quando eles atuam. Os resultados indicam que o município se enquadra no status de superexploração desde a década de 2000, quando o volume explorado excedeu a recarga média do aquífero, resultando em efeitos adversos. A expansão urbana e industrial exigiu uma maior demanda de água que foi suprida por poços tubulares construídos de forma desordenada, muitos deles concentrados em regiões que atualmente apresentam cones de rebaixamento de dimensões quilométricas. Apesar da clandestinidade corresponder a 67% dos poços, o que restringe em muito o acesso a dados vitais para gestão hídrica do município, foi constatado que o volume bombeado seja equivalente a apenas 5% do total explorado. Provavelmente a crise no abastecimento irá se agravar, pois as previsões climatológicas indicam recargas cada vez menores e as poucas áreas com alta taxa de infiltração não recebem nenhum tipo de proteção.

Keywords: Hidrogeologia cárstica; Gerenciamento hídrico; Superexploração; Bacia hidrográfica; Variação climática

¹ (1) Universidade Federal de Ouro Preto; (2) Universidade Federal de Minas Gerais; (3) Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável MG; (4) Universidade Vale do Rio Doce

5.1 – INTRODUÇÃO

Aquíferos cársticos se desenvolvem em rochas solúveis, como calcários, dolomitos e mármore, abastecendo cerca de 20-25% da população global (Ford & Williams 2007). O bombeamento intensivo desses aquíferos, reflexo da uma maior demanda por água das sociedades modernas, resulta não apenas no potencial esgotamento das reservas hídricas, mas também causam efeitos hidrogeológicos, geotécnicos, sociais, econômicos e ambientais adversos.

Essas consequências aumentam consideravelmente nos períodos de estiagem, já que a maioria dos sistemas cársticos é recarregada a partir de águas meteóricas que circulam em profundidades rasas e com tempos de residência curtos no subsolo (Ford & Williams 2007). Por serem aquíferos especialmente sensíveis às mudanças naturais e antropogênicas (Younos *et al.* 2019), o desenvolvimento e gestão de cidades situadas sobre rochas carstificadas devem ser diferenciados (Galvão *et al.* 2017).

O termo “superexploração” não é suficientemente definido e caracterizado pelo meio acadêmico. Outros termos são utilizados em situações de exploração intensiva, como “*superabstraction*” (Margat & Gun 2013), “*safe yield*” (Todd 1959, Domenico 1972, Custodio 2002), “*sustainable yield*” (Sophocleous 1997, Alley & Leake 2004, Maimone 2004, Seward *et al.* 2006, Sen 2015) ou “*intensive use*” (Llamas & Custodio 2003). Entretanto, há consenso de que a superexploração é resultado de uma má gestão onde os malefícios superam os benefícios. Ou seja, o uso intensivo de água subterrânea, sem o devido controle e planejamento, resulta em um desequilíbrio onde os benefícios da exploração não compensam os efeitos colaterais negativos gerados por ela. A real caracterização da superexploração deve considerar, necessariamente, a avaliação dos custos dos impactos ecológicos, sociais e econômicos que essa exploração provoca, ademais do próprio balanço de entradas e saídas de água do aquífero (Hirata *et al.* 2010). Esses impactos negativos podem ser diretos (rebaixamento, compactação do terreno, compartimentação ou exaustão do aquífero, deterioração da qualidade da água, abandono de poços, modificação induzida de regimes de rios, ressecamento de áreas úmidas, aumento dos custos de exploração e problemas legais de direitos de uso) e indiretos (problemas na rede de esgoto e rupturas de infraestruturas, salinização do solo, desertificação, indução de subsidência e colapsos, mudança nas propriedades físicas do aquífero e indução de contaminação a grandes distâncias) (Pulido 2001). Normalmente esses efeitos ocorrem com maior frequência quando a taxa média de captação do aquífero é maior ou próxima da taxa média de recarga por alguns anos (Custodio 2002).

Younos (2019) cita que atualmente 18 países (hospedando metade da população do mundo) estão bombeando aquíferos de forma intensiva, e que dentre os “10 principais” países em uso de água subterrânea apontados por Margat & Gun (2013), sete estão usando águas cársticas em quantidades consideráveis (EUA, México, China, Arábia Saudita, Irã, Indonésia e Turquia). Além destes, é possível citar países como a Espanha, Líbia, Índia, Polônia, Israel e em menor escala no Brasil. Estes países já possuem regiões que enfrentam dificuldades relacionadas à utilização de águas subterrâneas sem

planejamento (Pulido 2001, Custodio 2002, Molina *et al.* 2009).

No caso do Brasil, a demanda de água subterrânea para os abastecimentos público, industrial e agrícola cresce a cada ano. Uma das razões é a baixa disponibilidade hídrica superficial em algumas regiões do país, especialmente as cársticas, naturalmente caracterizadas por redes de drenagens pouco desenvolvidas. Esse cenário é observado comumente no estado de Minas Gerais, região sudeste do país, em municípios como Lagoa Santa, Pains, Arcos, Montes Claros e, principalmente, em Sete Lagoas.

Atualmente, o município de Sete Lagoas encontra-se em um momento crítico quanto ao serviço de fornecimento de água, principalmente em épocas de estiagem. A água necessária para as atividades do município provém prioritariamente do Sistema Aquífero Cárstico Sete Lagoas (Galvão *et al.* 2015), sendo outra pequena parcela abastecida pelo rio das Velhas. Porém, o rápido crescimento industrial e populacional nas últimas quatro décadas aumentou a demanda de água da região, levando a acreditar que sua exploração possivelmente está excedendo a capacidade de recarga do aquífero, o que resultaria em um quadro de superexploração, juntamente com algumas consequências observáveis ao decorrer dos anos.

Em Sete Lagoas é possível perceber alguns efeitos que podem estar ligados à superexploração, como lagoas que passaram de perenes para intermitentes no período de estiagem (Assunção 2019, Alves *et al.* 2020); alguns condutos cársticos totalmente em zonas não saturadas, devido ao grande cone de rebaixamento gerado por décadas de altas vazões de bombeamento; e problemas estruturais gerados por abatimento do solo (Galvão *et al.* 2015).

A implementação de medidas de gerenciamento e proteção das águas subterrâneas precisa de uma avaliação quantitativa da evolução e dos efeitos nos aquíferos, baseada em estudos multidisciplinares detalhados, que devem ser apoiados por dados confiáveis, sistematicamente coletados e avaliados tecnicamente para servir de apoio ao gerenciamento sustentável da água e possíveis medidas corretivas no nível regional ou local (Custodio 2002, Younos *et al.* 2019). Assim, esse artigo pretende definir se Sete Lagoas realmente enfrenta uma superexploração do aquífero cárstico, via estudos comparativos sobre o histórico de uso e ocupação do solo, evolução da superfície potenciométrica ao longo de décadas, modelo hidrogeológico conceitual associado a dados do aquífero e de produção dos poços. Além de identificar quais fatores contribuíram para esse cenário e quais os agentes responsáveis: clima, indústria ou população; bem como direcionar ações estratégicas para amenizar/reverter o quadro de superexploração.

5.2 – ÁREA DE ESTUDO

O estudo tem como foco o município de Sete Lagoas, de 537 km², e uma sub-bacia interna de

356 km² de área (porção sudoeste da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Jequitibá contida no limite municipal), escolhida por ser a região que abrange as áreas central urbana e nordeste industrial (Fig. 5.1), na qual está a maior concentração populacional e de poços de abastecimento, resultando nas maiores taxas de bombeamento do município. Sete Lagoas está a cerca de 70 km a noroeste de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, na Região Sudeste do Brasil. Com a população estimada em 242 mil habitantes (IBGE 2020), o município de médio porte teve uma grande expansão urbana e econômica nas últimas décadas, o que consequentemente aumentou a população, assim como a demanda por água (Botelho 2008, Santos 2016).

O abastecimento público, administrado pelo Serviço de Abastecimento de Água e Esgoto (SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto), provém principalmente de água subterrânea explorada por 190 poços tubulares, em sua maioria provenientes do Aquífero Cárstico Sete Lagoas (Galvão 2015), com uma menor parcela (1/3) retirada de água superficial do rio das Velhas. Existem ainda 280 poços privados como fonte de abastecimento de água para usos doméstico, rural, comercial e industrial. A sub-bacia estudada contém 331 poços retirando água exclusivamente do aquífero cárstico, representando 70% dos poços do município.

Geologicamente, a área está no contexto do Cráton São Francisco, estabelecido durante o neoproterozoico e estabilizado no fim do ciclo transamazônico (Almeida 1977, Alkmim 2004). As rochas do embasamento cratônico granito-gnáissico-migmatítico pertencem ao Complexo Belo Horizonte e estão predominantemente ao sul do município, compondo o aquífero fissural de pouca expressão local. Sedimentada sobre o embasamento tem-se a Formação Sete Lagoas, composta por rochas carbonáticas (predominantemente calcários, além de dolomitos e pelitos) portadora do aquífero cárstico responsável pelo maior volume de águas subterrâneas da região, localizadas principalmente na faixa central e sul municipal. Sobrepostas aos calcários há rochas metapelíticas da Formação Serra de Santa Helena, em geral siltitos, argilitos e ardósias, localizados em toda região central e norte, agindo hidrogeologicamente como um aquífero. Estratigraficamente acima, tem-se sedimentos inconsolidados cenozoicos em forma de coberturas detrítico-lateríticas, terraços aluviais e aluviões, formadores de aquíferos granulares de pequena representatividade local (Galvão *et al.* 2016).

A hidrogeologia regional de Sete Lagoas foi estudada por Pessoa (1996), Galvão (2015) e Magnabosco (2019), desenvolvendo trabalhos acerca de modelos hidrogeológicos conceituais, características hidrogeológica da região, e consequências e implicações da carstificação na área urbana. O fluxo subterrâneo ocorre de maneira preferencial acompanhando o acamamento das rochas carbonáticas, seguindo a direção NE, através de condutos formados pela dissolução dos calcários. Também ocorrem fraturas subverticais, aumentando a permeabilidade do aquífero. Por concentrar sedimentos inconsolidados sobre o calcário, associado a um hiato deposicional ou erosivo da Formação Serra de Santa Helena, a região central do município é a mais carstificada devido às águas acidificadas

pelo ácido húmido proveniente dos sedimentos. A região urbana central desenvolveu um grande cone de rebaixamento em resposta à grande concentração de poços de alta taxa de bombeamento (Galvão *et al.* 2015).

Outros estudos relacionados ao aquífero cárstico e suas conexões já foram conduzidos, como o de Galvão *et al.* (2017) que demonstraram por meio de assinaturas isotópicas a interligação da lagoa Paulino e do aquífero cárstico. Neste caso, a lagoa é uma das fontes de contaminação de nitrato encontradas na região central urbana. Ademais, Assunção (2019) confirmou a contaminação a partir de sumidouros presentes no interior da lagoa do Matadouro, sendo zonas de recargas autogênicas. Alves *et al.* (2021) comprovaram a conexão hidráulica da lagoa Grande com o aquífero cárstico ao interligar a perda de sua área superficial ao bombeamento excessivo que impacta diretamente na superfície potenciométrica local.

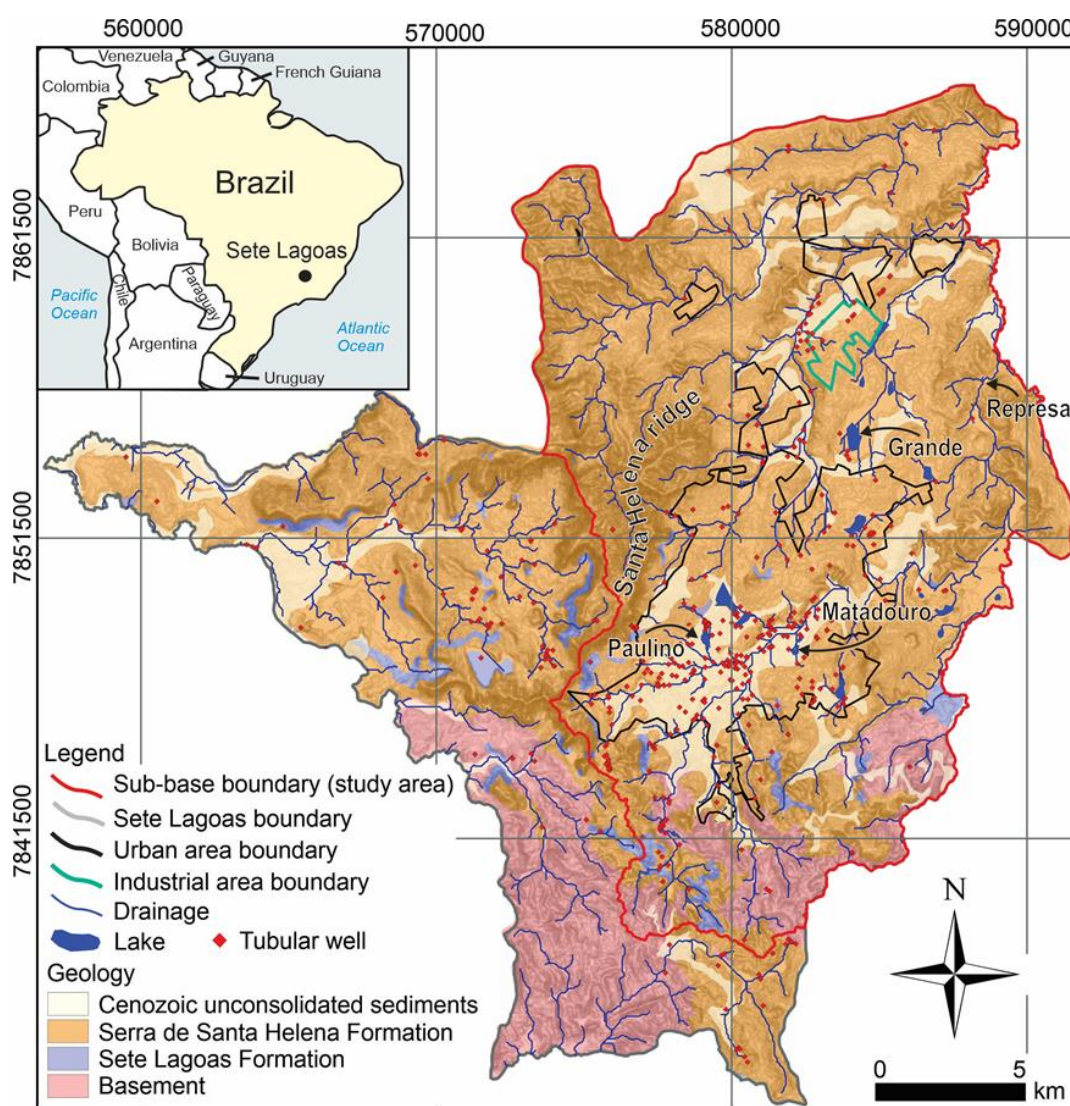


Figura 5.1 - Município de Sete Lagoas, Brasil, destacando a sub-bacia estudada (limites em vermelho), os limites urbano central (linha preta) e industrial nordeste (linha verde), os poços tubulares (pontos vermelhos), bem como as lagoas e a geologia (modificado de Galvão *et al.*, 2016).

5.3 – MATERIAIS E MÉTODOS

5.3.1 – Análise climatológica e balanço hídrico

A base de dados utilizada foi proveniente de estações climáticas meteorológicas pertencentes ao órgão governamental de monitoramento climático INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Foram utilizados dados médios mensais de precipitação (mm) e temperatura (°C) de janeiro de 1961 a julho 2016 da estação convencional código 83586 (UTM 578734mE, 7848093mS), e de agosto de 2016 a dezembro de 2020 da estação automática código A569 (UTM 586769mE, 787858mS), ambas em Sete Lagoas.

Baseado no método de Thornthwaite & Mather (1955), foram gerados os balanços hídricos, ano a ano, com a finalidade de verificar alterações significativas que pudessem influenciar a recarga do aquífero. O método utiliza a equação $P = Q + E + \Delta S$, onde P é a precipitação (mm); Q a vazão ou escoamento superficial (mm); E a evapotranspiração real (mm); e ΔS é a variação do armazenamento no solo/rocha (mm). Os parâmetros de entrada para o método são as médias mensais de temperatura e precipitação, além do mesmo valor de capacidade de campo de 150 mm adotado por Galvão et al. (2018) e Alves et al. (2021) para a mesma região de estudo. Como resultado, foram obtidos os valores anuais de déficit hídrico (WD, mm), excedente hídrico (WE, mm) e armazenamento hídrico (ΔS , mm).

Linhas de tendência foram geradas para precipitação, temperatura, armazenamento, déficit e excedente hídricos a fim de avaliar o comportamento dos parâmetros, excluindo-se dados fora do desvio padrão para evitar chuvas atípicas que poderiam distorcer a reta.

5.3.2 – Avaliação temporal da evolução urbana e de bombeamento

Na avaliação da área urbana utilizaram-se imagens históricas do Google Earth dos anos 1990, 2000, 2010 e 2020. A delimitação e cálculo das áreas foram realizados por meio de ferramentas do software QGIS 3.16 Hannover.

Os dados populacionais são provenientes do Censo Demográfico realizado de forma decenal pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), onde somente o valor apresentado para a última década é estimado, pois o censo de 2020 foi adiado devido à pandemia do COVID-19.

Os valores de bombeamento acumulados na década foram obtidos com base em dados de órgãos públicos: Sistema Integrado de Informações Ambientais de Minas Gerais (SIAM), Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Brasil (SIAGAS), Superintendência Regional de Meio Ambiente (SUPRAM) e Unidade Regional de Gestão das Águas (URGA). São dados referentes a poços públicos e privados que retiram água do aquífero cárstico, georreferenciados, que já tenham sido aprovados ou estejam em processo de aprovação de outorga, ou que tenham sido cadastrados em pesquisas de campo do Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

Grande parte dos poços selecionados possuem dados de vazão (284 poços do total de 331), mas

para poços sem dados (47 poços, 14,2%) foram adotados valores médios de vazão calculados dentro do desvio padrão e de acordo com o uso da água declarado na documentação (e.g., consumo humano 9,2 m³/h, consumo industrial 16,7 m³/h, consumo rural 10,7 m³/h, consumo humano/comercial 3,7 m³/h, consumo humano/industrial 17,3 m³/h, consumo humano/rural 10 m³/h, consumo múltiplo 9,1 m³/h e abastecimento urbano 28,4 m³/h). Para definir quais poços seriam considerados para cada década de estudo, a data de referência considerada foi a da perfuração ou do primeiro registro em algum dos órgãos mencionados.

Com o objetivo de evitar a duplicidade de dados de um mesmo poço estar cadastrado em mais de um órgão, quando identificados poços muito próximos espacialmente, foram cruzados os dados de data de perfuração, profundidade e proprietário para averiguação e, assim, eliminar tal possível duplicidade.

5.3.3 – Análise das superfícies potenciométricas representativas

Superfícies potenciométricas ideais são geradas a partir de dados de nível de água estático, coletados em um mesmo momento, quando todos os poços da região estão estabilizados em repouso. Porém, estes requisitos não são possíveis de serem implementados para datas passadas. Com o objetivo de construir mapas potenciométricos representativos de cada década, a solução encontrada foi a utilização de dados provenientes da perfuração do poço e de testes de bombeamento feitos pelos proprietários ao longo dos anos e fornecidos aos órgãos reguladores.

As superfícies potenciométricas representativas de cada década, entre 1980 e 2020, foram elaboradas a partir de dados coletados pelo próprio órgão público durante vistorias ou dados de níveis estáticos de água fornecidos para a regulamentação do poço (níveis de água durante a perfuração e testes de bombeamento), seja para a obtenção de outorga ou para sua renovação. Os usuários precisam informar a presença de outros poços num raio de 200 m e, em caso afirmativo, é necessário um teste de interferência. Um total de 7 poços foram descartados por declarar a presença de outro poço próximo. Os mapas foram gerados com objetivo de visualizar a evolução dos níveis de água, da direção do fluxo de água subterrânea e das linhas equipotenciais.

Para esses mapas de superfície potenciométrica foram selecionados poços georreferenciados, com exploração apenas proveniente do Aquífero Cárstico Sete Lagoas e com níveis estáticos de água. A fim de evitar erros que resultassem em distorções nos mapas, na presença de dados muito discrepantes com poços próximos, o nível de água era comparado ao perfil litológico da região ou do próprio poço quando possível. Caso o dado se mostrasse incompatível com a profundidade do aquífero na localidade, o valor era descartado. As cargas hidráulicas foram determinadas a partir da diferença entre os dados de elevação do terreno do poço, obtidos a partir do Google Earth, e a profundidade do nível estático de água. Os valores selecionados após a avaliação foram interpolados pelo método de krigagem, do software Surfer 13, gerando isolinhas referentes às superfícies potenciométricas, que foram ajustadas e finalizadas

manualmente utilizando o software Corel Draw 2020. Devido à escala regional, nesta etapa as lagoas e rios não foram considerados influentes para o ajuste das linhas equipotenciais. Entretanto, para trabalhos em escala local como os realizados por Assunção (2019) e Alves *et al.* (2021) é de fundamental importância levá-las em consideração.

Os mapas de diferença de carga foram obtidos por meio da subtração das imagens raster dos mapas potenciométricos representativos, realizados pela ferramenta “Calculadora raster” do software QGIS 3.16 Hannover, e as isolinhas via ferramenta “Extrair contornos” do mesmo software.

5.3.4 – Cálculo de poços clandestinos

O ponto de partida para a estimativa de poços clandestinos é o recenseamento realizado pelo IBGE a cada 10 anos no Brasil. O censo demográfico é a principal fonte de informações sobre a população brasileira e suas condições de vida. O questionário respondido por residentes no território nacional investiga as principais características dos moradores e do domicílio. Em uma das questões, o residente é indagado sobre a forma de abastecimento de água do seu domicílio, tendo como opções as seguintes respostas: poço ou nascente na propriedade, poço ou nascente fora da propriedade, rede geral de abastecimento, outras fontes (cisternas, carro-pipa, rio, açude, etc.). Para obter o valor total de poços no município, somou-se o número de afirmativas para as duas primeiras opções e subtraiu-se o número de nascentes identificadas em Sete Lagoas que, segundo Pessoa (1996), são 36 nascentes.

O passo seguinte foi excluir desse total estimado na etapa anterior os poços cadastrados contabilizados a partir das bases de dados dos órgãos públicos (SIAM, SIAGAS, SUPRAM e URGAs). Para esse cálculo, foram considerados somente os poços com dados até 2010, pois o Censo de 2020 havia sido adiado devido à pandemia do COVID-19.

5.3.5 – Avaliação e cálculo da recarga

A avaliação e o cálculo da recarga foram realizados a partir da adaptação do método APLIS, de Andreo *et al.* (2008), por se tratar de uma técnica que considera as particularidades hidrogeológicas de aquíferos cársticos, além de permitir a visualização da distribuição espacial da taxa de recarga. O método consiste na classificação de 6 parâmetros influentes na taxa de recarga, e que recebem pesos diferentes de acordo com essa influência. Os pesos, mapas parâmetros e equação adotados são os mesmos adaptados à realidade de um clima tropical e utilizados para a mesma região por Magnabosco *et al.* (2020), apresentados na Fig. 4.

Todos os mapas temáticos do método foram feitos utilizando o software QGIS 3.16 Hannover e suas ferramentas. Os parâmetros são: altitude (A), declividade (P), litologia (L), formas de infiltração (I), tipo de solo (S) e fator de correção da unidade hidrogeológica (Fh). Houve duas adaptações ao método

original. A primeira foi a utilização do mapa de uso e ocupação, gerado por meio de uma classificação semi-automática a partir de uma imagem Landsat 8 utilizando a composição RGB 432, em substituição ao mapa pedológico detalhado inexistente para região. A segunda adaptação foi a utilização do mapa de exposição de calcários, em substituição ao mapa litológico, onde as litologias foram delimitadas e separadas em calcários expostos, calcários cobertos por sedimentos cenozoicos, calcários cobertos por metapelitos e embasamento aflorante. Essas informações foram possíveis com base no modelo geológico 3D detalhado feito em Leapfrog, desenvolvido por Magnabosco *et al.* (2020).

Após a confecção dos mapas temáticos, o mapa final de recarga foi obtido a partir da combinação destes utilizando a equação: Recarga (% de precipitação) = $[(A + P + 3L + 2I + S) / 0,9] \times Fh$. O resultado foi, então, reclassificado separando cinco níveis de taxa de recarga, variando de “muito baixa” a “muito alta”.

5.4 – RESULTADOS

5.4.1 – Climatologia e balanço

Devido à ausência de dados de precipitação e temperatura entre 1983 e 1992, os dados do balanço hídrico foram analisados em dois períodos (1961-1982 e 1993-2020) (Fig. 5.2). A precipitação média anual para o município é 1311 mm, onde o primeiro e o segundo blocos apresentam valores de 1311,9 mm e 1310,3 mm, respectivamente.

Com o objetivo de verificar chuvas anuais atípicas, foram calculados os desvios-padrão maior e menor para cada período, chegando aos valores 1003,4 e 1620,3 para o primeiro período e 1063,9 e 1556,8 para o segundo período (linhas tracejadas pretas no gráfico a, Fig. 5.2). Assim, majoritariamente, as chuvas anuais estão dentro dos desvios-padrão, sendo que os anos atípicos no primeiro período são 1962, 1965 e 1979 (chuvosos - 1966,8 mm, 1763,3 mm e 1796,8 mm; respectivamente) e 1963 (seco - 463,9 mm), e no segundo período, os anos atípicos são 1997 e 2009 (chuvosos - 1645 mm e 1635,1 mm; respectivamente) e 2014 e 2017 (seco - 551,2 mm e 823,0 mm; respectivamente). Entretanto, ao analisar as retas de tendência para ambos os períodos, notam-se quedas no volume de chuva ao longo dos anos (período 1: $y = -11,422x + 1412,7$; período 2: $y = -4,1566x + 1540,9$). O desvio padrão menor no segundo período (246,4), quando comparado ao primeiro período (308,4), indica menor variação em relação aos volumes precipitados, e a diferença entre as inclinações das retas (-11,422 e -4,1566) indica um aumento entre os períodos. É importante ressaltar que o padrão de distribuição no gráfico não permite a percepção de tendência de aumento ou diminuição das precipitações ao longo dos anos.

A temperatura média anual para o município é 21,4°C; com valores de 20,9°C e 21,8°C para o primeiro e segundo períodos, respectivamente. Assim como quando comparadas as médias entre períodos, as retas de tendência indicam um aumento nas temperaturas (período 1: $y = 0,0025x + 20,906$; período 2: $y = 0,0352x + 21,256$). A inclinação da reta observada para os últimos 28 anos (0,0352) indica

um aumento em relação aos primeiros 22 anos analisados (0,0025) (gráfico a, Fig. 5.2). Diferentemente dos padrões de distribuição de precipitação, o padrão observado na temperatura indica um aquecimento evidente na região.

Com relação ao balanço hídrico, seguem os resultados para cada período: valores médios anuais de 1085,4 e 1035,3 mm para o armazenamento hídrico (média 1057,3 mm), 519,2 e 467 mm para excedente hídrico (média 489,9 mm), e 186,9 e 207,2 mm para déficit hídrico (média 198,3 mm). Como previsto, os anos com maior excedente hídrico coincidem com os anos chuvosos (1962 – 1203 mm e 1997 - 740,6 mm) e os anos de menor excedente e, consequentemente, maior déficit hídrico, com os anos secos (1963 – 0/471,3 mm e 2014 – 0/546,1 mm). O menor déficit hídrico no primeiro período é em 1979 (56,6 mm), enquanto que no segundo período é em 1997 (118,3 mm). Os anos de maior armazenamento hídrico para os períodos 1 e 2 são 1979 (1421,2 mm) e 2009 (1346,4 mm), e os menores valores são observados em 1963 (235,1 mm) e 2014 (90 mm) (gráfico b, Fig. 5.2).

As retas de tendências, no caso do excedente hídrico, sempre apresentam quedas entre os períodos, levemente acentuada no primeiro período (período 1: $y = -11,861x + 655$; período 2: $y = -7,891x + 581$) (linha tracejada azul, Fig.5.2). No caso do déficit hídrico, entre 1961 e 1982, há uma leve tendência de queda, mas entre 1993 e 2020, o déficit hídrico aumenta (bloco 1 $y = -4,063x + 234$; bloco 2 $y = 3,482x + 157$) (linha tracejada laranja). Para o armazenamento hídrico é observada a maior alteração na tendência, com aumento do armazenamento no primeiro período e queda desse parâmetro no segundo período (período 1: $y = 11,676x + 951$; período 2: $y = -5,832x + 1120$) (linha tracejada verde) (gráfico b, Fig. 5.2).

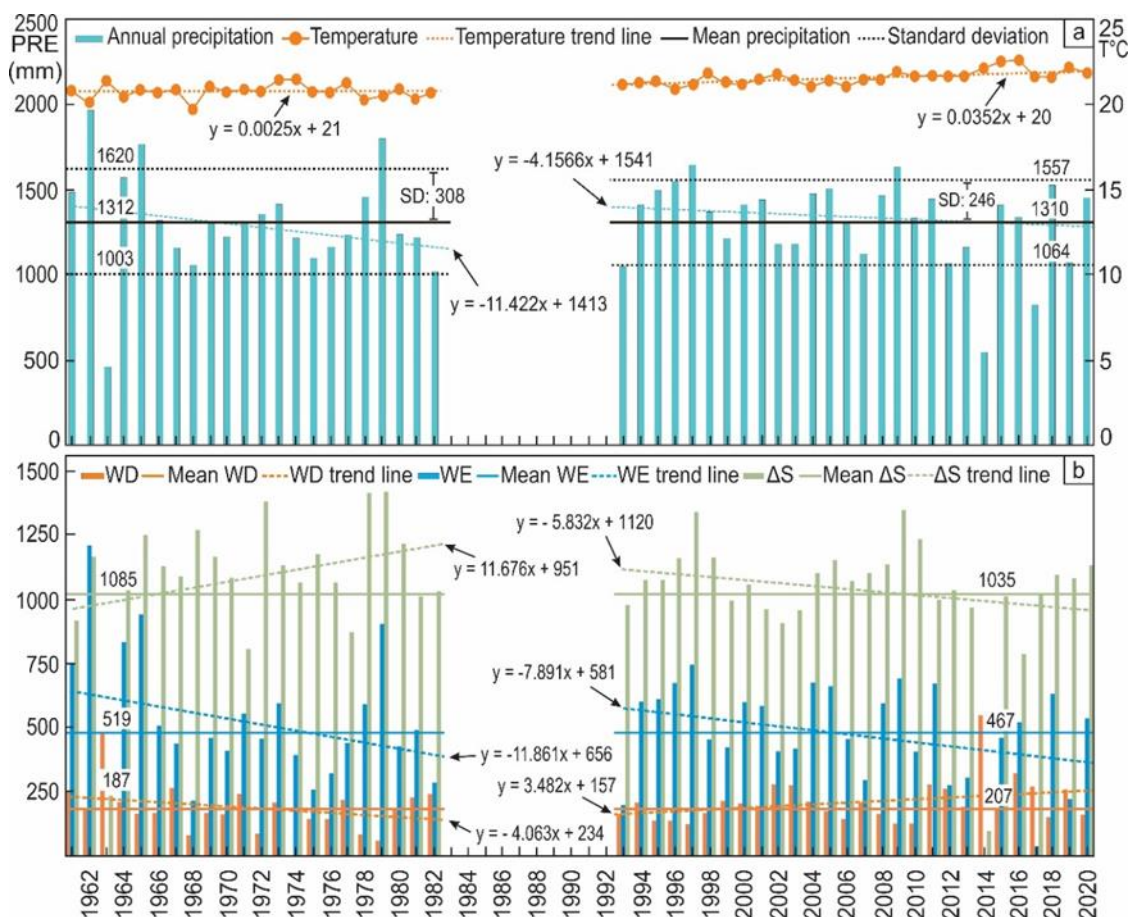


Figura 5.2 - Distribuições das linhas de tendências e evoluções de valores médios de precipitação (PRE, mm) e temperatura (T, °C) (a), e de déficit hídrico (WD, mm), excedente hídrico (WE, mm) e armazenamento hídrico (ΔS, mm) (b). Ambos os gráficos com dados referentes ao período de 1961 a 2020, organizados em dois grupos (1961-1982 e 1993-2020).

5.4.2 – Evolução urbana e distribuição de bombeamento

A expansão urbana acontece inicialmente próxima às lagoas na região central da sub-bacia (e.g. Paulino, Matadouro, Fig. 5.1). No fim da década de 1980, a área urbana ocupa aproximadamente 42 km², abrigoando a maioria dos 144 mil habitantes. Os 129 poços existentes nesse período bombeiam quase 90 mil m³/d e estão concentrados na área urbana, com alguns poucos poços de baixa vazão dispersos na área rural (Fig. 5.3a).

Durante a década de 1990, a área urbana se estende para 56 km² (aumento de 34%), com a população chegando a quase 185 mil habitantes (aumento de 28%). Como consequência, o bombeamento total atinge 135 mil m³/d (alta de 50%) por meio de 198 poços distribuídos principalmente na área urbana, que começa a se expandir para a região nordeste do município, onde se inicia o desenvolvimento de um polo industrial (Fig. 5.3a).

Nos anos 2000, o polo industrial se consolida, e a mancha urbana atinge 66 km² (alta de 17%). A população aumenta 16%, chegando a 214 mil habitantes, e a expansão industrial gera um acréscimo de

25% no bombeamento, totalizando 169 mil m³/d. Os 273 poços continuam, em sua maioria, localizados na área central urbana; porém, já é notada uma nova concentração de poços na região nordeste industrial, sendo estes poços de alta exploração (Fig. 5.3a).

Para os anos 2010 até 2020, a população de aproximadamente 242 mil habitantes (+13%) ocupa cerca de 77 km² da sub-bacia (+17%). Os 331 poços na área de estudo bombeiam cerca de 202 m³/d (aumento de 20%) distribuídos e bem consolidados em duas regiões: central urbana e polo industrial (Fig. 5.3a). Ressalta-se que em todas as décadas o acréscimo percentual populacional e urbano sempre foi inferior ao aumento da exploração para o mesmo período.

5.4.3 – Evolução representativa das superfícies potenciométricas

A superfície potenciométrica representativa da década de 1980 foi desenvolvida a partir de 82 cargas hidráulicas (h) medidas principalmente na região central urbana. As linhas de fluxo d'água na sub-bacia indicam uma direção SW-NE, condizente com o fluxo subterrâneo regional existente e que acompanha o mergulho das camadas das formações geológicas da região (Galvão *et al.* 2016, 2017). É observado um pequeno desvio dos fluxos na região urbana, o que evidencia o início de um cone de rebaixamento. A inferência das linhas equipotenciais no extremo nordeste se deve pela falta de poços na região durante o período (Fig. 5.3b).

Com base em 90 valores de h, a superfície potenciométrica representativa dos anos 1990 permite indicar a evolução do cone de rebaixamento na área urbana, no decorrer da década. Em geral, ocorre um pequeno deslocamento para nordeste das linhas equipotenciais em toda a sub-bacia.

Na década de 2000, a superfície potenciométrica representativa, a partir de 86 h, indica a consolidação do cone de rebaixamento na região urbana central, além de apontar o início de um cone na região industrial, notado pelos desvios das linhas de fluxo subterrâneo na região nordeste da sub-bacia.

A década 2010 apresenta a superfície potenciométrica representativa a partir de 150 h distribuídas em toda a sub-bacia, sendo o mapa com o maior volume de dados (Fig. 5.3b). Os dois cones de rebaixamento estão bem definidos no mapa através das linhas potenciométricas circulares.

Os mapas de diferenças de cargas hidráulicas (Fig. 5.3c) permitem verificar as regiões que tiveram os maiores rebaixamentos de nível d'água. A variação entre as décadas de 1980 e 1990 não foi muito expressiva; entretanto, entre 1990 e 2000, fica evidente o rebaixamento causado pelo bombeamento dos poços nas áreas urbana e industrial (-20 m e -40 m, respectivamente). Os mapas entre 2000 e 2010 apontam cones de rebaixamento de 20 m na região urbana e de 80 m na região industrial. Ao analisar a evolução acumulada em 4 décadas observa-se uma grande alteração no fluxo da sub-bacia, onde as linhas de fluxo que passam pelas regiões urbana e industrial são desviadas para os cones de rebaixamento localizados nas áreas de concentração de poços, resultando em rebaixamentos de 40 m e 100 m, respectivamente.

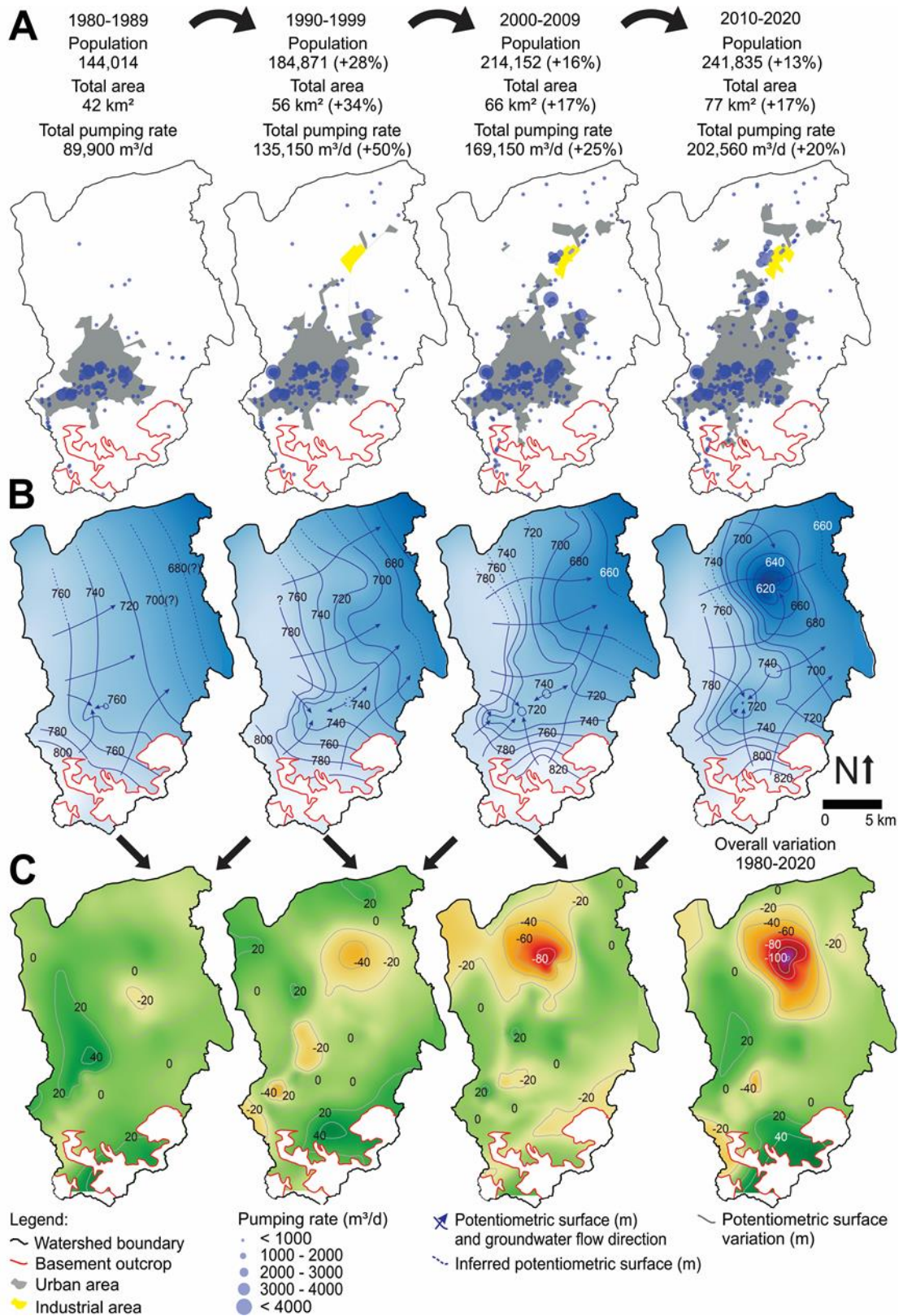


Figura 5.3 - (a) Evoluções urbana e de taxas de bombeamento, (b) superfícies potenciométricas, e (c) diferenças de cargas hidráulicas. Todos os mapas, representativos entre as décadas 1980-2020, foram gerados via dados acumulados durante a década indicada.

5.4.4 – Estimativa de clandestinidade

Os dados do Censo IBGE (2010), último a ser realizado, indicou 1179 poços no município a partir da “declaração de forma de abastecimento de água”. Entretanto, o levantamento desse estudo identificou apenas 392 poços existentes no município até 2010 (131 regulares e 261 irregulares) que tinham localização e/ou parâmetros conhecidos. Assim, 787 poços foram considerados aqui como clandestinos quando o censo foi realizado, representando aproximadamente 67%.

Levando-se em consideração que aproximadamente 67% de clandestinidade permaneça hoje em dia, e que 470 poços são conhecidos em 2020 (103 regulares e 367 irregulares), estima-se um valor de 943 poços clandestinos, atualmente. Adotando o valor de exploração para “uso insignificante” utilizado para outras regiões do estado (14 m³/dia por poço tubular), conforme Deliberação Normativa n°34/2010 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos, estima-se um volume máximo bombeado por esses poços. Deste modo, os poços clandestinos seriam responsáveis por 5% da exploração global atual na região (4,82 Mm³/ano), enquanto os poços regulares extrairiam 32% (29,03 Mm³/ano) e os irregulares 63% (56,77 Mm³/ano). Se fosse considerado o mesmo raciocínio, mas adotando um consumo de 0,17 m³/dia de água por habitante residente na América Latina, conforme OPAS/OMS (2019), e considerando a média de 3,38 habitantes por domicílio em Sete Lagoas (IBGE 2010), os poços clandestinos seriam responsáveis por menos de 1% da exploração global atual na região (0,2 Mm³/ano), os poços regulares bombeariam 34% e os irregulares 66%.

5.4.5 – Mapa de recarga

O mapa de recarga (Fig. 5.4) é resultado da aplicação do método APLIS (Andreo *et al.* 2008), onde seis parâmetros influentes na recarga do aquífero foram combinados resultando em taxas de recarga que variam de “muito baixa” (1-5%) a “muito alta” (55-75%). Os pesos aplicados em cada variável estão entre parêntesis na Fig. 5.4. Na equação utilizada pelo método APLIS ($\% \text{precipitação} = [(A+P+3L+2I+S)/0,9] \times Fh$), os parâmetros litologia (L) e formas de infiltração (I) possuem maior peso por sua maior probabilidade de resultar em uma recarga autogênica.

Os resultados indicam que dos 356 km² da sub-bacia 77% possui uma recarga muito baixa, menos de 1% baixa, 6% moderada, 14% alta e 3% muito alta. As regiões classificadas como recarga “muito alta” estão associadas a calcários expostos da Formação Sete Lagoas e a presença de entradas de cavernas e sumidouros. As áreas de recarga “alta” estão localizadas sobre calcários expostos ou recobertos por sedimentos inconsolidados. O contato dos calcários expostos ou sotopostos por sedimentos e demais litologias (embasamento e metapelitos da Formação Serra de Santa Helena) foram classificados com recarga “moderada”. Tem-se como recarga “baixa” e “muito baixa” áreas com a presença de rochas impermeáveis do embasamento e os metapelitos.

Considerando a precipitação média da região (1311 mm/ano), o valor mínimo de recarga do

aquífero é de 39,8 Mm³/ano e máxima de 72,4 Mm³/ano, tendo como média uma recarga de 56,1 Mm³/ano. Portanto, a recarga do aquífero pode variar de 8,5% a 15,5% da precipitação média de Sete Lagoas, apresentando como média 12 %. Pessoa (1996) e Magnabosco *et al.* (2020) calcularam taxas de infiltração de 19,2% e 18,2% respectivamente. Essa variação observada pode ser justificada pela diferença de método utilizada pelo primeiro autor, e de área para ambos os estudos.

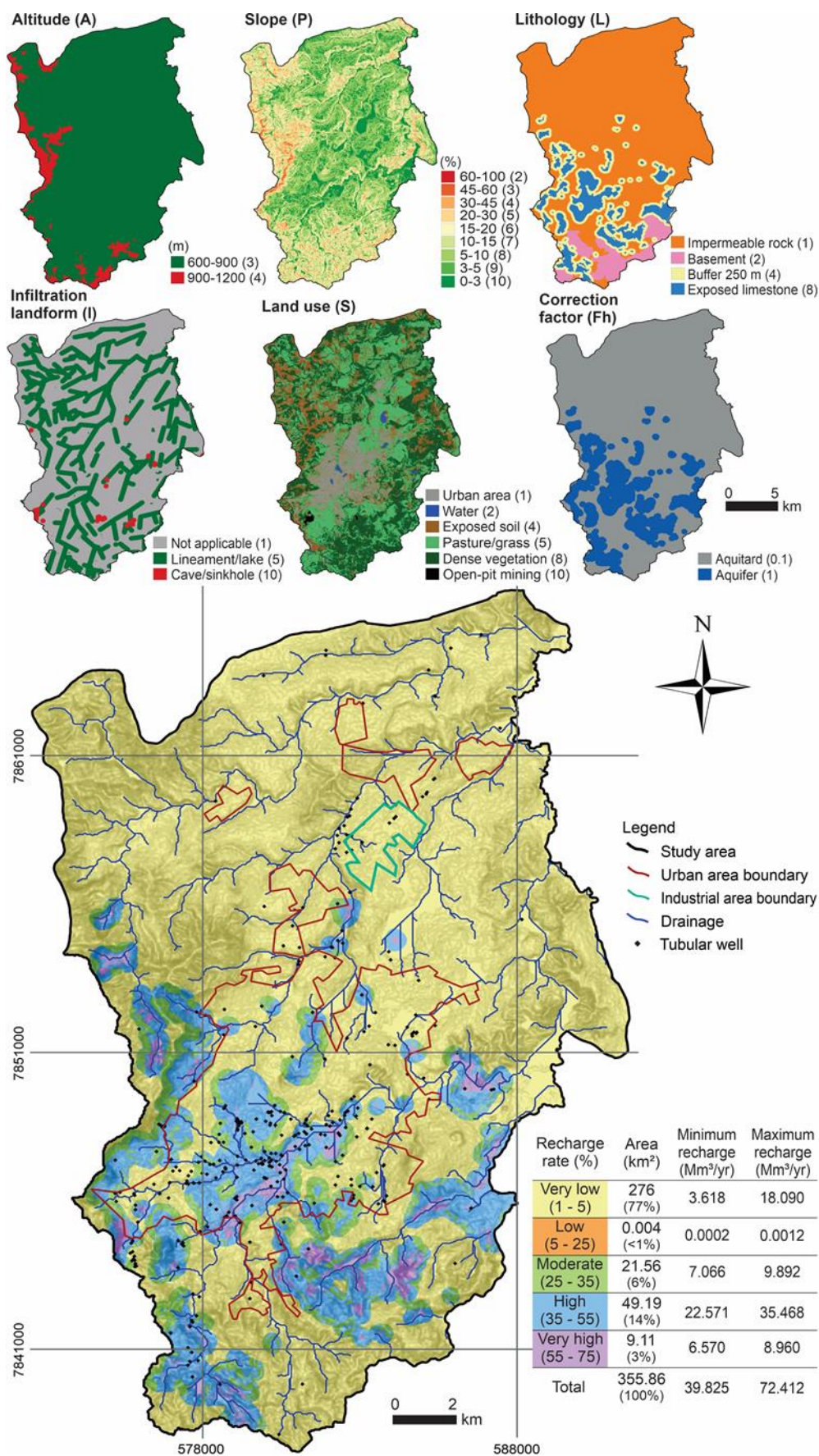


Figura 5.4 - Critérios usados pelo método APLIS e recarga da sub-bacia de estudo.

5.5 – DISCUSSÃO

5.5.1 – Evolução da exploração

Inicialmente, na região de Sete Lagoas predominava a atividade agropecuária e, com a chegada da Estrada de Ferro Central Brasil, em 1872, a economia evoluiu, ampliando as atividades industriais no ramo têxtil, de laticínios e de ferro-gusa, o que conseqüentemente levou a um crescimento populacional acelerado. Em 1942, o primeiro poço tubular profundo de 107 m foi construído e, nas décadas seguintes, a quantidade de poços ainda foi inexpressivo. Na década de 1940 foram três poços; na década de 1950 foram mais três; em 1960 mais oito e no final da década de 1970, pulou para um total de 79 poços.

Durante a década de 1980, ocorreu o apogeu da indústria de ferro-gusa, quando a cidade teve a maior expansão socioeconômica, resultando no aumento para 189 poços tubulares. Nesta década começaram a surgir mudanças no comportamento do aquífero na região central urbana (Fig. 5.3b) e, em 1988, ocorreu o primeiro grande abatimento de solo, de aproximadamente 20 m de diâmetro por 20 m de profundidade (Silva 1988, Galvão *et al.* 2015). A exploração via poços tubulares estava bem abaixo da recarga mínima do aquífero e o pequeno cone de rebaixamento formado na época provavelmente não influenciou nesta ocorrência geotécnica (Fig. 5.3b). Assim como Silva (1988) concluiu, o evento tratou-se de um fenômeno natural ligado a áreas carstificadas, aparentemente sem influência antrópica.

Na década de 1990, houve o declínio da siderurgia devido à competição com o mercado externo, o que abriu espaço para novas atividades se instalarem, aumentando a demanda por água. O acréscimo populacional e a chegada de empresas de grande porte elevaram consideravelmente a exploração via 271 poços, o que resultou na retirada de volume acima da recarga mínima do aquífero (Fig. 5.5). Novos abatimentos ocorreram na época, assim como a seca da lagoa do Matadouro, ambos eventos na região em que se formou o cone de rebaixamento da região central urbana (Fig. 5.3b). O polo industrial à nordeste teve início, assim como a concentração de poços de alta taxa de bombeamento, resultando em um rebaixamento de 20 m (Fig. 5.3c). Na mesma região havia uma represa que secou durante a década em questão, possivelmente influenciada pela diminuição do NA.

Nos anos 2000, o polo industrial se consolida, intensificando a demanda por água (369 poços) devido principalmente ao crescimento industrial e de maneira secundária ao aumento populacional que acompanhou o desenvolvimento desse segmento. O incremento na exploração global resultante dessa nova expansão econômica e demográfica são suficientes para ultrapassar o valor de recarga média do município (Fig. 5.5). Novos casos de abatimento ocorreram no município, principalmente na região urbana, área que segundo Galvão *et al.* (2015) está localizada em grande parte em uma zona de alto risco geotécnico devido a carstificação intensa e extração intensiva localizada. Ao final dessa década, a lagoa de maior expressão próxima ao polo industrial tem o espelho d'água reduzido de forma considerável devido ao rebaixamento resultante de altas taxas de bombeamento (Alves *et al.* 2021). Observa-se um

rebaixamento de 40 m, na região industrial, e de 20 m, na região urbana (Fig. 5.3c). É importante ressaltar que a maior parte da recarga da região nordeste é proveniente da infiltração ocorrida na região sul/sudeste e ocorre através do fluxo regional horizontal via condutos cársticos, já que esta região tem uma taxa de recarga muito baixa devido ao afloramento de rochas pelíticas da Formação Serra de Santa Helena.

Na década de 2010, a expansão industrial continua. A chegada de novas indústrias de grande porte resulta em uma concentração de poços de alta vazão que abastecem o polo industrial resultando em um grande cone de rebaixamento de 77 km² (Fig. 5.3b), gerando um rebaixamento expressivo de 80 m no centro da região (Fig. 5.3c). O espelho d'água da lagoa Grande atinge sua menor área, sendo reduzido drasticamente devido a diminuição no nível de água, o que é corroborado por Alves *et al.* (2021) ao demonstrar a conexão hidráulica entre a lagoa e o aquífero. Um fator importante a ser destacado é que na região nordeste onde foi desenvolvido o polo industrial, os poços de uso doméstico/rural são inexpressivos, levando-se a conclusão de que o cone é consequência exclusivamente de uso industrial. O cone de rebaixamento na região urbana se expande e atinge a dimensão de aproximadamente 29 km². A exploração ainda maior (470 poços) ultrapassa a recarga máxima do aquífero (Fig. 5.5), um volume que provavelmente não será atingido, já que a década em questão possui a maior quantidade de anos secos atípicos, o que reduz o volume de recarga. Em 2016, foi necessária a utilização de outra fonte de água (rio das Velhas), pois o aquífero cárstico não estava conseguindo suprir a demanda elevada. Atualmente, 1/3 do abastecimento urbano é proveniente dessa nova fonte de água superficial.

A evolução da demanda de água no município resulta no bombeamento crescente e intensivo, tendo como consequência a diminuição do NA, de forma geral, formando dois significativos cones de rebaixamento que alteram as direções naturais de fluxo subterrâneo. Como consequência tem-se uma mudança no comportamento hidroestático do aquífero, que passa de confinado para não confinado, resultando em um menor coeficiente de armazenamento e em um desequilíbrio que aumenta o risco geotécnico associado. As alterações são constatadas nos mapas de superfícies potenciométricas representativas (Fig. 5.3b), nos mapas de diferença de carga (Fig. 5.3c) e na seção hidrogeológica esquemática (Fig. 5.6). Um dado importante é que o acréscimo percentual populacional e urbano é sempre inferior ao incremento da exploração (Fig. 5.3a), o que pode ser explicado pela demanda industrial ser muito maior frente à demanda populacional. Outro dado que corrobora com essa afirmação é de que segundo dados do SAAE, o consumo de água per capita médio da última década no município foi inferior ao da década anterior (0,15 m³/dia e 0,23 m³/dia, respectivamente), o que não justificaria o aumento percentual do bombeamento devido a um maior consumo de água da população.

Em relação aos dados climatológicos e ao balanço hídrico (Fig. 5.2), as variações observadas entre o 1º e 2º período dos parâmetros déficit, excedente e armazenamento hídricos provavelmente são consequência da variação observada na temperatura e precipitação. Levando em consideração as tendências climatológicas, o volume de recarga será cada vez menor, o que agrava ainda mais todo o

cenário exposto. Segundo relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC 2021), cada uma das últimas quatro décadas foi mais quente que todas as anteriores desde 1850. O aquecimento observado entre os dois blocos analisados ($0,9^{\circ}\text{C}$) acompanha o valor de aquecimento global observado desde o período pré-industrial (1°C). A temperatura global subiu mais rápido desde 1970 do que em qualquer outro período de 50 anos nos últimos dois milênios, e este aquecimento irá aumentar a frequência e a intensidade de eventos de extremo calor, tempestades e secas no mundo. É importante ressaltar que apesar dos anos atípicos terem sido excluídos para a construção das retas de tendência, os anos chuvosos podem gerar recargas rápidas de grande importância para o aquífero. Possivelmente, os valores de recarga mínima, média e máxima foram ultrapassados anteriormente ao assinalado no gráfico (Fig. 5.5), já que, para o cálculo, foram utilizados somente dados provenientes de poços tubulares (maior parcela do volume de descarga total do aquífero), mas ainda existem nascentes, cisternas e poços escavados que precisam ser avaliados se são ou não significativos. E, além destas fontes, ainda há os poços clandestinos, que representam 67% dos poços do município, mesmo eles podendo ser responsáveis apenas por uma pequena parcela da exploração global atual na região.

Com esses levantamentos, percebe-se que o planejamento, o controle e a fiscalização são fatores decisivos para a situação em que Sete Lagoas está, e para seu futuro. Apenas 1/3 dos poços conhecidos pelo poder público estão regularizados e autorizados a explorar água. E, mesmo assim, devido à falta de fiscalização, não é possível ter certeza se estão seguindo os parâmetros definidos pelo órgão regulador. Apesar do maior número de poços clandestinos, acredita-se que seu volume é inexpressivo quando comparado aos demais poços. Um fator que deve ser considerado quando avaliados os dados de clandestinidade é de que os dados do censo não permitem a identificação de poços e nascentes de uso múltiplo, ou seja, que abastecem mais de uma moradia. Portanto, esses dados podem estar superestimados, mas ainda sim servem como um direcionamento. Por isso, a adoção do “uso insignificante” pode trazer benefícios ao município, com potencial de diminuir a clandestinidade de poços de baixa vazão e aumentando o aporte de dados para o gerenciamento do aquífero.

Por fim, uma gestão consciente utilizando dados confiáveis e atualizados pode proteger e preservar o aquífero, assegurando uma recarga satisfatória, controlando e fiscalizando a demanda por meio de planejamento integrado.

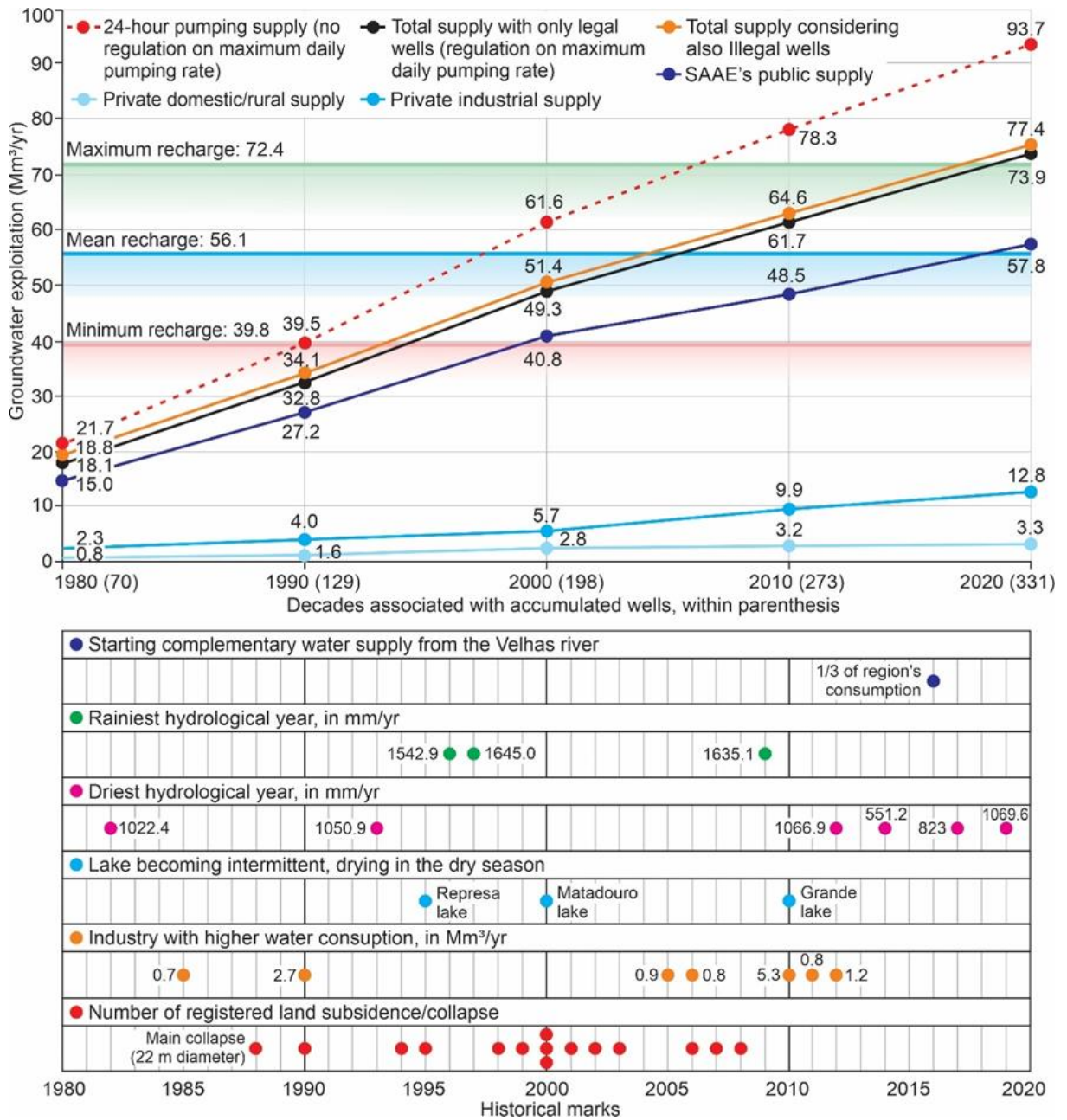


Figura 5.5 - Evolução da exploração subterrânea associada a marcos históricos ligados ao quadro de superexploração de Sete Lagoas.

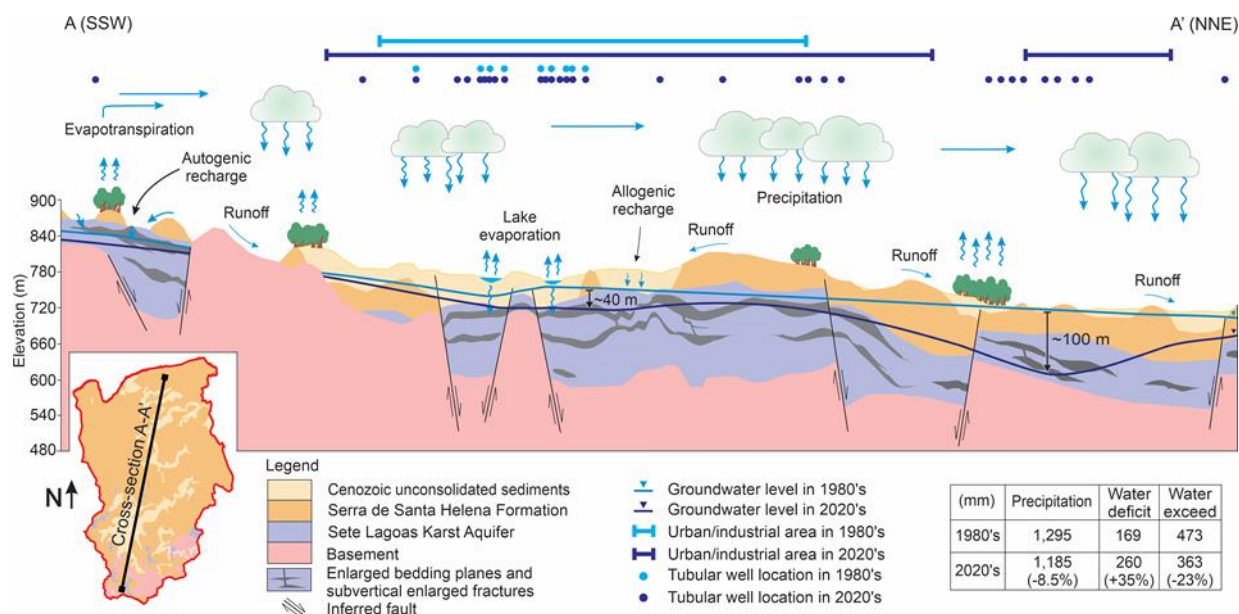


Figura 5.6 - Seção hidrogeológica esquemática com superfícies de nível de água representativas das décadas de 1980 e 2020.

5.5.2 – Gestão do recurso hídrico

Em qualquer tarefa de gestão de recurso hídrico, há interesses diferentes por parte de consumidores, administradores, cientistas, funcionários de governo, agricultores, sociedade civil e ambientalistas (Sen 2015). O perfil dos usuários, o conhecimento, modelagem e monitoramento do aquífero são necessários e devem ser estabelecidos por uma instituição de gestão, com o envolvimento das partes interessadas nas águas subterrâneas, levando em consideração restrições ambientais, econômicas e sociais (Custodio 2002).

Jakeman *et al.* (2016) citam casos de superexploração em regiões nos EUA, Índia, China, África e Austrália, países que usam água subterrânea principalmente para irrigação e que estão nessa situação devido à ineficiência da gestão hídrica. Entretanto, os mesmos autores salientam casos de sucesso obtidos por meio de gestões integradas e flexíveis na Austrália, União Europeia e Oeste dos EUA. Essas abordagens são, geralmente, caracterizadas por direitos de uso da água ajustáveis anualmente e de acordo com a sazonalidade, definição de prioridades de uso da água e uma gestão colaborativa entre os interessados focando igualmente na quantidade e na qualidade da água.

No Brasil, situações ligadas à superexploração acontecem em São José do Rio Preto e Recife, onde problemas de subsidência, encarecimento do custo da água devido ao rebaixamento do lençol freático e contaminação salina induzida pelo alto bombeamento estão exigindo que gestores utilizem de restrições ao uso da água na tentativa de frear estes problemas e outros que podem surgir provenientes da exploração intensiva (DAEE 2011, Simonato 2012, Cary *et al.* 2013, Bertrand *et al.* 2016, Petelet-Giraud *et al.* 2017)

Os resultados em Sete Lagoas acerca dos volumes de recarga e global explorados, da localização

de poços e suas respectivas vazões, das taxas de recarga da região e das tendências climatológicas, apontam que a gestão hídrica do município possui ferramentas para direcionar tomadas de decisões visando diminuir e/ou reverter o quadro de superexploração. A legislação estadual já existente referente ao uso da água subterrânea deve passar por modificações e acréscimos para proteger o abastecimento do município e a qualidade da água. As principais bases jurídicas relacionadas ao uso da água subterrânea em vigor no município são:

- Política Estadual de Recursos Hídricos no Estado de Minas Gerais – Lei nº 13.199/1999;
- Lei nº 13.771/2000 que dispõe sobre a administração, a proteção e a conservação das águas subterrâneas de domínio do Estado;
- Deliberação Normativa CERH nº 34/2010 que define o uso insignificante de poços tubulares localizados nas Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos Estaduais;
- Deliberação Normativa COPAM-CERH nº 05/2017 que estabelece diretrizes e procedimentos para a definição de áreas de restrição e controle de uso das águas subterrâneas em Minas Gerais).

A Tabela 5.1 apresenta direcionamentos gerenciais sugeridos para o município de Sete Lagoas. Essas recomendações de gestão são baseadas nos dados obtidos até então e devem ser avaliadas quanto à sua viabilidade (localização, tempo de vigência e aplicação) por um comitê de gestão composto pelos usuários, reguladores e acadêmicos. O segredo do sucesso de uma gestão é sua constante reavaliação, através da análise contínua de dados para que os devidos ajustes sejam feitos de acordo com a nova realidade do aquífero.

Tabela 5.1 - Sugestões de gestão hídrica para Sete Lagoas.

Direcionamentos gerenciais	
1	Proibição momentânea de novas perfurações nas áreas com queda no nível de água acentuado (cones de rebaixamento).
2	Readequação do regime de funcionamento de poços localizados nas áreas dos cones de rebaixamento (vazão e/ou tempo de bombeamento) com o objetivo de diminuir o rebaixamento. Os novos valores devem ser estabelecidos via estudos técnicos acerca dos raios de influência sobrepostos da região e da finalidade do uso da água (prioridade para o abastecimento público).
3	Adoção do status de “uso insignificante”, como tentativa de regularização de poços clandestinos de baixa exploração. Tais informações são de suma importância para posteriores tomadas de decisão gerenciais.
4	Criação de novas condicionantes para outorgas (como por exemplo o financiamento/construção de áreas de recarga facilitada, proteção de áreas de alta recarga, utilização de transdutores de pressão automatizados para medição do nível de água subterrânea). Essas novas condicionantes podem ser direcionadas exclusivamente para usuários que o comitê de gestão achar adequado.

5	Implantação de outorgas sazonais (regime de funcionamento de acordo com o período do ano) e/ou escalonamento de uso (definição de horário específico de funcionamento). Essa ação também pode ser direcionada exclusivamente para usuários que o comitê de gestão achar adequado.
6	Integração dos bancos de dados de diferentes órgãos públicos e criação de uma “identidade” única para o poço, afim de evitar duplicação de dados em diferentes plataformas de informação.
7	Fiscalização dos poços de localização conhecida (regulares e irregulares) para manter o status do poço atualizada na base de dados (ativo ou inativo).
8	Utilização de poços inativos para o monitoramento do aquífero, utilizando-se de transdutores de pressão automatizados para medição do nível de água subterrânea que alimentarão o banco de dados sistematicamente.
9	Desenvolvimento de plataforma digital para outorga eletrônica, interligada ao banco de dados. Nesta plataforma serão inseridos dados acerca da localização, construção e funcionamento do poço para avaliação de viabilidade da sua implantação ou manutenção dos parâmetros já outorgados.
10	Efetiva penalização de infrações cometidas em relação ao fornecimento de dados falsos e não cumprimento dos regimes de bombeamento autorizados via outorga.
11	Avaliação da utilização de recarga artificial durante períodos de seca.
12	Criação de áreas de reserva hidrogeológica, visando a proteção de regiões de alta recarga (áreas em azul e roxo – Fig.4).
13	Construção de pontos de recarga facilitada (como por exemplo, bocas de lobo cegas e jardins de chuva) em locais previamente estabelecidos pelo comitê de gerenciamento, definidos via avaliação técnica.

5.6 – CONCLUSÕES

Os efeitos adversos observados no município (problemas de abastecimento, diminuição ou seca de lagoas, abatimentos/colapsos de solo, rebaixamento do nível d’água acarretando seca de poços, formação de grandes cones de rebaixamento) juntamente com o volume explorado via poços tubulares acima do cálculo de recarga média do aquífero cárstico, indicam a situação de superexploração instaurada no município a partir do meio da década de 2000.

A localização e bombeamento não planejados dos poços nos últimos anos levaram Sete Lagoas a uma situação delicada, evidenciando a necessidade de uma gestão hídrica mais ativa e consciente das peculiaridades do aquífero cárstico, levando em consideração a opinião dos múltiplos interessados no uso da água subterrânea.

As tendências referentes à temperatura, precipitação, déficit, excedente e armazenamento hídricos são preocupantes, pois podem agravar o abastecimento do município, diminuindo o volume de recarga do aquífero cárstico. Além disso, o mapa de recarga demonstra que grande parte do território não permite uma infiltração eficiente da chuva, confirmando ser necessária a proteção das áreas de calcários expostos ou recobertos por sedimentos inconsolidados onde a recarga ocorre em taxas maiores, e que em grande parte está situada na zona urbana.

Apesar do grande número de poços clandestinos no município (67%), caso esses tenham um bombeamento máximo de 14 m³/dia de água (valor de referência para “uso insignificante” utilizado nas regiões ao norte do estado de MG), esse volume representaria aproximadamente 5% do total explorado em Sete Lagoas. Ou seja, adotar o “uso insignificante” tem o potencial de tirar da clandestinidade poços de baixa exploração e serviria de fonte de dados para a gestão do município.

REFERÊNCIAS

- Alkmim F. F. 2004. O que faz de um cráton um cráton? O cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: 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. Editora Beca, São Paulo, 17-35.
- Alley, W. M., & Leake, S. A. 2004. The journey from safe yield to sustainability. *Ground Water*, 42(1), 12-16.
- Almeida, F. F. M. 1977. O cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de geociências*, 7(4), 349-364.
- Alves, M.; Galvão, P.; Aranha, P. 2021. Karst hydrogeological controls and anthropic effects in an urban lake. *Journal of Hydrology*, 593: 1-16.
- Andreo, B., et al., 2008. Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 16, 911.
- Assunção P.H.S. 2019. 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, 81 p.
- Bertrand, G.; Hirata, R.; Pauwels, H.; Cary, L.; Petelet-Giraud, E.; Chatton, E.; Aquilina, L.; Labasque, T.; Martins, V.; Montenegro, S.; Batista, J.; Aurouet, A.; Santos, J.; Bertolo, R.; Picot, G.; Franzen, M.; Hochreutener, R.; Braibant, G. 2016. Groundwater contamination in coastal urban areas: Anthropogenic pressure and natural attenuation processes. Example of Recife (PE State, NE Brazil). *Journal of Contaminant Hydrology*, 192: 165-180.
- Botelho, L. A. L. A. 2008. Gestão dos recursos hídricos em Sete Lagoas-MG: uma abordagem a partir da evolução espaço-temporal da demanda e da captação de água. Dissertação de Mestrado. UFMG, Belo Horizonte.
- Cary, L.; Petelet-Giraud, E.; Montenegro, S.; Hirata, R.; Martins, V.; Aurouet, A.; Pauwels, H.; Kloppmann, W.; Aquilina, L. 2013. Groundwater Salinization in a Coastal Multilayer Aquifer: Preliminary Results on Origins and Mechanisms- Example of Recife (Brazil). *Procedia Earth and Planetary Science*, v.7, p. 118-122.
- Custodio, E. 2002. Aquifer overexploitation: what does it mean? *Hydrogeology Journal*, 10: 254-277.
- DAEE. (Departamento de Águas e Energia Elétrica). 2012^a. Projeto São José do Rio Preto: restrição e controle de uso de águas subterrâneas. / Departamento de Águas e Energia Elétrica, Instituto Geológico, Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Secretaria de Estado de Saneamento e Energia. In: Cadernos do Projeto Estratégico Aquíferos, São Paulo, 125p.
- Domenico, P. 1972. Concepts and models in groundwater hydrology. New York: McGraw-Hill.
- Ford, D. C. & Williams, P. W. 2007. Karst geomorphology and hydrology (Vol. 601). London: Unwin Hyman. Ford, D. C. & Williams, P. W. 2007. Karst hydrogeology and geomorphology. Wiley&Sons, 448 p.
- Galvão, P. H. F 2015. Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas. Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo.
- Galvão, P., Halihan, T., & Hirata, R. 2015. Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. *Hydrogeology Journal*, 23(7), 1499-1513.
- Galvão P., Halihan T., Hirata R. 2016a. The karst permeability scale effect of Sete Lagoas, MG, Brazil. *Journal of Hydrology*, 532, 149-162.

- Galvão, P.; Hirata, R.; Conicelli, B. 2018. Estimating groundwater recharge using GIS-based distributed water balance model in an environmental protection area in the city of Sete Lagoas (MG), Brazil. *Environmental Earth Sciences* (2018) 77:398.
- Galvão, P.; Hirata, R.; Cordeiro, A.; Osório, D.B., Penharanda, J. 2016. Geologic conceptual model of the municipality of Sete Lagoas (MG, Brazil) and the surroundings. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 88(1): 35-53.
- Galvão P., Hirata R., Halihan T., Terada R. 2017. Recharge sources and hydrochemical evolution of an urban karst aquifer, Sete Lagoas, MG, Brazil. *Environmental Earth Science*, 76, 20p.
- Hirata, R.; Zoby, J.L.G.; Oliveira, F.R. 2010. Água Subterrânea: Reserva Estratégica ou Emergencial, 149-161. In: Bicudo, C.E.de M.; Tundisi, J.G.; Scheuenstuhl, M.C.B. , orgs. *Águas Do Brasil - Análises Estratégicas*. São Paulo: Instituto de Botânica, 224 p.
- IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia e Estatística (IBGE) 2020. Censo Demográfico. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/sete-lagoas/panorama>, acesso em 18 setembro de 2020.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, 2020. Estação Climatológica e Meteorológica de Sete Lagoas, código: 83586 e A569. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>, acesso em 09 agosto de 2020.
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Jakeman, A.J., Barreteau, O., Hunt, R.J., Rinaudo, J.D., Ross, A. 2016. *Integrated groundwater management: concepts, approaches and challenges*. SpringerOpen, 762p.
- Llomas, M.R. & Custodio, E. 2003. Ed., *Intensive Use of Groundwater, Challenges and Opportunities*, A. A. Balkema Publishers, Lisse, 480p.
- Magnabosco, R.A.G. 2019. *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, 90p.
- Magnabosco, R.; Galvão, P.; de Carvalho, A.M. 2020. An approach to map karst groundwater potentiality in an urban area, Sete Lagoas, Brazil. *Hydrological Sciences Journal*.
- Maimone, M. 2004. Defining and managing sustainable yield. *Ground Water*, 42(6-7), 809-814.
- Margat, J. & Gun, J. 2013. *Groundwater around the world, a geographic synopsis*. Taylor & Francis Group, New York, 341p.
- Molina, J. L., García Arístegui, J. L., Benavente, J., Varela, C., de la Hera, A., López- Geta, J. A. 2009: Aquifers overexploitation in SE Spain: a proposal for the integrated analysis of water management, *Water Resour. Manage.*, 23: 2737–2760.
- Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS), escritório regional para as Américas da Organização Mundial da Saúde (OMS). 2019. *Agenda 2030 para abastecimento de água, esgotamento sanitário e higiene na América Latina e Caribe - Um olhar a partir dos direitos humanos*.
- Pessoa, P. F. P. 1996. *Caracterização hidrogeológica da região cárstica de Sete Lagoas-MG: potencialidades e riscos* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Petelet-Giraud, E.; Cary, L.; Cary, P.; Giglio-Jacquemot, A.; Bertrand, G.; Hirata, R.; Alves, L; Martins, V.; Melo, A; Montenegro, S. M. G. L.; Chatton, Eliot; Franzen, M.; Aurouet, 2017. A. Multi-layered water resources, management, and uses under the impacts of Global Changes in a Southern Coastal Metropolis: when will it be already too late? *Crossed analysis in Recife, NE Brazil*. *Environmental Science* v. 13, p. 13.
- Pulido, A. 2001. Sobreexplotación de acuíferos y desarrollo sostenible. *Problemática de la gestión del agua en regiones semiáridas*. *Inst. Est. Almerienses, Dip. Almería, Almería*, 25: 115–132.
- Santos D. F. M. 2016. *Dinâmica do uso e cobertura do solo nos municípios de Sete Lagoas e Prudente de Moraes – MG: Uma análise espacial do crescimento urbano*. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, 58p.

- Sen, Z. 2015. Groundwater Management. In. Practical and applied hydrogeology. Elsevier, 424p.
- Seward, P., Xu, Y., & Brendock, L. 2006. Sustainable groundwater use, the capture principle, and adaptive management. *Water S.A.*, 32(4), 473-482.
- Silva, A.B. 1988. Abatimento de solo na Cidade de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil. *Rev Água Subterrânea* 12: p. 57-66.
- Simonato, M. D. 2012. Custo de energia elétrica no bombeamento de poços em áreas de intensa exploração: estudo de caso em São José do Rio Preto – SP, São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, Dissertação de Mestrado.
- Sophocleous, M. 1997. Managing water resources systems: why “safe yield” is not sustainable. *Ground Water*, 35(4), 561.
- Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. 1955. Publications in climatology. The water balance, 8, 1-104.
- Todd, D. K. 1959. Groundwater hydrology. New York: John Wiley & Sons.
- Younos, T., Schreiber, M., & Ficco, K. K. (Eds.). 2019. Karst Water Environment: Advances in Research, Management and Policy (Vol. 68). Springer

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sete Lagoas realmente passa por uma situação de superexploração iniciada durante a década de 2000, quando a exploração atingiu volumes acima da recarga média do aquífero e os efeitos adversos a essa exploração foram intensificados. Algumas das consequências negativas são: comprometimento do abastecimento de água, abatimentos de solo, diminuição ou seca de lagoas, contaminação do aquífero, rebaixamento do nível d'água resultando em seca de poços, formação de cones de rebaixamento de dimensões quilométricas e mudança no comportamento hidroestático do aquífero, antes confinado e atualmente livre.

As variações climáticas observadas desde a década de 1960 indicam volumes de recarga menores, o que agravaria o cenário de superexploração do aquífero cárstico. Além disso, a não proteção de áreas com alta taxa de recarga, referente a 17% do território, e em grande parte situada na região urbana, também pode contribuir para o piora do quadro. A criação de infraestruturas que protejam essas áreas e que favoreçam a infiltração da chuva poderiam ajudar na manutenção/aumento da recarga. Caso seja necessário, em períodos de estiagem onde os valores de recarga ficam próximos ao volume mínimo agora conhecido, a recarga artificial pode ser uma ferramenta de emergência para assegurar valores, pelo menos, médios de recarga.

O planejamento referente à localização e ao regime de bombeamento dos poços tubulares mostra-se de grande importância, principalmente visando controlar o rebaixamento acentuado na região urbana e industrial, onde estão formados os cones de rebaixamento devido à concentração de muitos poços em pequenas áreas. Essas áreas também concentram em si os problemas geotécnicos, de contaminação e de secas de poços e lagoas. A adequação de vazões e tempos de bombeamento por meio da programação alternada do uso entre os poços já existentes possui grandes chances de diminuir o efeito do uso simultâneo que existe atualmente. A variação dos regimes de bombeamento sazonalmente também pode ser promissora, assim como a utilização de uma maior parcela do abastecimento a partir de outras fontes superficiais em períodos secos.

Com o objetivo de obter mais dados para o gerenciamento hídrico consciente e atualizado do aquífero, sugere-se que transdutores de pressão automatizados para medição do nível de água subterrânea sejam instalados principalmente em poços de alta vazão. Outra medida seria a adoção do “uso insignificante”, que incentivaria a legalização de poços de baixa vazão (que, no máximo, representa 5% do volume total explorado do aquífero), servindo como novas fontes de dados. Essa ação também explanaria a verdadeira face da clandestinidade, pois os poços de alta vazão pertencentes a esse grupo provavelmente não irão buscar a legalização.

A evolução histórica e dos parâmetros hidrogeológicos analisados neste trabalho demonstram o possível impacto do crescimento urbano e industrial na demanda por água do município. Somente o abastecimento público já seria suficiente para ultrapassar a recarga média do aquífero. Entretanto, como o aumento percentual do bombeamento é sempre superior ao crescimento populacional e da mancha urbana em todas as décadas, a demanda industrial mostra-se mais impactante, exercendo um papel fundamental na exploração superior da recarga máxima, além de ser responsável pelo maior cone de rebaixamento do município.

Mais estudos devem ser desenvolvidos acerca da recarga do aquífero, abordando o fluxo horizontal das áreas de infiltração até o nordeste do município, além do seu tempo de trânsito. Outra questão levantada por este trabalho e que necessita aprofundamento é a viabilidade e efetividade dos direcionamentos gerenciais. A gestão hídrica baseada em dados atualizados e integrada com as necessidades da população, gestores e setor industrial pode ser a solução para a superexploração.

Com relação às limitações da pesquisa, é importante ressaltar que os dados censitários tem como premissa a não identificação e localização das informações fornecidas ao IBGE. Portanto, não é possível a partir deles identificar poços e nascentes de abastecimento múltiplo, ou seja, que abastecem mais do que um domicílio, como condomínios por exemplo. De qualquer forma, apesar dessa limitação, é possível perceber que a clandestinidade é alta no município e deve ser tratada como um problema a ser solucionado pela gestão. Outra limitação é em relação ao uso do APLIS que, como qualquer outro tipo de cálculo de recarga, possui incertezas inerentes ao método, e que podem ser ampliados devido à escala regional do estudo e a diferença na quantidade de dados disponíveis entre a região central urbana e a região industrial nordeste. Novos estudos investigativos quanto à geologia e ao aquífero devem ser realizados para se obter uma maior quantidade de dados referentes a área do polo industrial.

Referências

- Agência Nacional de Águas (ANA). 2018. Hidrogeologia dos ambientes cársticos da Bacia do Rio São Francisco para a gestão de recursos hídricos: resumo executivo. Elaboração e execução: TPF – Techne, Brasília.
- Alley W.M., Leake S.A. 2004. The journey from safe yield to sustainability. *Ground Water* 42(1): 12–16.
- Ali, M. H., Abustan, I., Rahman, M. A., Haque, A. A. M. 2011. Sustainability of groundwater resources in the north-eastern region of Bangladesh, *Water Resour. Manage.*, 26: 623–641.
- Alkmim F. F. 2004. O que faz de um cráton um cráton? O cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: 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*. Editora Beca, São Paulo, 17-35.
- Alkmim F. F., Brito Neves B. B., Castro Alves J. A. 1993. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco – Uma Revisão. In: Dominguez J. M. L., Misi A. (ed) *O Cráton do São Francisco*. SBG/Núcleo BA/SE, Salvador, 45-62.
- Alkmim, F. F., Chemale Jr, F., Bacellar, L. A. P., Oliveira, J. P., & Magalhães, P. M. 1989. Arcabouço estrutural da porção sul da Bacia do São Francisco. *Simpósio de Geologia de Minas Gerais*, 5, 289-292.
- Alkmim F. F. & Martins-Neto M. A. 2001. 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. & Martins Neto, M. A. 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, v. 33, n.1, p.127-139. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/1953>>. Acesso em: 03 dez. 2019.
- Almeida, F. F. M. 1977. O cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de geociências*, 7(4), 349-364.
- Alves, M.; Galvão, P.; Aranha, P. 2021. Karst hydrogeological controls and anthropic effects in an urban lake. *Journal of Hydrology*, 593: 1-16.
- Andreo, B., et al., 2008. Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 16, 911.
- Associação do Circuito Turístico das Grutas – ACTG. <https://circuitodasgrutas.com.br>. Acesso em: 14 de novembro de 2019.
- Assunção P.H.S. 2019. 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, 81 p.
- Auler, A., & Farrant, A. R. 1996. A brief introduction to karst and caves in Brazil. *Proceedings of the University of Bristol Spelaeological Society*, 20, 187-200.
- Bakalowicz, M. 2004. The epikarst, the skin of karst. In W. K. Jones, D. C. Culver, & J. S. Herman (Eds.), *Epikarst* (9, pp. 16_22).
- Beynen P. E. 2011. *Karst Management*. Springer, Tampa, Flórida, 502p.
- Bonacci, O. 2015. Surface Waters and groundwater in karst. In: Stevanović, Z. (Ed.) 2015. *Characterization of karst aquifer*. In *Karst Aquifers—Characterization and Engineering*. pp. 47-125. Springer, Cham.
- Bosch, A. P. 2001. Sobreexplotación de acuíferos y desarrollo sostenible. *Problemática de la gestión del agua en regiones semiáridas*. Instituto de Estudios Almerienses, 115-132.
- Botelho, L. A. L. A. 2008. Gestão dos recursos hídricos em Sete Lagoas-MG: uma abordagem a partir da evolução espaço-temporal da demanda e da captação de água. Dissertação de Mestrado. UFMG, Belo Horizonte.
- British Columbia 2003. *Karst management handbook for British Columbia*. For. B.C. Min. For., Victoria, B.C. <http://www.for.gov.bc.ca/hfp/fordev/karst/karstbmp.pdf>.
- Candela, L., Gómez, M., Puga, L., Rebollo, L., Villarroya, F. 1991. *Aquífer overexploitation*, AIH, Tenerife, 580p.

- Carneiro, F.A. 2013. Modelagem hidrogeoquímica do sistema aquífero pelito-carbonático existente no CNPMS da EMBRAPA Sete Lagoas/MG – Brasil. Programa de pós-graduação em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, 338p.
- Cary, L.; Petelet-Giraud, E.; Montenegro, S.; Hirata, R.; Martins, V.; Aurouet, A.; Pauwels, H.; Kloppmann, W.; Aquilina, L. 2013. Groundwater Salinization in a Coastal Multilayer Aquifer: Preliminary Results on Origins and Mechanisms- Example of Recife (Brazil). *Procedia Earth and Planetary Science*, v.7, p. 118-122.
- Centro Nacional De Pesquisa E Conservação De Cavernas (CECAV) 2018. Regiões Cársticas do Brasil. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/cecav/downloads/mapas/provincias-espeleologicas.html>>. Acesso em: 09 de março de 2020.
- Chang, H.K.; Kowsmann, R.O.; Figueiredo, A.M.F.; Bender, A.A., 1992. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview. *Tectonophysics*, 213: 97–138
- Cordani U. G. e Brito Neves, B. B. 1982. The geologic Evolution of South America during the Archaen and early Proterozoic. *Revista Brasileira de Geociências*, 12(1/3), 78-88.
- Costa, M.T. & Branco, J.J.R. 1961. Roteiro para a excursão Belo Horizonte - Brasília. Contribuição ao XIV Congresso Brasileiro de Geologia. Belo Horizonte, Instituto de Pesquisas Radioativas, publicação 15, 1961. p. 9-25.
- Couto, J.G.P. & Bez, L. 1981. A Glaciação Jequitai: um guia estratigráfico para o Pré-cambriano superior no Brasil. *Rev. Bras. Geoc.*, 11(1): p.17-21.
- CPRM 1994. Região de Sete Lagoas-Lagoa Santa. Informações básicas para a gestão territorial. Caracterização geomorfológica. Belo Horizonte, CPRM, Série Cartas Temáticas (Volume 1), 41p.
- CPRM 1996. Projeto VIDA. Uso da terra e caracterização da cobertura vegetacional. Município de Sete Lagoas. Belo Horizonte, CPRM, Série Ordenamento Territorial (Volume 5), 26p.
- Cruz, S.C.P. & Alkmim, F.F. 2017. The Paramirim Aulacogen. In: Heilbron, M., Cordani, U.G., Alkmim, F.F. (eds.). São Francisco Craton, Eastern Brazil – Tectonic Genealogy of a Miniature Continent. Suíça, Springer International Publishing Switzerland, 331p.
- Custodio, E. 2002. Aquifer overexploitation: what does it mean? *Hidrogeology Journal*, 10: 254-277.
- DAEE. (Departamento de Águas e Energia Elétrica). 2012^a. Projeto São José do Rio Preto: restrição e controle de uso de águas subterrâneas. / Departamento de Águas e Energia Elétrica, Instituto Geológico, Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Secretaria de Estado de Saneamento e Energia. In: *Cadernos do Projeto Estratégico Aquíferos*, São Paulo, 125p.
- Dardenne, M. A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: Congresso Brasileiro de Geologia. Anais. SBG, Recife. n. 2, p. 597-610
- Doerfliger, N., Jeannin, P.Y., Zwahlen, F. 1999. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environ Geol* 39(2):165–176.
- Escolero, o.A., Marin, L.E., Steinich, B. Pacheco, A.J., Cabrera, S.A., Alcocer, J. 2002. Development of a protection strategy of karst limestone aquifers: the Merida Yucatan, Mexico case study. *Water Resources Management, Netherland*, 16: 351-367.
- Esteller, M.V., Diaz-Delgado, C. 2002. Environmental Effects of Aquifer Overexploitation: A Case Study in the Highlands of Mexico. *Environmental Management*. 29(2): 266-278.
- Feitosa F. A. C. & Filho J. M. 2008. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3^o ed., CPRM, Labhid-UFPE, Fortaleza, 812p.
- Fernandes, L.C.S. & Oliveira, E. 2018. Coletânea da legislação de águas subterrâneas do Brasil. Vol.1: Região Sudeste. Unicamp, Ed. Instituto Água Sustentável, São Paulo, 254p.
- Ferreira, M.J., Pereira, I.M., Botelho, S.A., Mello, C.R. 2009. Avaliação da Regeneração Natural em Nascentes Perturbadas no Município de Lavras, MG. *Ciência Florestal*. 19(2): 109-129.
- Ferri, M.G. 1980. *Vegetação Brasileira*. Belo Horizonte: Itatiaia; São Paulo: USP, 157 p.
- Freeze, A.R. & Cherry, J.A. 2017. *Águas Subterrâneas*. Ed. Instituto Água Sustentável, São Paulo, 698p.

- Ford, D. C. & Williams, P. W. 2007. Karst geomorphology and hydrology (Vol. 601). London: Unwin Hyman. Ford, D. C. & Williams, P. W. 2007. Karst hydrogeology and geomorphology. Wiley&Sons, 448 p.
- Galvão, P. H. F. 2015. Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas. Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo.
- Galvão, P., Halihan, T., & Hirata, R. 2015. Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. *Hydrogeology Journal*, 23(7), 1499-1513.
- Galvão P., Halihan T., Hirata R. 2016a. The karst permeability scale effect of Sete Lagoas, MG, Brazil. *Journal of Hydrology*, 532, 149-162.
- Galvão P., Halihan T., Hirata R. 2017a. Transmissivity of aquifer by capture zone method: An application in the Sete Lagoas karst aquifer, MG, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 89(1), 91-102.
- Galvão P., Hirata R., Halihan T., Terada R. 2017. Recharge sources and hydrochemical evolution of an urban karst aquifer, Sete Lagoas, MG, Brazil. *Environmental Earth Science*, 76, 20p.
- GEOWATER. 2017. Relatório Final sobre Piezometria e Qualidade da Água. Projeto Pardo. Desenvolvimento Sustentável do Aquífero Guarani. Área Piloto de Ribeirão Preto. Fundação de Apoio à Pesquisa Agrícola – FUNDAG - 819, Carta Contrato no 37. 131 p e 1 anexo, Araraquara.
- Gleeson, T., VanderSteen, J., Sophocleous, M.A., Taniguchi, M., Alley, W. M., Allen, D. M., Zhou, Y. X. 2010. Groundwater sustainability strategies, *Nat. Geosci.*, 3: 378–379.
- Gleeson T., Wada Y., Bierkens M.F., van Beek L.P. 2012. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature* 488(7410):197–200.
- Giordano, M. 2009. Global groundwater? Issues and solutions. *Annu Rev Environ Resour* 34: 153–178.
- Goldscheider, N. 2005. Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany. *Hydrogeol J* 13:555–564.
- Goldscheider, N., & Drew, D. (Eds.). 2007. *Methods in Karst Hydrogeology*: IAH: International Contributions to Hydrogeology, 26. CRC Press.
- Gomes, R., Galvão, P., Maciel, A., Silva, A. 2018. Comportamento do Fluxo de Água Subterrânea e Potencialidade Hídrica em Aquíferos Cársticos a Partir de Análise Estrutural e Parâmetros Hidrogeológicos – Sete Lagoas (MG). XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Campinas.
- Gomide, R.L., Albuquerque, P.E.P., Andrade, C.L.T., Durães, F.O.M., Viana, J.H.M. 2006. Caracterização climática e determinação da necessidade hídrica de culturas do sitio-específico de precisão de Sete Lagoas para a fenotipagem de genótipos de cereais tolerantes à seca. *Anais do Congresso Nacional De Milho E Sorgo*, 26.
- Gordon, A., Destro, N., Heilbron, M. 2017. The Recôncavo-Tucano-Jatobá Rift and Associated Atlantic Continental Margin Basins. In: Heilbron, M., Cordani, U.G., Alkmim, F.F. (eds.). *São Francisco Craton, Eastern Brazil – Tectonic Genealogy of a Miniature Continent*. Suíça, Springer International Publishing Switzerland, 331p.
- Guimarães, D.P., Sans, L.M.A., Santana, D.P., Leão, M.S. 2004. Tendências de variação da temperatura e da precipitação em 75 anos de observações na estação climatológica principal de Sete Lagoas, MG. *Embrapa Milho e Sorgo*.
- Hasui, Y. 2012. Cráton São Francisco. In: Hasui, Y., Carneiro, C.D.R., Almeida, F.F.M., Bartorelli, A. (eds.). *Geologia do Brasil*. São Paulo, Beca, 900 p.
- Heilbron, M., Cordani, U.G., Alkmim, F.F. 2017. The São Francisco Craton and Its Margins. In: Heilbron, M., Cordani, U.G., Alkmim, F.F. (eds.) *São Francisco Craton, Eastern Brazil – Tectonic Genealogy of a Miniature Continent*. Suíça, Springer International Publishing Switzerland, 331p.
- Hirata, R., Suhogusoff, A.V., Marcellini, S.S., Villar, P.C., Marcellini, L. 2019. Estudo de águas subterrâneas. Instituto Trata Brasil, 35p.
- Huang, F., Wang, G.H., Yang, Y.Y, Wang, C.B. 2014. Overexploitation status of groundwater and induced geological hazards in China. *Nat Hazards* 73: 727–741.
- Iglesias, M. & Uhlein, A. 2009. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas. *Revista Brasileira de Geociências*, 39 (2), 256-266.
- IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia e Estatística (IBGE) 2020. Censo Demográfico. Disponível em

- <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/sete-lagoas/panorama>, acesso em 18 setembro de 2020.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, 2020. Estação Climatológica e Meteorológica de Sete Lagoas, código: 83586 e A569. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>, acesso em 09 agosto de 2020.
- IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. 2020. Cadastro de uso insignificante. Disponível em <http://www.igam.mg.gov.br/cadastro-de-uso-insignificante-de-recurso-hidrico>, acesso em 02 de março de 2020.
- Jakeman, A.J., barreteau, O., Hunt, R.J., Rinaudo, J.D., Ross, A. 2016. Integrated groundwater management: concepts, approaches and challenges. SpringerOpen, 762p.
- Katz, B.G., DeHan, R.S., Hirten, J.J., Catches, J.S. 1997. Interactions between groundwater and surface water in the Suwannee River Basin, Florida. *Journal of the American Water Resources Association*, 33: 1237-1254.
- Koerner, R.M., Daniel, D.E. 1997. Final covers for solid waste landfills and abandoned dumps. ASCE Press, Reston, 256 p.
- Larousse França. 2018. Acesso em 14 de janeiro de 2020 (www.larousse.fr/encyclopedie/divers).
- Llamas, M.R. & Custodio, E. 2003. Ed., Intensive Use of Groundwater, Challenges and Opportunities, A. A. Balkema Publishers, Lisse, 480p.
- Machado, L.A., Carmo, A.M.R., Jardim, C.H. 2012. Tendências e variações na temperatura e precipitação em Montes Claros e Sete Lagoas – MG. *Revista Geonorte*, 3 (9), 613-625.
- Magnabosco, R.A.G. 2019. 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, 90p.
- Malik, A., Badruddin, M., Khan, M. J., Latif, M., Haq, I. 2004. Effect of overexploitation of ground water resources on water balance and quality in Lachi valley of district Kohat, Pakistan, *Sarhad J. Agric.*, 20: 125–133.
- Margat, J. & Gun, J. 2013. Groundwater around the world, a geographic synopsis. Taylor & Francis Group, New York, 341p.
- Martínez, M.I. 2007. Estratigrafia e tectônica do Grupo Bambuí no norte do estado de Minas Gerais. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, 122p.
- Martins-Neto M. A & Alkmim F. F. &. 2001. Estratigrafia e evolução das bacias neoproterozoicas do paleocontinente São Francisco e suas margens: Registro da quebra de Rodínia e colagem de Gondwana. In: C. P. Pinto, M. A. Martins-Neto (eds) *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. SBG MG, Belo Horizonte, 31-54.
- Molina, J. L., García Arístegui, J. L., Benavente, J., Varela, C., de la Hera, A., López- Geta, J. A. 2009: Aquifers overexploitation in SE Spain: a proposal for the integrated analysis of water management, *Water Resour. Manage.*, 23: 2737–2760.
- Molina, J. L., Bromley, J., García-Aróstegui, J. L., Sullivan, C., Benavente, J. 2010. Integrated water resources management of overexploited hydrogeological systems using object-oriented bayesian networks, *Environ. Model. Softw.*, 25: 383–397.
- Molina, J., García-Aróstegui, J. L., Bromley, J., Benavente, J. 2011: Integrated assessment of the European WFD implementation in extremely overexploited aquifers through participatory modelling, *Water Resour. Manage.*, 25: 3343–3370.
- Monteiro, H.C., Jardim, C.H., Costa, A.M., Viana, J.H.M. 2016. Uso da terra e variações da temperatura na Bacia Hidrográfica do Córrego Marinheiro em Sete Lagoas-MG. XII Simpósio Brasileiro De Climatologia Geográfica, Variabilidade E Suscetibilidade Climática: Implicações Ecosistêmicas e Sociais.
- Noce, C.M., Teixeira, W., Machado, N.1997. Geoquímica dos gnaisses TTGs e granitoides neoarqueanos do Complexo Belo Horizonte, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, 27(1): 25-32.
- Nogueira, M. 2005. Sete Lagoas: A dinâmica funcional de uma cidade média e sua inserção na rede urbana de Minas Gerais. *Boletim Goiano de Geografia*, 25, 47-60.
- Nunes Jr, T.T., Heller, L., Silva, P.L., Rezende, S., Radicchi, A.L.A. 2010. Prestação dos Serviços de Água e Esgotos em Sete Lagoas – MG. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, 12(1), 119-139.

- Oliveira D.V. 2018. Caracterização geofísica e estrutural de área cárstica na cidade de Sete Lagoas, MG como subsídio para estudos geotécnicos. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 111p.
- Oliveira, L.M. 2010. Acidentes geológicos urbanos. Mineropar – Serviço Geológico do Paraná, Curitiba, 78p.
- Pedrosa, S. A. 1992. Caracterização geomorfológica. Informações Básicas para gestão Territorial, Região de Sete Lagoas MG. CPRM-CETEC, Belo Horizonte, Minas Gerais, 29p.
- Peixoto, J. 1994. O barulho da água: os municípios e a gestão dos serviços de saneamento. Editora Água e Vida, São Paulo, 94p.
- Peñaranda J. R. 2016. Condicionamento estrutural e litológico da porosidade cárstica da Formação Sete Lagoas, Município de Sete Lagoas (MG). Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 75p.
- Pereira, D.L., Galvão, P., Lucon, T., Fujaco, M.A. 2019. Adapting the EPIK method to Brazilian Hydro(geo)logical context of the São Miguel watershed to assess karstic aquifer vulnerability to contamination. *Journal of South American Earth Sciences*, 90, 191-203.
- Pessoa, P. F. P. 1996. Caracterização hidrogeológica da região cárstica de Sete Lagoas-MG: potencialidades e riscos (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Pessoa P. F. P. 2005. Hidrogeologia dos aquíferos cársticos cobertos de Lagoa Santa, MG. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Tese de Doutorado, 575p.
- Petelet-Giraud, E.; Cary, L.; Cary, P.; Giglio-Jacquemot, A.; Bertrand, G.; Hirata, R.; Alves, L; Martins, V.; Melo, A; Montenegro, S. M. G. L.; Chatton, Eliot; Franzen, M.; Aurouet, 2017. A. Multi-layered water resources, management, and uses under the impacts of Global Changes in a Southern Coastal Metropolis: when will it be already too late? *Crossed analysis in Recife, NE Brazil. Environmental Science* v. 13, p. 13.
- Plano Municipal de Saneamento Básico de Sete Lagoas, 2015. Produto 4 – Programas projetos e ações (PPA). Elaboração DRZ Gestão Ambiental, Sete Lagoas, 365p.
- Pulido, A. 2001. Sobreexplotación de acuíferos y desarrollo sostenible. Problemática de la gestión del agua en regiones semiáridas. *Inst. Est. Almerienses, Dip. Almería, Almería*, 25: 115–132.
- Pulido, A., Castillo, E., Padilla, A. 1989. La sobreexplotación de acuíferos, AIH-AEHS, Almería 687p.
- Qureshi, A. S., McCormick, P. G., Sarwar, A., Sharma, B. R. 2010. Challenges and prospects of sustainable groundwater management in the Indus Basin, Pakistan, *Water Resour. Manage.*, 24: 1551–1569.
- RADAMBRASIL. 1982. DNPM. Folha SD.23, Brasília. Rio de Janeiro, 660 p.
- Reis, H.L.S., Alkmim, F.F., Fonseca, C.S., Nascimento, T.C., Suss, J.F., Prevatti, L.D. 2017. The São Francisco Basin. In: Heilbron, M., Cordani, U.G., Alkmim, F.F. (eds.). *São Francisco Craton, Eastern Brazil – Tectonic Genealogy of a Miniature Continent*. Suíça, Springer International Publishing Switzerland, 331p.
- Reis Junior, W. 2016. Caracterização das unidades geotécnicas da porção leste da região metropolitana de Belo Horizonte, MG. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, 163p.
- Ribeiro J. H., Tuller, M. P., Danderfer Filho, A. 2003. Mapeamento geológico da região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais (escala 1:50.000) – Texto Explicativo. In: Projeto Vida. Belo Horizonte: CPRM, 1992.
- Rizzini, C.T. 1997. Tratado de Fitogeografia do Brasil: aspectos sociológicos, ecológicos e florísticos. 2 ed. Âmbito Cultural Edições, São Paulo, 747p.
- Rodríguez-Estrella, T. 2004. Sobreexplotación de acuíferos y desertificación en el Sureste Español, Capítulo del Libro: Aridez, Salinización y Agricultura en el Sureste Ibérico, Fundación Ramón Areces y Fundación Instituto EuroMediterranean de Hidrotecnia, Madrid, 105–134.
- Rodríguez-Estrella, T.R. 2012. The problems of overexploitation of aquifers in semi-arid areas: the Murcia Region and the Segura Basin (South-east Spain) case. *Hydrology and Earth System Science Discussions*. 9: 5729-5756.
- Romano, A.W., Araujo, J.C.S., Knauer, L.G., Paiva, C.T. 2014. Geologia e recursos minerais da folha Contagem SE.23-Z-C-V, estado de Minas Gerais. Programa Geologia do Brasil, CPRM, Belo Horizonte, 87p.

- Sánchez, L.E. & Lobo, H.A.S. 2016. Guia de boas práticas ambientais na mineração de calcário em áreas cársticas. Sociedade Brasileira de Espeleologia, São Paulo, Campinas, 263p.
- Santos D. F. M. 2016. Dinâmica do uso e cobertura do solo nos municípios de Sete Lagoas e Prudente de Morais – MG: Uma análise espacial do crescimento urbano. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, 58p.
- Sen, Z. 2015. Groundwater Management. In. Practical and applied hydrogeology. Elsevier, 424p.
- Serviço Autônomo de Água e Esgoto – SAAE. <http://www.saaesetelagoas.com.br/institucional/saae-em-numeros>. Acesso em: 12 de outubro de 2019.
- Silva I.C. 2013. Evolução Dinâmica Do Sistema De Bacias Tipo Rifte Recôncavo – Tucano - Jatobá Com Base Em Dados De Campo. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Tese De Doutorado, 308p.
- Simmers, I., Villarroya, F., Rebollo, L. 1991. Selected papers on aquifer overexploitation, IAH, 392p.
- Simonato, M. D. 2012. Custo de energia elétrica no bombeamento de poços em áreas de intensa exploração: estudo de caso em São José do Rio Preto – SP, São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, Dissertação de Mestrado.
- Stevanović, Z. 2018. Global distribution and use of water from karst aquifers. Geological Society, London, Special Publications, 466, SP466-17.
- Teixeira W., Toledo M.C.M.de, Fairchild T.R., Taioli F. 2003. Decifrando a Terra 2ª ed. São Paulo: Oficina de textos, 557p.
- Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. 1955. Publications in climatology. The water balance, 8, 1-104.
- Travassos, L. E. P., Rodrigues, B. D., Timo, M. B. 2015. Glossário conciso e ilustrado de termos cársticos e espeleológicos. Belo Horizonte: PUC Minas, 65 p.
- Tuller, M. P., Ribeiro, J. H., Danderfer, A. 1992. Mapeamento Geológico da área do Projeto VIDA, CPRM, Belo Horizonte. Relatório Intemo
- Tuller, M. P., Ribeiro, J. H., Signorelli, N., Féboli, W. L. 2010. Projeto Sete Lagoas - Abaeté: estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM. Escala 1:100.000. Programa Geologia do Brasil - PGB.
- Vías, J.M., Andreo. B., Perles. M.J., Carrasco. F., Vadillo, I., Jiménez, P. 2006. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method: application in two pilot sites in southern Spain. Hydrogeol J 14(6): 912–925.
- Vieira, L. C., Almeida, R. P., Trindade, R. I., Nogueira, A. C., & Janikian, L. 2007. A Formação Sete Lagoas em sua área-tipo: fácies, estratigrafia e sistemas deposicionais. Revista Brasileira de Geociências, 37(4 suppl), 168-181.
- Wada Y., van Beek L.P.H., Sperna Weiland F.C., Chao B.F., Wu Y-H., Bierkens M.F.P. 2012. Past and future contribution of global groundwater depletion to sea-level rise. Geophys Res Lett 39(9), L09402.
- White, W. B. 2003. Conceptual models for karstic aquifers. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 1 (1) January 2003, p.2.
- Younos, T., Schreiber, M., & Ficco, K. K. (Eds.). 2019. Karst Water Environment: Advances in Research, Management and Policy (Vol. 68). Springer
- Zalán, P.V., Silva, P.C.R. 2012. Bacia do São Francisco. In: Hasui, Y., Carneiro, C.D.R., Almeida, F.F.M., Bartorelli, A. (eds.). Geologia do Brasil. São Paulo, Beca, 900 p