

**SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE SETE
LAGOAS - SAAE**

**ESTUDO HIDROGEOLÓGICO
NO MUNICÍPIO DE SETE LAGOAS (MG)**

RELATÓRIO FINAL

**Volume 1/6
Relatório Técnico**

Elaboração e Execução
SERVMAR Serviços Técnicos Ambientais Ltda.

Dezembro de 2013

Elaboração e Execução

SERVMAR Serviços Técnicos Ambientais Ltda.

Maurício Prado Alves – Diretor Técnico

Mateus Delatim Simonato – Gerente do Contrato

Equipe Executora

Jorge Ramón Peñaranda Salgado – Coordenador

Arnaldo Cordeiro da Silva

Daniela Barbatí Osório

Gilcélia Cristina Teles Barboza

Márcio Costa Abreu

Paulo Henrique Galvão

Saulo Bertolino dos Santos

Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Sete Lagoas - SAAE
Rua Major Campos, 83
CEP:35 700-011
PABX: (31) 2106-0100
Endereço eletrônico: <http://www.saaesetelagoas.com.br/>

Elaboração e execução:
SERVMAR Serviços Técnicos Ambientais Ltda.

Todos os direitos reservados
É permitida a reprodução de dados e de informações, desde que citada a fonte.

Estudos Hidrogeológicos no município de Sete Lagoas - MG

Volume 1/6 – Relatório Técnico

Sete Lagoas: SAAE, 2013

1. Recursos Hídricos
2. Aquífero Cárstico
 - I. Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Sete Lagoas - SAAE
 - II. SERVMAR Serviços Técnicos Ambientais Ltda.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	ÁREA DE ESTUDO.....	2
2	OBJETIVOS.....	4
3	LEVANTAMENTO E INTERPRETAÇÕES DE DADOS EXISTENTES.....	4
3.1	PRODUTOS DE IMAGEAMENTO E BASES CARTOGRÁFICAS.....	5
3.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE ESTUDOS EM AMBIENTES CÁRSTICOS....	8
3.3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	18
4	BANCO DE DADOS DOS POÇOS PRODUTORES DE ÁGUA.....	50
4.1	ORGANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE DADOS SOBRE OS POÇOS DO SAAE	51
4.2	CADASTRO DE POÇOS DO SAAE	81
4.3	CADASTRO DE POÇOS DO MUNICÍPIO DE SETE LAGOAS.....	83
5	HIDROGEOQUÍMICA.....	90
5.1	COLETA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	90
5.2	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS HIDROQUÍMICOS	96
5.3	SÍNTESE DOS RESULTADOS ANALÍTICOS	101
5.4	INTERPRETAÇÃO E AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	118
6	GEOLOGIA.....	139
6.1	CARACTERIZAÇÃO LITOLÓGICA – UNIDADES MAPEADAS	141
6.2	CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL	158
6.3	INTERPRETAÇÃO ESTRATIGRÁFICA E MAPA GEOLÓGICO	165
7	HIDROGEOLOGIA	169
7.1	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL	169
7.2	AVALIAÇÃO DA QUANTIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS 188	
7.3	RESERVAS, POTENCIALIDADES E RECURSOS EXPLOTÁVEIS	203
8	VULNERABILIDADE NATURAL E RISCO À CONTAMINAÇÃO DO SACSL.....	214
8.1	VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS DO SACSL 215	
8.2	CADASTRO E CLASSIFICAÇÃO DE FONTES POTENCIAIS DE CONTAMINAÇÃO 227	
8.3	AVALIAÇÃO DO RISCO À CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .	232
9	AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DE FEIÇÕES CÁRSTICAS EM SETE LAGOAS ..	235
10	GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS	244
10.1	CONTRIBUIÇÕES À GESTÃO EMPRESARIAL DO SAAE COM FOCO NO USO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS	244
10.2	CONTRIBUIÇÕES PARA A GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS NO MUNICÍPIO DE SETE LAGOAS.....	250



11	CONCLUSÕES.....	258
12	RECOMENDAÇÕES	262
13	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	266

Índice de Figuras

Figura 1.1	Localização do município de Sete Lagoas.	3
Figura 3.1	Distribuição espacial das ortofotos aéreas (em azul e rachurado).....	5
Figura 3.2	Distribuição espacial das imagens <i>Quickbird</i>	6
Figura 3.3	Distribuição da cobertura de rochas carbonáticas na superfície terrestre. A precisão na representação depende da escala e do mapeamento (WILLIAMS & FORD, 2006).....	9
Figura 3.4	Áreas cársticas no Brasil (modificado WILLIAMS & FORD, 2006).....	14
Figura 3.5	Densidade demográfica na zona urbana de Sete Lagoas.....	20
Figura 3.6	Expansão urbana de Sete Lagoas	21
Figura 3.7	Zoneamento de uso e ocupação do solo.....	24
Figura 3.8	Mapa de zonas administrativas do SAAE.....	27
Figura 3.9	Relação litológica clássica da base do Grupo Bambuí em contato inferior com o Complexo Gnáissico-Migmatítico Indiferenciado (baseado em CPRM, 2003).....	30
Figura 3.10	Geologia do Município de Sete Lagoas (CPRM, 2003).....	36
Figura 3.11	Domínios Geomorfológicos	40
Figura 3.12	Mapa Topográfico.....	43
Figura 3.13	Localização e municípios abrangidos pela sub-bacia hidrográfica do Rio Paraopeba (CIBAPAR, 2013).....	45
Figura 3.14	Bacia hidrográfica do rio das Velhas, com destaque a sua porção média, a qual se insere o ribeirão Jequitibá (CBH VELHAS, 2013).....	46
Figura 3.15	Rede de drenagens e localização das lagoas	48
Figura 4.1	Localização dos poços com intervenção.	56
Figura 4.2	Localização dos poços com teste de produção.....	69
Figura 4.3	Mapa de vazões específicas (Q/s) de Sete Lagoas. -	73
Figura 4.4	Localização dos poços bombeados e seus respectivos poços de observação....	75
Figura 4.5	Transmissividade para a região estudada.....	80
Figura 4.6	Localização dos poços do SAAE com perfis litológicos e construtivos.	82
Figura 4.7	Fontes de dados do cadastro de poços de Sete Lagoas	84
Figura 4.8	Gráfico de distribuição do uso da água subterrânea	85



Figura 4.9 Uso da Água Subterrânea nos poços cadastrados no município de Sete Lagoas	86
Figura 4.10 Situação da outorga dos poços no município de Sete Lagoas.....	87
Figura 4.11 Adensamento de poços no município de Sete Lagoas	89
Figura 5.1 Mapa de localização dos poços amostrados.....	91
Figura 5.2 Sistema de classificação hidrogeoquímica para águas naturais usando o diagrama trilinear de Piper (modificado de FETTER, 2001).....	100
Figura 5.3 Gráficos dos resultados de pH: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.....	104
Figura 5.4 Gráficos dos resultados de sólidos totais dissolvidos: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.	104
Figura 5.5 Correlação entre condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos.....	105
Figura 5.6 Gráficos dos resultados de condutividade elétrica: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.....	106
Figura 5.7 Gráfico de frequência acumulada do potencial de oxirredução.....	106
Figura 5.8 Gráficos dos resultados de alcalinidade total: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.	107
Figura 5.9 Gráficos dos resultados de dureza total: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.	108
Figura 5.10 Gráficos dos resultados de nitrato: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.....	109
Figura 5.11 Gráfico de frequência acumulada do ânion nitrito.	110
Figura 5.12 Gráfico de correlação do cloreto com o sódio.	111
Figura 5.13 Gráficos dos resultados de cloreto: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada (não foram utilizados concentrações abaixo do limite de detecção).....	111
Figura 5.14 Gráficos dos resultados de sulfato: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.....	112
Figura 5.15 Gráficos dos resultados de bicarbonato: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.	113
Figura 5.16 Gráficos dos resultados de sílica: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.....	113
Figura 5.17 Gráficos dos resultados de sódio: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.....	114
Figura 5.18 Gráficos dos resultados de potássio: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada (não foram utilizadas concentrações abaixo do limite de detecção).115	



Figura 5.19 Gráficos dos resultados de cálcio: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.	115
Figura 5.20 Gráficos dos resultados de magnésio: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.	116
Figura 5.21 Gráficos dos resultados de ferro total: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.	117
Figura 5.22 Gráficos dos resultados de ferro total: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.	117
Figura 5.23 Diagrama de Piper representando os grupos identificados pelas análises químicas.	119
Figura 5.24 Razão sílica/bicarbonato nas amostras analisadas.	120
Figura 5.25 Esquema do ciclo do nitrogênio.	124
Figura 5.26 Ocorrência de nitrato e nitrito nas amostras analisadas.	127
Figura 5.27 Correlação entre nitrato e cloreto: a) todos os resultados com nitrato acima do limite de detecção do método utilizado pelo laboratório; b) resultados com concentração de nitrato acima de 10 mg/L.	128
Figura 5.28 Correlação entre nitrato e sódio: a) todos os resultados com nitrato acima do limite de detecção do método utilizado pelo laboratório; b) resultados com concentração de nitrato acima de 10 mg/L.	129
Figura 5.29 Correlação entre nitrato e magnésio: a) todos os resultados com nitrato acima do limite de detecção do método utilizado pelo laboratório; b) resultados com concentração de nitrato acima de 10 mg/L.	129
Figura 5.30 Correlação entre nitrato e potássio: a) todos os resultados com nitrato acima do limite de detecção do método utilizado pelo laboratório; b) resultados com concentração de nitrato acima de 10 mg/L.	130
Figura 5.31 Correlação entre nitrato e sulfato: a) todos os resultados com nitrato acima do limite de detecção do método utilizado pelo laboratório; b) resultados com concentração de nitrato acima de 10 mg/L.	130
Figura 5.32 Densidade demográfica, por região administrativa, zonas de expansão urbana (anos 1949, 1965, 1972, 1989 e 2000) e ocorrência de nitrato.	134
Figura 5.33 Gráfico de classificações de acordo com a relação das concentrações de CaCO ₃ (mg/L) e poços tubulares profundos.	138
Figura 6.1 Localização dos pontos do mapeamento geológico.	140
Figura 6.2 Relação dentre planos de acamamento (S0), em “a”; e eixos de dobra, em “b”, mapeados em afloramentos da Formação Serra de Santa Helena.	161



Figura 6.3 Relação dentre planos de fraturamento mapeados em afloramentos da Formação Serra de Santa Helena.	162
Figura 6.4 Relação entre planos de acamamento (S0), em “a”; e eixos de dobra, em “b” medidos em afloramentos da Formação Sete Lagoas – Membro Lagoa Santa.	163
Figura 6.5 Relação dentre planos de acamamento (S0), em “a”; e eixos de dobra, em “b”; medidos em afloramentos da Formação Sete Lagoas – Membro Pedro Leopoldo.	164
Figura 6.6 Distribuição esterográfica de tendência de planos de fraturamento na Formação Sete Lagoas- Membro Pedro Leopoldo.....	164
Figura 6.7 Relação entre planos de fraturamento principais observados junto a rochas do Complexo Belo Horizonte, com destaque para planos verticalizados de orientações conjugadas ortogonalmente em NNW/SSE e ENE/WSW.....	165
Figura 6.8 Sequência estratigráfica clássica proposta na sequência Norte – Sul do Município de Sete Lagoas.....	166
Figura 6.9 Seções geológicas da área estudada.....	167
Figura 6.10 Mapa geológico do município de Sete Lagoas.....	168
Figura 7.1 Aquíferos de Sete Lagoas	170
Figura 7.2 Modelo hidrogeológico conceitual esquemático do município de Sete Lagoas.	178
Figura 7.3 Gráfico de dispersão de rebaixamento por década de instalação.....	183
Figura 7.4 Localização dos poços com maiores rebaixamentos de nível estático	183
Figura 7.5 Mapa potenciométrico do SACSL.....	185
Figura 7.6 Favorabilidade Hídrica.....	187
Figura 7.7 Localização da estação meteorológica e fluviométrica	192
Figura 7.8 Métodos de separação gráfica.	195
Figura 7.9 Relação entre precipitação média mensal e temperatura média mensal.....	197
Figura 7.10 Balanço hídrico médio mensal para o município de Sete Lagoas.....	199
Figura 7.11 Comportamento do hidrograma do rio Jequitibá.	201
Figura 7.12 Gráficos da distribuição de poços por tipo de uso: quantidade de poços (a); volume explotado (b)	205
Figura 7.13 Volumes captados dos aquíferos em Sete Lagoas	207
Figura 7.14 Áreas de confinamento e de ocorrência do SACSL aplicadas nas estimativas da reserva permanente.....	210
Figura 7.15 Equipotenciais do cálculo da frente de escoamento do SACSL.....	212
Figura 8.1 Diagrama do método COP (VÍAZ <i>et al.</i> , 2006).	217
Figura 8.2 Distribuição dos Índices O _s (Fator O).....	220
Figura 8.3 Distribuição geográfica do Fator O (Método COP).....	223



Figura 8.4 Vulnerabilidade natural do SACSL à contaminação.....	226
Figura 8.5 Categorização das fontes de contaminação pontuais, de acordo com o método POSH (Foster <i>et al.</i> , 2006).....	228
Figura 8.6 Resumo das características químicas e dos índices de risco para atividades industriais (FOSTER <i>et al.</i> , 2006).....	229
Figura 8.7 Localização das fontes potenciais de contaminação classificadas segundo método POSH.....	231
Figura 8.8 Mapa do risco à contaminação das águas subterrâneas em Sete Lagoas.	234
Figura 9.1 Mapa de feições cársticas	236
Figura 9.2 Áreas com susceptibilidade a abatimento de terreno e localização de ocorrências.....	239
Figura 9.3 Localização das ocorrências de abatimento de terreno em Sete Lagoas e fatores correlacionados	241
Figura 10.1 Volume explotado diário, poços cadastrados e registros de abatimentos.....	253
Figura 10.2 Mapa das zonas explotáveis do município de Sete Lagoas.....	255

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 Parâmetros hidráulicos (Pessoa, 1996)	38
Tabela 4.1 Resumo dos serviços executados.....	53
Tabela 4.1 Resumo dos serviços executados (continuação).....	54
Tabela 4.2 Condições Construtivas dos Poços do SAAE.....	64
Tabela 4.3 Rotinas mínimas para a gestão dos poços.	65
Tabela 4.4 Equações características dos poços, eficiência hidráulica dos poços, vazões específicas médias e rebaixamentos específicos médios.....	70
Tabela 4.5 Valores de Q/s dos poços ensaiados.....	72
Tabela 4.6 Dados sobre os testes de aquífero.	76
Tabela 4.7 Resultados dos parâmetros hidráulicos.	79
Tabela 5.1 Parâmetros analisados.....	90
Tabela 5.2 Parâmetros analisados, frascaria, preservação e validade das amostras.....	94
Tabela 5.3 Metodologia de quantificação.....	95
Tabela 5.4 Erros permitidos em função da condutividade elétrica.....	96
Tabela 5.5 Balanço iônico dos resultados analíticos.	97
Tabela 5.6 Índices das correlações de Pearson	98
Tabela 5.7 Correlações de Pearson para as amostras coletadas.	99
Tabela 5.8 Resultados analíticos da água subterrânea - parâmetros físico-químicos.....	101



Tabela 5.8	Resultados analíticos da água subterrânea - parâmetros físico-químicos (cont.).	102
Tabela 5.9	Estatística dos parâmetros hidroquímicos de todas as amostras analisadas.	103
Tabela 5.10	Classificação das águas quanto à salinidade de acordo com o STD.	105
Tabela 5.11	Classificação das águas segundo a dureza.	108
Tabela 5.12	Qualidade da água para consumo humano – Portaria MS 2.914, de 2011.	122
Tabela 5.13	Relação entre a ocorrência do composto nitrogenado e a atividade humana.	125
Tabela 5.14	Correlação de Pearson para o nitrato ¹ .	128
Tabela 5.15	Correlação de Pearson para o nitrato ¹ .	128
Tabela 5.16	Comparação da densidade populacional máxima por área administrativa com o valor máximo de 4.800 hab./km ² necessária para que as concentrações sejam no máximo 10 mg/L.	132
Tabela 5.17	Classificação de durezas (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1983).	136
Tabela 7.1	Resumo das características dos aquíferos.	179
Tabela 7.2	Cargas hidráulicas dos poços do SAAE.	182
Tabela 7.3	Classificação da favorabilidade hídrica e as transmissividades.	186
Tabela 7.4	Duração máxima de insolação diária média, em diferentes meses e latitudes.	191
Tabela 7.5	Armazenamento de água no solo por tipo de solo (FENN et al, 1975).	193
Tabela 7.6	Comportamento médio mensal da precipitação e temperatura e vazões médias mensais do rio Jequitibá.	194
Tabela 7.7	Comportamento médio mensal da precipitação e temperatura (Estação INMET – EMBRAPA - Sete Lagoas).	196
Tabela 7.8	Dados acumulados de precipitação, excedente de água, deficiência de água, evapotranspiração potencial e evapotranspiração real.	197
Tabela 7.9	Balanço hídrico climatológico – Estação Sete Lagoas.	199
Tabela 7.10	Elementos de cálculo da separação do escoamento superficial e subterrâneo.	201
Tabela 7.11	Quantitativos dos componentes hidrológicos.	202
Tabela 7.12	Valores de porosidade efetiva para alguns materiais geológicos.	209
Tabela 8.1	Valores utilizados para o índice de Solo do Fator O [O _s].	220
Tabela 8.2	Índices utilizados para o Fator Rocha (O _L) – Litologia <i>versus</i> espessuras.	221
Tabela 8.3	Índices utilizados para o Fator Rocha (O _L) – Condições de confinamento.	222
Tabela 8.4	Tabela de classificação final para o Fator O.	222
Tabela 8.5	Dados de precipitação média no município de Sete Lagoas (1961 a 1991).	225
Tabela 9.1	Registros de abatimentos de terreno no município de Sete Lagoas.	238
Tabela 10.1	Plano de mitigação de ameaças para a melhora operacional do sistema.	249



Índice de Volumes

Volume 1/6

Relatório Técnico

Volume 2/6

Anexo I – Mapas com escalas de detalhe (Impressão A0)

Volume 3/6

Anexo II – Relatório das Perfilagens Óticas

Anexo III – Dados e gráficos dos ensaios hidráulicos

Volume 4/6

Anexo IV – Fichas de poços do SAAE e planilhas de dados

Volume 5/6

Anexo V – Cadeias de Custódia e Laudos Analíticos

Anexo VI – Compilação dos Resultados das Análises Químicas

Volume 6/6

Anexo VII – Mapeamento Geológico – Fichas de Campo

Anexo VIII – Cadastro de fontes potenciais de contaminação



AGRADECIMENTOS

A empresa SERVMAR Serviços Técnicos & Ambientais Ltda. e o Serviço Autônomo de Água e Esgoto – SAAE agradecem a todos que colaboraram com a disponibilização de documentos e informações técnicas importantes para a execução dos trabalhos. De forma especial queremos agradecer:

- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais;
- EMATER Sete Lagoas-MG;
- Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Sete Lagoas;
- IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas;
- SUPRAM – Superintendência Regional de Regularização Ambiental;
- SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e desenvolvimento Sustentável;
- Comitês de Bacia Hidrográfica regionais;
- Gisela Avelar
- João Hebert - EMBRAPA
- Departamento de Geoprocessamento da Prefeitura Municipal de Sete Lagoas - (Marlêde Ribeiro de Oliveira)
- Jaime Paulino



1 INTRODUÇÃO

O município de Sete Lagoas (MG) é integralmente suprido por água subterrânea. A gestão dos recursos hídricos é uma prerrogativa definida pela lei municipal nº 1.083, de 23 de dezembro de 1965, e que concede ao SAAE (Serviço Autônomo de Águas e Esgoto) a responsabilidade pela gestão, a exploração, o tratamento e distribuição da água. Outro aspecto é que o SAAE é um usuário, e é o Estado de Minas Gerais, mediante seus órgãos competentes, quem concede e fiscaliza o cumprimento das exigências relativas ao uso da água subterrânea. Cabe ao município a gestão do uso e a ordenação do solo, que tem como uma das funções a de proteger e conservar a quantidade e a qualidade das águas subterrâneas. A legislação municipal deve prever restrições de atividades em áreas de vulnerabilidade natural dos aquíferos.

A dominialidade pública da água, afirmada na Lei 9.433/97, não transforma o Poder Público federal e estadual em proprietário da água, mas torna-o gestor. A Lei nº13.999/99 dispõe sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos como instrumento participativo e descentralizado de gestão da Política Estadual de Recursos Hídricos. É um instrumento descentralizado e participativo que serve de apoio e de orientação político-institucional. O Plano é capaz de responder às demandas decorrentes das atribuições do IGAM e do CERH, funcionando como peça de compatibilização, articulação e estruturação dos demais instrumentos de gestão. A água subterrânea tem um status especial em relação à sua gestão, são os estados os encarregados de exercer o poder de fiscalização, de aplicação das leis, e estabelecer as competências dentro da estrutura administrativa. No caso do Estado de Minas Gerais quem exerce o papel de gestor é o IGAM (Instituto Mineiro de Gestão de Águas).

A necessidade urgente do desenvolvimento de estudos e ferramentas para a gestão de recursos hídricos em Sete Lagoas tem duas vertentes, uma legal, que pretende alcançar os requerimentos para o uso, e outra técnica relativa ao controle e previsão da qualidade e quantidade de água, especialmente motivado pelo acelerado crescimento do município e a demanda cada vez maior pelo uso da água. Soma-se a isso, o fato de haver um total desconhecimento da real disponibilidade hídrica ou dos riscos de contaminação dos mananciais subterrâneos, e da suscetibilidade natural destes tipos de terrenos a abatimentos, seja devido a processos naturais ou de caráter antrópico. É imperativo o desenvolvimento de um modelo de gestão racional e de tomada de decisões para a complexidade do cenário atual e futuro dos recursos hídricos subterrâneos em Sete Lagoas.



Neste contexto, a Servmar Serviços Técnicos & Ambientais Ltda. foi contratada pelo SAAE para a elaboração e execução do Estudo Hidrogeológico no município de Sete Lagoas. O estudo foi executado a partir das etapas de cadastramento, monitoramento e ensaios de poços representativos, mapeamento geológico de semi-detalhe e de detalhe; criação de um sistema de monitoramento para a gestão de recursos hídricos; e desenho do plano de regularização das intervenções em recursos hídricos do município.

Este relatório final tem como objetivo geral apresentar a metodologia de trabalho, os resultados e os produtos finais, assim como conclusões e recomendações, a fim de contribuir à melhoria do sistema operacional do SAAE. Desta forma, criar as bases para o diálogo com os órgãos estaduais e municipais para a tomada de decisões sobre a gestão de recursos hídricos do município de Sete Lagoas.

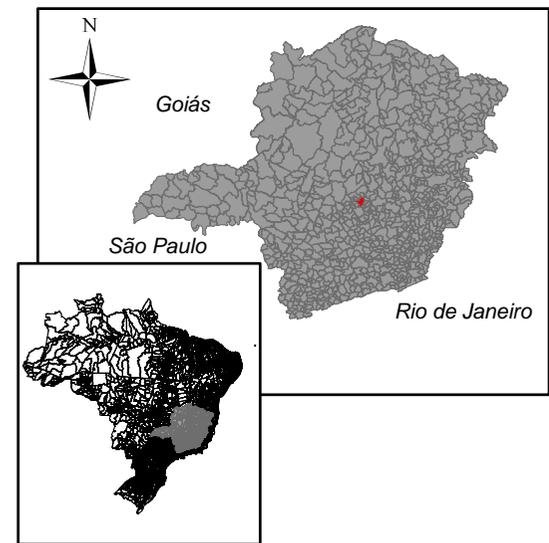
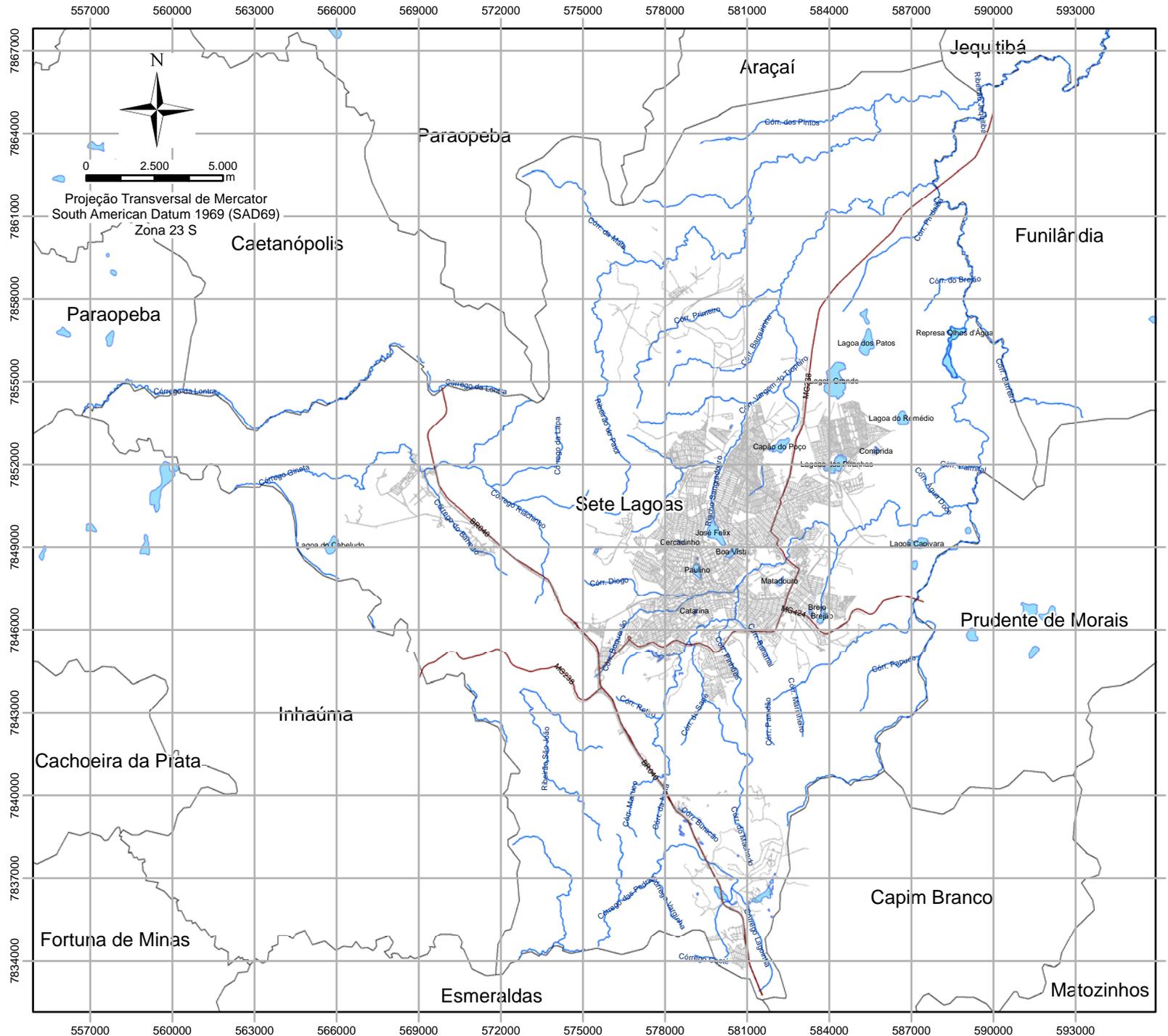
1.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo possui 538 km² e corresponde ao território do município de Sete Lagoas, no Estado de Minas Gerais (Figura 3.1), situado a 70 km a noroeste de Belo Horizonte, capital do Estado. O município representa um importante pólo industrial regional e, segundo o IBGE (2010), conta com uma população de 214.071 habitantes. Sete Lagoas é delimitado pelos municípios de Araçuaí, Caetanópolis e Paraopeba ao norte; Esmeraldas ao sul, Capim Branco, Funilândia, Jequitibá e Prudente de Moraes, a leste; Inhaúma a oeste.

O município se destaca pelo seu desenvolvimento econômico, contando com diversas empresas e indústrias com forte concentração nas atividades extrativistas e de transformação associadas à mineração de calcário, mármore, ardósia, argila e areia. Há também um forte setor siderúrgico com foco na produção de ferro-gusa.

Os principais acessos ao município ocorrem por rodovias estaduais e pela rodovia federal BR-040. Na região sudeste o acesso ocorre pela MG-424 que liga Sete Lagoas à Belo Horizonte, passando pelos municípios de Matozinhos, Pedro Leopoldo e com acesso ao Aeroporto Internacional Trancedo Neves (Confins). A rodovia MG-238 atravessa o município de sudoeste para nordeste, sendo o acesso à BR-040 e, desse modo, à região Metropolitana de Belo Horizonte pelo município de Contagem.





Legenda

- Malha de Ruas
- Rodovias
- Drenagem
- Limite Municipal
- Lagoas
- Localização de Sete Lagoas
- Municípios de Minas Gerais

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas

CONTRATANTE:		 Serviço Autônomo de Água e Esgoto	
PROJETO:		ESTUDO HIDROGEOLÓGICO	
TÍTULO:		Figura 1.1. Localização do município de Sete Lagoas	
ELABORADO:		Daniela Barbatl Osório	
CONTRATO:	3988	 AMBIENTAL & ENGENHARIA	
ESCALA:	1:200.000		
DATA:	DEZ/2013		

2 OBJETIVOS

O presente estudo objetivou a elaboração e execução de Estudo Hidrogeológico no município de Sete Lagoas com o objetivo principal de caracterizar o potencial hidrogeológico dos aquíferos do município, estabelecer critérios para subsidiar futuros estudos de contaminação dos aquíferos e elaborar a cartografia de favorabilidade hídrica e de vulnerabilidade à contaminação.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar quantitativa e qualitativamente as águas subterrâneas;
- Identificar fontes de poluição hídrica, zonas de recarga de aquíferos e áreas de risco geológico;
- Definir uma metodologia de gestão de recursos hídricos subsidiária ao planejamento da ocupação urbana;
- Realizar o cadastro e monitoramento de todos os poços operados pelo SAAE na cidade, estabelecendo um sistema de gestão de recursos hídricos, e;
- Elaborar um plano de regularização, seguindo as exigências de outorga do IGAM, por meio da execução de um estudo hidrogeológico no município, mapeamento geológico de detalhe, implantação de sistemas de monitoramentos dos aquíferos ambientais dos aquíferos explorados e a formulação de melhorias do sistema de captação e distribuição de água.

3 LEVANTAMENTO E INTERPRETAÇÕES DE DADOS EXISTENTES

Esta fase do estudo objetivou o levantamento de dados pré-existentes com foco na caracterização da geologia e hidrogeologia, no cálculo do balanço hídrico, na caracterização e quantificação do uso das águas e na obtenção de bases cartográficas a serem utilizadas no desenvolvimento dos estudos. O estudo concentrou-se também na avaliação da infraestrutura hídrica do SAAE para a captação das águas subterrâneas, bem como na constituição de um cadastro de poços produtores de água no município.

Neste tópico serão apresentadas as discussões acerca da revisão bibliográfica sobre ambientes cársticos e estudos que embasaram as interpretações e compilações sobre a



geologia, hidrogeologia, hidrografia, geomorfologia visando à caracterização da área de estudo.

No intuito de demonstrar o conhecimento adquirido a partir de dados pré-existentis sobre a área de estudo, são apresentados oportunamente os produtos cartográficos gerados e/ou revisados no âmbito deste trabalho que contribuem para a caracterização da área.

3.1 PRODUTOS DE IMAGEAMENTO E BASES CARTOGRÁFICAS

Os produtos de imageamento obtidos pela Servmar consistem em: 37 ortofotografias aéreas de escala 1:40.000 de 1977, distribuídas em 24 pares estereoscópicos, confeccionadas originalmente pela CEMIG (Companhia Elétrica de Minas Gerais) e 3 imagens *Quickbird*, fornecidas pela secretaria de planejamento urbano do município e mediante a intermediação do SAAE. (Figura 3.1).

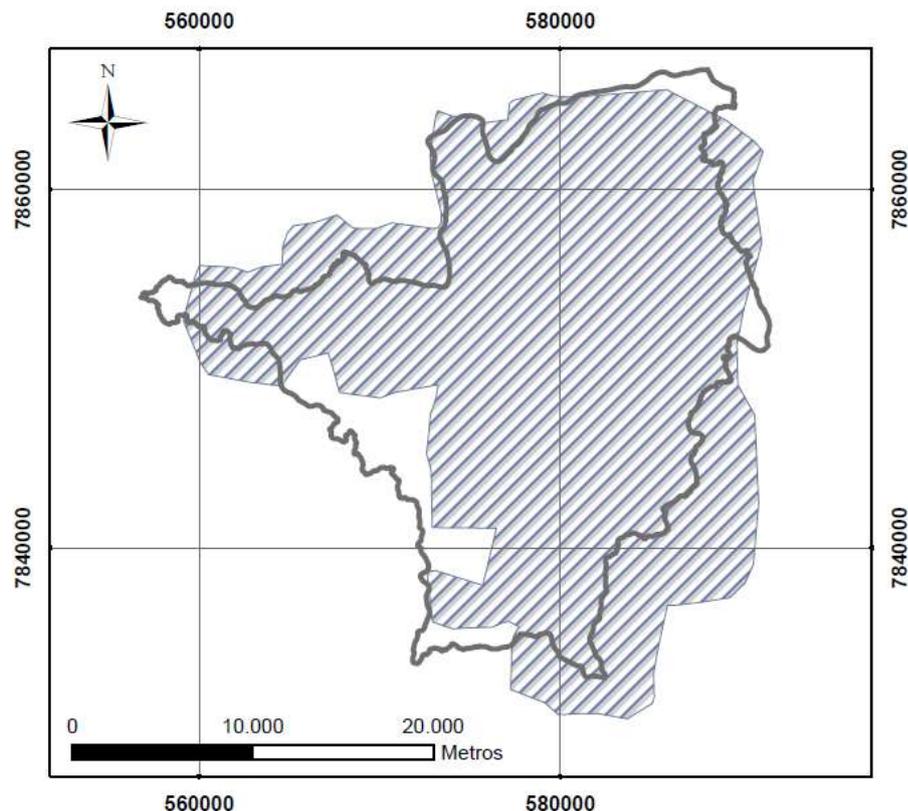


Figura 3.1 Distribuição espacial das ortofotos aéreas (em azul e rachurado).



A imagem *Quickbird* é caracterizada pela alta resolução espacial. O sistema oferece dados com 0,61 metros de resolução espacial em imagens em tons de branco, preto e cinza e 2,4 metros no modo multiespectral, ou seja, imagens de um mesmo objeto, tomadas com diferentes comprimentos de ondas eletromagnéticas (**Figura 3.2**).

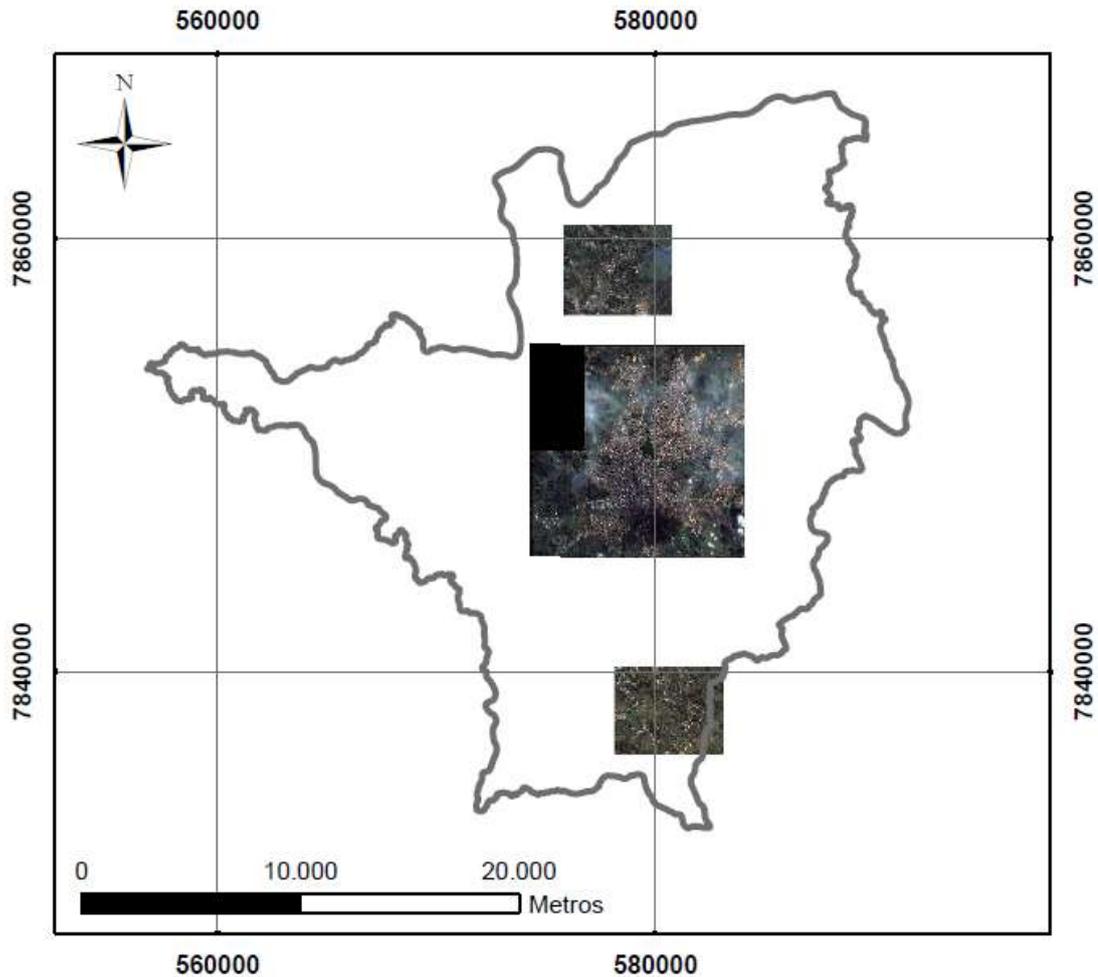


Figura 3.2 Distribuição espacial das imagens *Quickbird*.

As imagens adquiridas somadas a dados cartográficos pré-existentes compuseram o arcabouço digital vetorizado para a elaboração das bases cartográficas de interesse deste estudo. O sistema de informações georreferenciadas (SIG) ou sistema de informações geográficas foi desenvolvido com a utilização do *software Arcgis 10.0*.

Segundo Câmara (2004), o geoprocessamento utiliza técnicas matemáticas e computacionais complexas para o tratamento da informação geográfica. Para tanto, é



utilizado o “Sistema de Informações Geográficas” (SIG). Este sistema é utilizado para o gerenciamento de dados geográficos, análises espaciais de fenômenos e produção cartográfica. A ideia básica é a integração de dados de diversas fontes e criar bancos de dados para controle interno de produtos e serviços, bem como com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial.

O *ArcGIS* elabora e manipula informações vetoriais para o uso e gerenciamento de bases temáticas. Para elaboração de mapas temáticos foi utilizado o *ArcMap*, que permitiu a interpolação de dados vetoriais e matriciais, também denominados de *rasters*, além da análise espacial, criação e edição de dados, padronização e impressão de mapas, bem como a elaboração de uma base de dados.

O sistema de coordenadas adotado foi a projeção *Universal Transversal de Mercator* (UTM), expressa em metros, e o Datum: *South American Datum*, 1969 (SAD 69), zona 23 S.

A elaboração das bases cartográficas contou com mapas e outros dados públicos disponibilizadas pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil), EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), Secretária de Planejamento e Desenvolvimento, Secretária de Meio Ambiente e Comitês de Bacias - Jequitibá e Rio das Velhas, IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas) e, principalmente pelo SAAE.

As bases cartográficas mais aplicadas foram: limites políticos municipais, mapa de ruas e estradas, hidrografia, geologia. Essas bases serviram de fundo para inclusão de outras informações, visando a elaboração de mapas de interesse ao desenvolvimento do presente estudo.

Alguns produtos cartográficos desenvolvidos foram baseados em mapas pré-existentes, tais como: zoneamento de uso e ocupação do solo, cobertura vegetal, hidrografia, geomorfologia, geologia, topografia, pedologia, zonas administrativas do SAAE, entre outros. No entanto, diversos produtos cartográficos foram produzidos ineditamente neste estudo, com destaque para: cadastro de poços produtores de água; mapa de feições cársticas, expansão urbana, zonas explotáveis, hidrogeologia, potenciometria, sistemas de drenagens e diversos outros.

Para a confecção dos mapas de drenagem e feições cársticas, as ortofotografias aéreas foram analisadas estereoscopicamente. A estereoscopia é uma técnica usada para se obter informações do espaço tridimensional, a partir da análise de uma única imagem, resultado



da fusão de duas ortofotos do mesmo objeto tiradas de centros de perspectiva diferentes. Para a interpretação tridimensional das ortofotografias aéreas foi utilizado o estereoscópio de espelhos.

Neste volume de texto do relatório final são incluídos os mapas em escala compatíveis para visualização em impressão A4 e/ou A3. Alguns produtos cartográficos foram elaborados em escalas maiores e são apresentados no Anexo I, impressos em tamanho A0.

3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE ESTUDOS EM AMBIENTES CÁRSTICOS

A revisão bibliográfica apresentada foi focada especificamente na discussão do conhecimento sobre a temática de estudos em ambientes cársticos, devido à especificidade do assunto, abordando a evolução dos estudos nesse campo, os principais conhecimentos existentes em escala nacional e os estudos específicos a Sete Lagoas.

3.2.1 EVOLUÇÃO DOS ESTUDOS SOBRE AQUÍFEROS CÁRSTICOS

Os sistemas cársticos são caracterizados por feições geomorfológicas desenvolvidas a partir de processos de dissolução de uma matriz rochosa, mais comumente desenvolvidas em rochas carbonáticas. A **Figura 3.3** mostra sua ocorrência no globo, compreendendo cerca de 10 a 15% da superfície terrestre (FORD & WILLIAMS, 2007). Tais regiões vêm sendo utilizadas desde os primórdios da humanidade como fontes de alimentos e abrigo. Foram locais para o estabelecimento dos primeiros assentamentos humanos devido à disponibilidade de água potável. Mundialmente é possível constatar que populações inteiras são abastecidas por mananciais cársticos.

Muito do avanço relacionado à hidrologia cárstica deve-se às atividades de espeleólogos europeus e norte-americanos, cujas explorações foram fundamentais para a elaboração do entendimento da gênese das cavernas e dos mecanismos de circulação das águas subterrâneas, como agentes de construção deste relevo (KLIMCHOUK *et al.*, 2000). Um nome, entretanto, merece destaque pelos primeiros estudos sobre os processos responsáveis pelo desenvolvimento do relevo cárstico e da hidrologia de subsuperfície. Trata-se de Jovan Cvijic, cujas obras na região do carste na Croácia e na Bósnia, entre 1893 e 1918, marcaram, de certa forma, o fim das especulações sobre a natureza de formação das feições cársticas e do movimento das águas subterrâneas (LOWE, 2000).



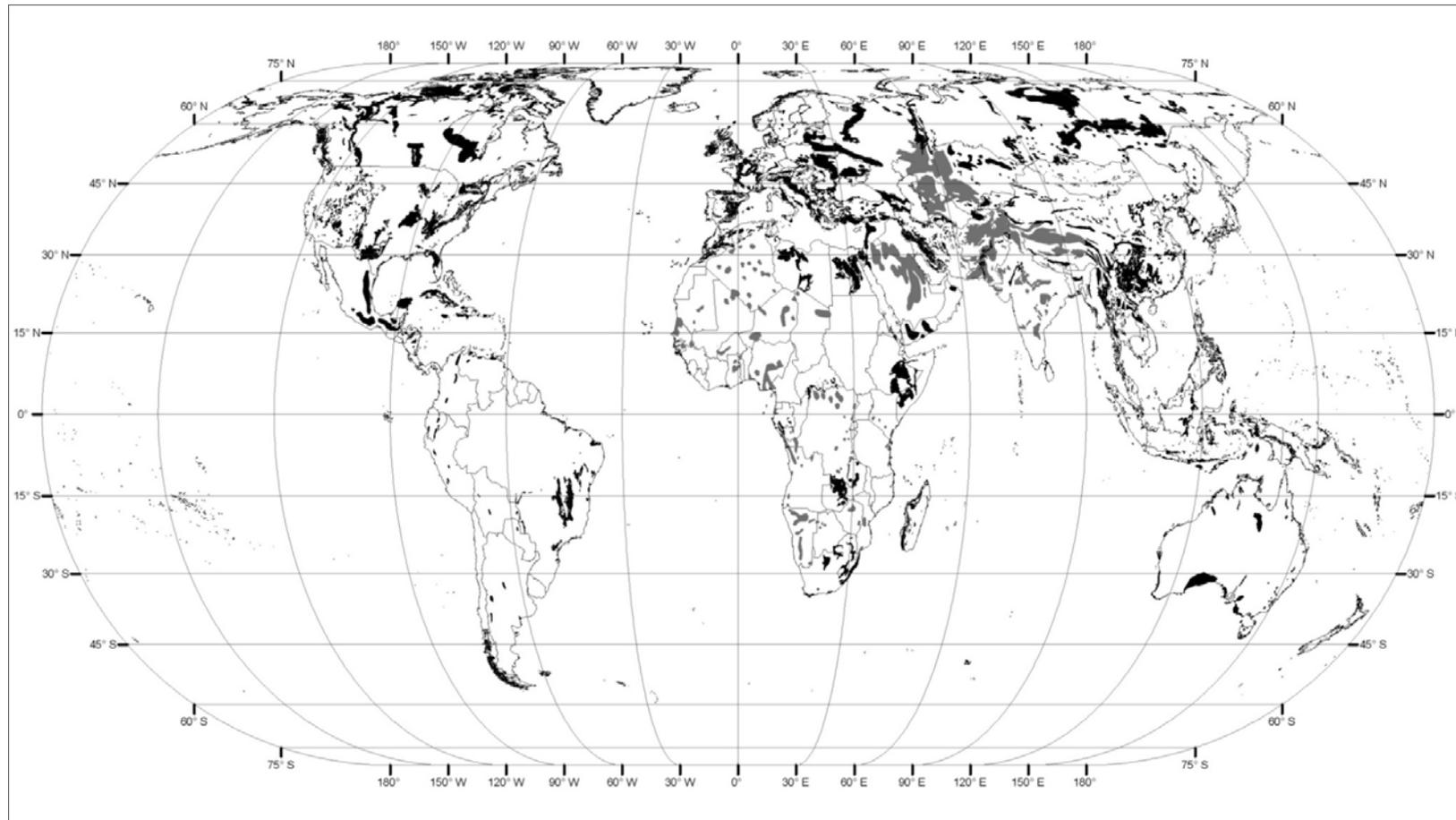


Figura 3.3 Distribuição da cobertura de rochas carbonáticas na superfície terrestre. A precisão na representação depende da escala e do mapeamento (WILLIAMS & FORD, 2006).



Uma das primeiras tentativas de conceituar aquíferos cársticos foi realizada por White (1969), focando a atenção para a variedade de ambientes geológicos e sua influência no controle sobre os padrões de fluxo das águas subterrâneas. Este método foi posteriormente ampliado (WHITE, 1977) para tomar em conta a área total das águas subterrâneas do sistema. Com base apenas no tipo de permeabilidade, Shuster & Branco (1971) dividiram os tipos de aquíferos em "conduto de fluxo", onde se encontram bem desenvolvidos os sistemas de canalização e de "fluxo difuso", no qual esse sistema não está desenvolvido. Esta classificação binária foi logo reconhecida como insuficiente, e outras tentativas de organizar um esquema de classificação foram feitas. Smart & Hobbs (1986) adicionaram aos seus estudos os dados de recarga e de armazenamento do aquífero como dois parâmetros a mais, com o objetivo de desenvolver uma classificação desse tipo de aquífero com três parâmetros. Ray *et al.* (1994) levaram esse conceito um passo adiante para se chegar a um fator de risco combinado para traçar um mapa de sensibilidade das águas subterrâneas para o Estado de Kentucky, nos Estados Unidos.

Com relação à caracterização hidráulica em aquíferos cársticos, Király (1978) e Sauter (1992) demonstraram que a condutividade hidráulica pode mudar com o aumento do volume do aquífero por várias ordens de magnitude. Pequenos testes de bombeamento, normalmente, fornecem apenas informações sobre as propriedades hidráulicas da matriz fissurada. Isto é devido ao fato dos poços estarem geralmente localizados entre condutos cársticos, sendo que o raio de investigação é limitado pela taxa de captação do poço de bombeamento.

Apesar do desenvolvimento nas pesquisas em carstes, White (2002) mostrou que os estudos modernos ainda carecem de várias frentes de pesquisa, mas têm sido observados avanços considerados quanto às propriedades, características e evolução dos aquíferos cársticos. Segundo o autor, os parâmetros de interesse para o conhecimento do comportamento do aquífero cárstico devem ser tomados perante, pelo menos, três abordagens temáticas fundamentais: hidrogeologia, hidrodinâmica e hidroquímica. A hidrogeologia, denotando o conhecimento acerca do condicionamento litoestrutural por onde se desenvolvem os processos de circulação; a hidrodinâmica, no sentido de quantificar as dimensões ou ordens de grandeza dos parâmetros hidráulicos preponderantes no meio aquífero e; a hidroquímica local, relacionando o conhecimento dos processos interativos entre a dinâmica de circulação hídrica e as litologias e estruturas constituintes dos aquíferos cársticos cobertos por solos.



Bakalowicz (2005), a partir do estudo *Karst groundwater: a challenge for new resources*, aborda as dificuldades em se determinar modelos conceituais para esse tipo de aquífero, devido à alta heterogeneidade, desorganização e altas velocidades de fluxo das águas neste ambiente. Os métodos de estudos usados em hidrogeologia clássica (poços, testes de bombeamento, etc.) são geralmente inválidos em aquíferos cársticos, devido os resultados não poderem ser estendidos para todo o aquífero. Pontos importantes permanecem sem serem resolvidos, sendo que alguns deles estão relacionados a aspectos fundamentais, tais como estrutura dos espaços: apenas uma rede de condutos ou uma rede de conduto mais uma matriz porosa. Outro ponto destacado seria no aspecto prático, como avaliação da capacidade de reserva e vulnerabilidade ou a previsão de zonas de alta produtividade.

Como pôde ser notada, a dificuldade em se determinar modelos conceituais para esse tipo de aquífero é também observada em estudos de gestão de recursos hídricos em carstes. Uma das causas dos problemas da gestão das águas cársticas está na impossibilidade e/ou na dificuldade de definição das áreas e limites da bacia hidrográfica, bem como suas alterações no tempo e no espaço. A determinação dos limites da bacia hidrográfica e da área de captação é o ponto de partida em todas as análises hidrológicas e um dos dados essenciais que servem de base para a gestão dos recursos hídricos (BONACCI *et al.*, 2008). Para a circulação de água no carste, este problema hidrológico, que é relativamente simples (em outros tipos de terrenos mais homogêneos), representa uma tarefa extremamente complexa, por vezes insolúvel. Muitas vezes, a posição dos limites de captação do carste depende do nível das águas subterrâneas que mudam fortemente no tempo. Em algumas situações o nível da água subterrânea pode estar tão elevado (causada por chuvas torrenciais e inundações em áreas de recarga) que podem reativar condutos cársticos subterrâneas inativos, causando a redistribuição das áreas de captação (BONACCI *et al.*, 2006).

De forma a minimizar tais dificuldades, Foster *et al.* (2002) advogam que se deve lançar mão também do estabelecimento de zonas de captura de poços e mananciais públicos. Assim, utilizam um misto de métodos de mapeamento de estruturas cársticas (como dolinas e outras feições) para definir áreas extras a serem protegidas. Este método é baseado em trabalhos de Daly & Warren (1998).

Outra importante ferramenta de previsão disponível para a gestão dos recursos hídricos em aquíferos são os modelos numéricos de águas subterrâneas. Estes modelos podem ser utilizados para testar ou refinar diferentes modelos conceituais, estimar parâmetros



hidráulicos e, o mais importante para os recursos hídricos, prever como o aquífero poderá responder às mudanças no bombeamento e do clima. Modelos numéricos têm sido desenvolvidos com sucesso em aquíferos porosos, no entanto, a aplicação de modelos numéricos em aquíferos cársticos é mais problemática, pois esses são geralmente muito heterogêneos, ou seja, caracterizados por porosidade secundária (fraturas) ou permeabilidade terciária (canalização) que podem apresentar caminhos de estrutura ou de fluxo. Estes aquíferos são susceptíveis a ter um componente de fluxo turbulento, o que pode ser problemático na medida em que a maioria dos modelos numéricos é baseada na lei de Darcy, na qual assume um fluxo laminar (SCANLON *et al.*, 2003). Quinlan *et al.* (1996) afirmaram que apesar de um modelo numérico em aquífero cárstico possa simular cargas hidráulicas, fluxos de água subterrânea e descargas, muitas vezes não conseguem prever corretamente informações fundamentais, como a direção do fluxo, destino e a velocidade da água. Portanto, quando se discute a relevância da modelagem numérica em um aquífero é importante identificar que tipo de modelo está sendo proposto: um modelo de fluxo (cargas hidráulicas, fluxos de águas subterrâneas e recargas) ou um modelo de transporte (direção de fluxo, destino e velocidade).

Não é surpresa que os modelos de transporte podem não apresentar bons resultados em aquíferos cársticos, especialmente em escala local. Para um resultado satisfatório, necessita-se de um conhecimento profundo da distribuição das fraturas e dos sistemas de condutos. O modelo de fluxo de transporte de solutos em rochas fraturadas é uma área de investigação ativa (BEAR *et al.*, 1993). Reconhece-se, nesses estudos, a dificuldade de prever, a priori, a direção e taxa de soluto transportado por meio de um aquífero fraturado. Em sistemas fraturados, como em sistemas cársticos, o conceito de um volume elementar representativo é usado onde o tamanho da área de interesse, ou a célula em um modelo, torna-se grande o suficiente para se aproximar a equivalência de um meio poroso (PANKOW *et al.*, 1986; NEUMAN, 1987). Tais limitações sobre tornar representativo um modelo numérico, associadas a dados escassos e/ou pouco confiáveis levam, nesses casos, ao desuso de modelos numéricos para interpretações sobre a dinâmica de fluxo subterrâneo em ambiente cárstico.

Ravbar & Kovačič (2006), estudaram a situação da gestão da água em carstes na Eslovênia e constataram que, na legislação local, as características especiais do fluxo de água dentro das regiões cársticas pouco influem na determinação dos critérios para proteção das fontes de água. Em contraste, em outros países, o conceito de mapa de vulnerabilidade de águas subterrâneas tem sido utilizado com sucesso para o zoneamento de proteção e



planejamento do uso da terra em carste. Baseada na *Waters Act*, de 2002, a legislação eslovena afirma que certo aquífero deve ser dividido em três zonas de proteção básica, sendo que seus limites devem ser determinados com base em dados sobre velocidades e direções de fluxo das águas subterrâneas, profundidade do lençol freático, atenuação de poluentes reais e potenciais, características químicas das águas subterrâneas e grau de extensão e carstificação do arcabouço hidrológico. Hoje em dia, diversas metodologias estão em uso, entre as quais também métodos com especial consideração aos aquíferos cársticos. Dessa forma, os autores defendem a aplicação de alguns dos métodos mais utilizados em uma única área de estudo, a fim de se submeter eventuais problemas metodológicos que possam surgir durante a aplicação, e assim, propor um método comum para o mapeamento da vulnerabilidade em aquíferos cársticos, o que seria a base para as zonas de proteção dos recursos hídricos e estabelecimento de regimes, podendo ser usado para a proteção de recursos e ordenamento do território, complementando a legislação existente para proteção dessas fontes.

3.2.2 ESTUDOS SOBRE AQUÍFEROS CÁRSTICOS NO BRASIL

Os estudos sobre aquíferos cársticos têm sido crescentes no Brasil, dada a necessidade de se avançar no conhecimento sobre os mecanismos que controlam o desenvolvimento e a gênese desses aquíferos. Soma-se, ainda, a necessidade de se otimizar as formas de exploração dos mananciais hídricos nos ambientes cársticos, o que só pode ser alcançado a partir da implementação de ferramentas de análise condizentes com os processos aos quais estão vinculados os mecanismos que regem essa dinâmica (PESSOA, 2005). Estima-se que entre 5 e 7% (425.000 – 600.000 km²) da superfície total no país é representada por rochas carbonáticas (KARMANN, 1994 *apud* AULER & FARRANT, 1996). A região carbonática mais extensa ocorre na parte central do Brasil, caracterizada por rochas pertencentes aos grupos Bambuí e Una. Muitos sistemas de cavernas são conhecidos nessas áreas, incluindo a maior e mais extensa caverna do país, com aproximadamente 65,6 km de extensão, chamada de Toca da Boa Vista (Município de Campo Formoso, Bahia). Outros desenvolvimentos significativos de carstes também ocorrem em carbonatos do Grupo Açungui, no sudeste do Brasil e no Grupo Corumbá, no oeste do país. Outras áreas apresentam importantes ocorrências de feições cársticas, entretanto, ou por serem pequenas ocorrências, ou por terem pouco reconhecimento científico, foram pouco estudadas (**Figura 3.4**).



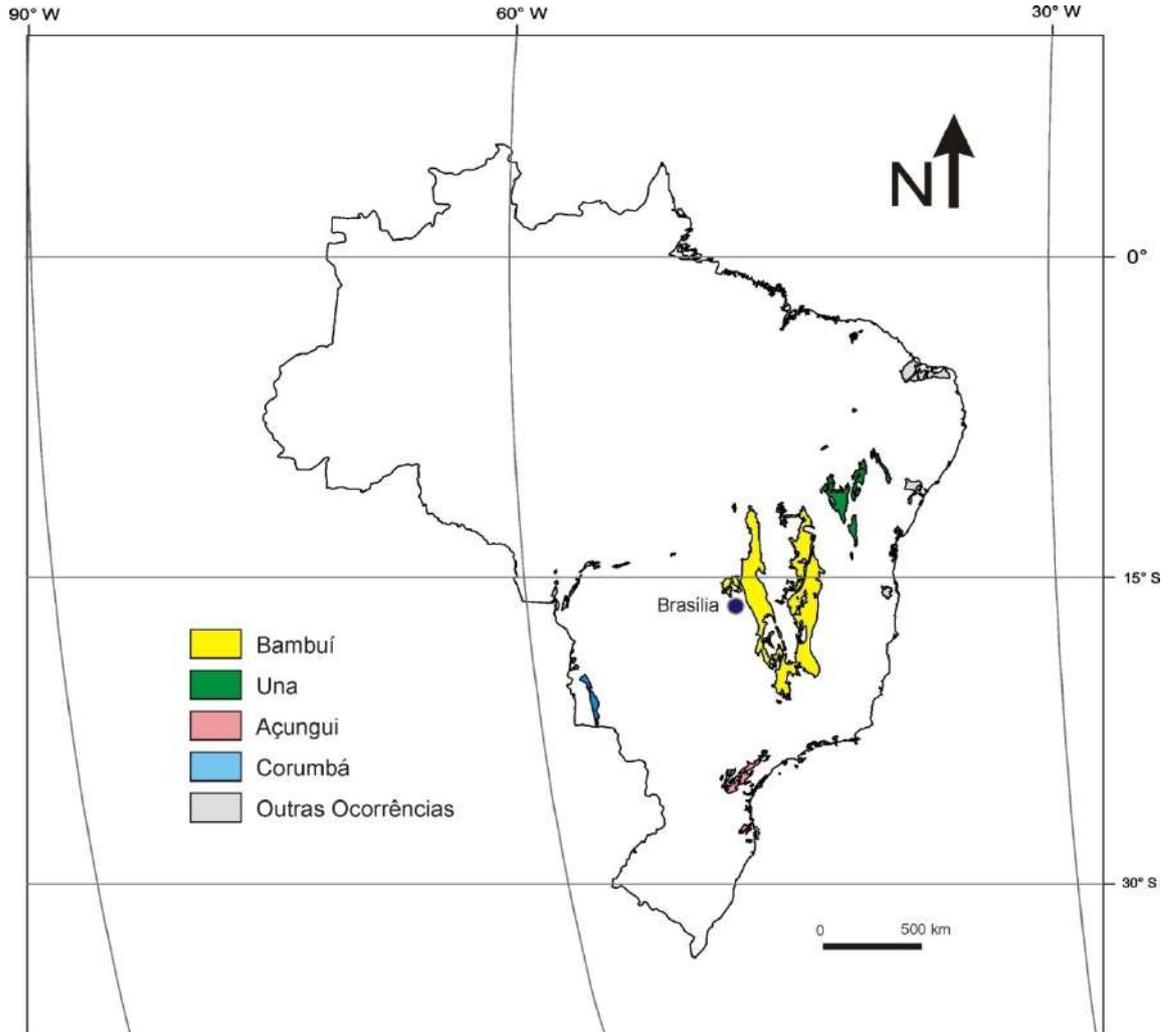


Figura 3.4 Áreas cársticas no Brasil (modificado WILLIAMS & FORD, 2006).

Dessa forma, Rosa Filho *et al.*(2002), estudaram o município Almirante Tamandaré (Paraná), sobre áreas de vulnerabilidade à contaminação de aquífero cárstico causada pela exploração de poços tubulares. Trata-se de uma região caracterizada por águas que circulam através das estruturas carstificadas dos mármores dolomíticos do Grupo Açungui (região ao norte da cidade de Curitiba) e que representa uma alternativa para abastecer uma parcela da população da região metropolitana de Curitiba. Entretanto, a exploração tem provocado a diminuição da vazão de várias fontes utilizadas pelas comunidades rurais da região, bem como acomodamentos do terreno causando rachaduras de várias residências, o que tem suscitado preocupações e conflitos entre os moradores e a SANEPAR (Companhia de Abastecimento de Água do Paraná). Assim, foram realizados testes para evidenciar e quantificar a relação entre bombeamento de poços e vazões de fontes naturais. Durante os



testes de bombeamento de três poços localizados na área de Botiatuva, algumas fontes sofreram reduções de descarga. Dessa forma, os autores concluíram que as interconexões hidráulicas entre as fontes e os poços que as afetaram são consequências dos processos de carstificação que se desenvolveram preferencialmente numa faixa paralela aos diques de diabásio. Com isso, o bombeamento desses poços deverá provocar, no decorrer do tempo, uma inversão da direção do fluxo das águas subterrâneas, fazendo com que áreas que circundam as fontes recarreguem o aquífero sem qualquer processo de depuração. Uma forma para se evitar isso, seria a utilização das fontes pela regularização das suas descargas e não por meio exclusivo da perfuração de poços tubulares.

Travassos, (2010), fez uma caracterização geográfica do carste da região de Cordisburgo, Minas Gerais. O produto final, apresentado na forma de um mapa de fenômenos cársticos, utilizou a metodologia da Comissão de Fenômenos Cársticos do Comitê Nacional de Geografia (PARIS, 1965) e adaptada por Kohler (1989). O autor conclui que, na região de estudo o fluxo endocárstico é comandado pela bacia do Ribeirão da Onça, tendo como seu nível de base o rio das Velhas. Ao norte da região estudada, o fluxo endocárstico também parece estar associado à drenagem do rio das Velhas, ainda que em cotas mais baixas, nas quais predominam as formas de um carste mais evoluído (planícies e lagoas).

Para estudos sobre gerenciamento de recursos hídricos voltados para aquíferos cársticos, Santos *et al.* (2010), por meio do trabalho “Avaliação da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos Cársticos: Subsídios para uma Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos”, discutiram as representações cartográficas da vulnerabilidade como instrumento importante para a gestão dos recursos hídricos nesse ambiente. Para tanto, foram abordados alguns conceitos de vulnerabilidade natural à poluição de aquíferos e os meios para se obterem os seus parâmetros. Segundo os autores, o conhecimento da dinâmica hidrogeológica em aquíferos cársticos é de fundamental importância para se analisar o grau de sensibilidade desse sistema, bem como identificar as fontes potenciais de poluição.

3.2.3 ESTUDOS EM SETE LAGOAS

Um dos primeiros estudos realizados em Sete Lagoas foi desenvolvido por Silva (1988), devido a um evento de colapso de solo na cidade, no dia 04 de março de 1988. Realizaram-se levantamentos geológicos e hidrogeológicos, com vista à identificação das causas do fenômeno, a avaliação dos riscos potenciais das áreas circunjacentes e, a partir disso, dotar o poder público de instrumentos capazes de orientar a urbanização na área afetada. Assim,



Silva elaborou um modelo teórico da evolução do abatimento do terreno, mostrando que, inicialmente, houve um desabamento do teto da rocha carbonática da cavidade existente no subsolo ou um lixiviamento intenso das rochas decompostas sobrepostas. Tal acontecimento teria sido acelerado, talvez, por uma potencial percolação pontual de água que carrou o material decomposto da rocha através de fraturas existentes no teto do conduto. Esses fatos geraram uma instabilidade das rochas argilosas sobrepostas ao conduto e conseqüentemente originou pequenas rachaduras verticais. Este rebaixamento, por outro lado, também pode ter sido estimulado pelo rebaixamento natural da água subterrânea devido à estiagem prolongada ocorrida no ano anterior ao abatimento do terreno. Dessa forma, concluiu-se que o fenômeno que ocorreu em Sete Lagoas foi de origem natural e não se identificou qualquer influência antrópica no processo do abatimento do solo, assim como qualquer relação entre os poços tubulares que abastecem a cidade e a formação da depressão. Outro fato importante, é que grande parte da cidade está edificada sobre um substrato de rocha carbonática com zonas de dissolução subterrânea, o que estão sujeitas a colapsos naturais semelhantes ao fenômeno ocorrido em 1988.

Também em 1991, a CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) iniciou o projeto VIDA (Viabilidade Industrial e Defesa Ambiental), objetivando o levantamento de informações básicas para a elaboração de um estudo multidisciplinar, que pudesse formular as metas para a expansão territorial e o crescimento ordenado das atividades de importância econômica regional (indústrias, agropecuárias, etc.). Os resultados desse trabalho foram publicados pela CPRM (1994.a; 1994.b.; e 2003), apresentando dados a respeito das características geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas e de uso e ocupação dos solos. Tais publicações tiveram como enfoque toda a área conhecida como região cárstica de Lagoa Santa - Sete Lagoas que inclui os municípios Confins, Lagoa Santa, Matozinhos, Pedro Leopoldo, Sete Lagoas, Vespasiano, Prudente de Moraes, Funilândia e Capim Branco.

Em paralelo com os trabalhos do Projeto VIDA, Pessoa (1996) realizou uma pesquisa de caracterização hidrogeológica na cidade de Sete Lagoas detalhando a estratigrafia local, as condições de fluxo da água, recarga e descarga de aquíferos e caracterização da qualidade da água. A pesquisa foi desenvolvida a partir da análise de dados construtivos de poços, observações de campo, além de dados de alguns testes de bombeamento realizados em poços instalados na região. Esses dados balizaram a configuração topográfica do embasamento cristalino, espessura e tipo do material sobrejacente, sendo traçados os principais fatores responsáveis pelo potencial aquífero e pelo grau de vulnerabilidade natural



dos mesmos. Valendo-se destas análises, foram priorizados os aquíferos cársticos, os quais se mostraram como a principal fonte de abastecimento público e industrial, correspondendo a aproximadamente 80% da exploração da água subterrânea na área. O levantamento das principais atividades existentes e suas localizações forneceu subsídios para o reconhecimento de medidas preventivas contra a contaminação dos aquíferos.

Galdino (2007), com o objetivo de conhecer a gestão da qualidade no sistema de saneamento básico do SAAE, elaborou o trabalho intitulado “A Gestão da Qualidade no Sistema de Saneamento Básico da Empresa SAAE, no Ano de 2007”. O resultado desse estudo mostrou que o SAAE encontrava-se em uma fase de reestruturação para melhor atender à população urbana e rural do município. Entretanto, foram observadas certas deficiências, como a falta de investimento em tecnologia e equipamentos para melhoria das condições de trabalho, a implantação de programas de motivação de funcionários e Certificação de Qualidade, adequando e padronizando o sistema de saneamento, para que houvesse redução de perdas físicas e financeiras, e ainda melhoria em todo o processo de captação, tratamento, reservação e distribuição da água e no processo de coleta e tratamento do esgoto sanitário.

Botelho (2008) elaborou uma dissertação de mestrado com o objetivo de avaliar o sistema de captação e distribuição de água em Sete Lagoas. Utilizando-se de uma abordagem espaço-temporal, foi realizado um histórico sobre a evolução da captação e da demanda da água do município, refletindo assim sobre alguns problemas decorrentes da gestão da água, que teve, nas últimas décadas, acentuada expansão das atividades econômicas e elevados crescimento da população urbana, o que gerou um considerável aumento da demanda de água. Botelho ressaltou que, durante todo o período de exploração subterrânea, ocorreram problemas periódicos de falta de água devido às perfurações contínuas de poços que tinham o objetivo de solucionar apenas o problema imediato de falta de água. Desta maneira, foi possível compreender que a insegurança hídrica na cidade deve-se, principalmente, à ausência de instrumentos de gestão, pois acreditava-se que a situação era resultado de uma gestão apenas focada na oferta da água.

Batista (2009) caracterizou a hidrogeologia preliminar da área de influência no Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS), pertencente à EMBRAPA. Para tal, foi proposto, baseado em dados de campo e em pesquisa bibliográfica, um modelo conceitual, a partir do qual foi gerado um modelo computacional. Este descreveu o comportamento hidrodinâmico dos principais aquíferos presentes na área de estudo, o que permitiu avaliar



diversos aspectos ambientais relacionados a esse comportamento. Essa análise teve como principais temas a avaliação da capacidade de produção e mapeamento de zonas de captura dos poços, cisternas, nascentes e lagoas, além de avaliar a influência dos poços em alguns outros mananciais hídricos. Dentre os resultados encontrados, observou-se que os poços em uso exploravam apenas 7,7 % das reservas hídricas existentes na área estudada, o que causava variações muito pequenas na superfície potenciométrica local.

Em 2010, a CPRM, a partir do Programa Geologia do Brasil (PGB), lançou um relatório intitulado Projeto Sete Lagoas – Abaeté, que teve como principal objetivo o mapeamento geológico das folhas Baldim (SE. 23-Z-C-III, 80%), Sete Lagoas (SE. 23-ZC-II, 100%), Pompéu (SE.23-Z-C-I, 100%), Abaeté (SE.23-Y-D-III, 100%), Bom Despacho (SE.23-Y-D-VI, 50%), Contagem (SE.23-Z-C-V, 10%) e Belo Horizonte (SE.23-Z-C-VI, 15%), na escala 1:100.000. Utilizou-se a metodologia estabelecida para os projetos do PGB, complementada por levantamentos de seções verticais compostas de detalhe. O projeto foi totalmente desenvolvido em ambiente SIG e vinculado ao banco de dados geológicos da CPRM, o GEOBANK, incorporando o que existe de mais atualizado em técnica de geoprocessamento aplicada à cartografia geológica. Os resultados encontrados contemplam o mapeamento geológico e cadastramento dos recursos minerais de uma área de aproximadamente 13.195 km² da Bacia neoproterozoica do São Francisco (Grupo Bambuí) e faixas móveis contíguas, mostrando um importante avanço no exercício de novas práticas, tanto na cartografia geológica, quanto no estudo da potencialidade mineral e do conhecimento geológico em amplas áreas do território nacional e principalmente nas áreas mapeadas.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Sete Lagoas foi caracterizado com base em dados físicos, climáticos e socioeconômicos visando reconhecer aspectos naturais e de origem antrópica com influência na qualidade e quantidade das águas subterrâneas. A caracterização ora apresentada embasou a evolução do conhecimento alcançada neste estudo, descrita e discutida nos capítulos seguintes deste relatório final.



3.3.1 EXPANSÃO URBANA E ORDENAMENTO DO USO DO SOLO

A sede municipal de Sete Lagoas possui atualmente cerca de 70 km² e concentra aproximadamente 97,5% da população, demonstrando o perfil tipicamente urbano do município.

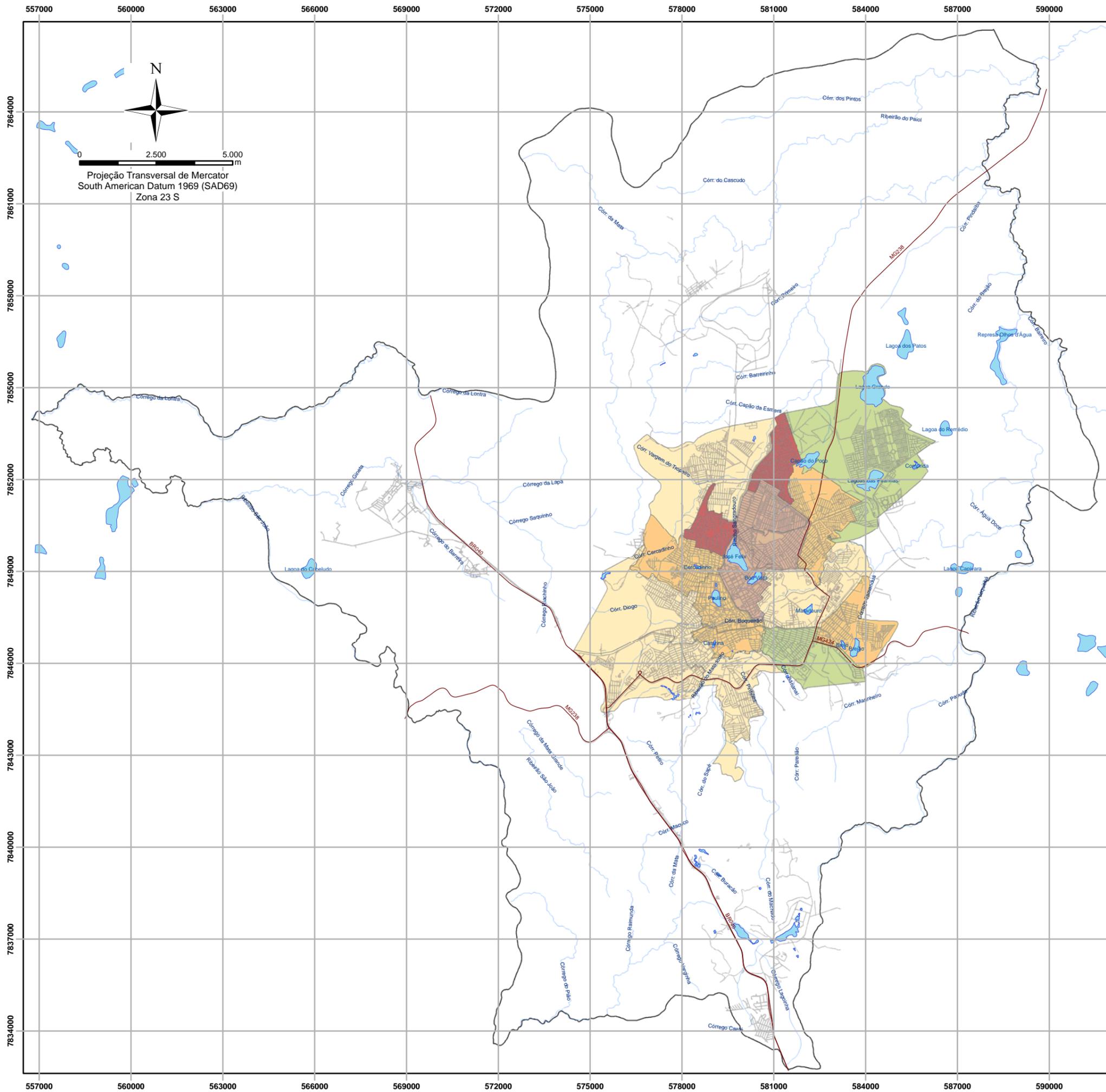
As informações do senso demográfico do IBGE (2010) foram compiladas no sistema de informações georreferenciadas, juntamente com o mapa de distribuição espacial das zonas administrativas da sede municipal, fornecido pela Secretaria de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas, e permitiram identificar a distribuição da densidade demográfica na sede municipal de Sete Lagoas (**Figura 3.5**).

Nota-se que o maior adensamento demográfico encontra-se nas regiões central, centro-oeste e centro-norte da cidade que corresponde com as áreas de ocupação mais antiga, conforme evidenciado pela discussão a seguir.

A partir da vetorização da análise espaço-temporal realizada por Guimarães *et al.* (2011) foi elaborada a **Figura 3.6** que apresenta a evolução da expansão urbana a partir da comparação da ocupação urbana nos anos de 1949, 1965, 1972, 1989, 2000 e 2010. Esse trabalho de cartografia da expansão urbana ainda contou com a interpretação de imagens georreferenciadas, dentre elas, ortofotos aéreas e imagens de satélite Landsat, e com a interpolação de informações contidas nas imagens *Quickbird* e no mapa da malha urbana do ano de 2009, fornecido pela Secretaria de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas.

A evolução da expansão urbana (**Figura 3.6**) permite observar que o desenvolvimento urbano ocorreu com maior intensidade nos setores norte e nordeste, em relação ao aglomerado inicial. O eixo ao longo da rodovia BR-040 também foi alvo de expansão a partir da década de 80 com intensificação a partir do ano 2.000. Devido aos interesses produtivos, pela condição favorável ao escoamento da produção, espera-se que essa região ao longo da rodovia federal continue a ser alvo de expansão urbana, sobretudo para as atividades industriais e comerciais.





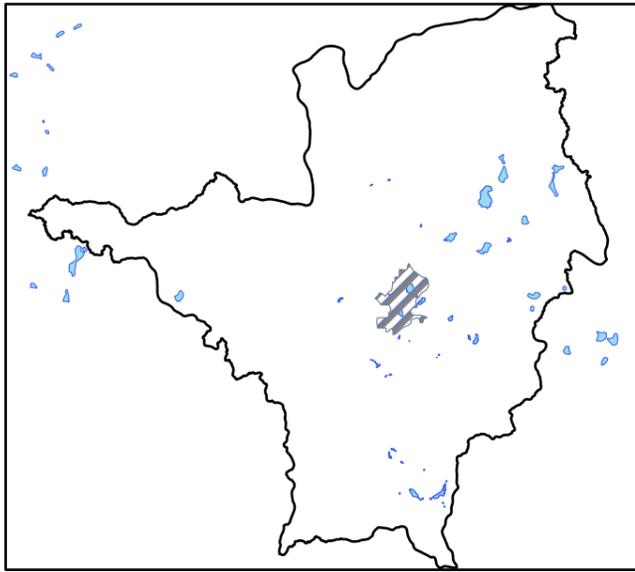
Legenda
 Densidade Demográfica (hab/km²)

- 179 - 444
- 445 - 2511
- 2512 - 4462
- 4463 - 6686
- 6687 - 9021
- Lagoas
- Rodovias
- Drenagem
- Malha de Ruas
- Limite Municipal

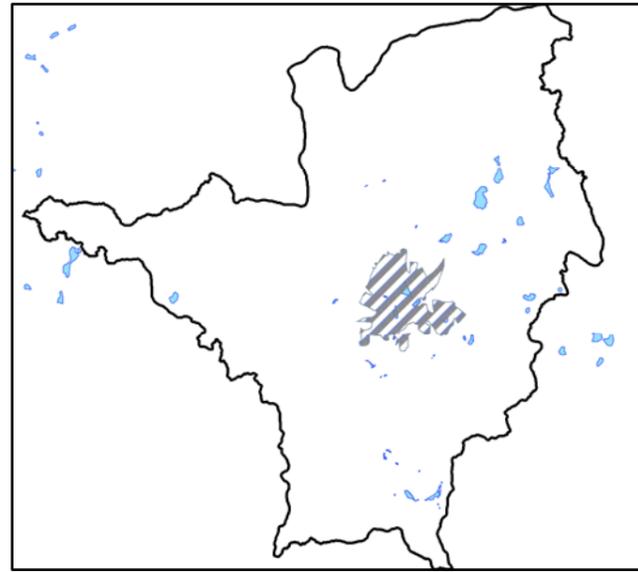
Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas

CONTRATANTE:		 Serviço Autônomo de Água e Esgoto	
PROJETO:		ESTUDO HIDROGEOLÓGICO	
TÍTULO:		Figura 3.5 Densidade demográfica na zona urbana de Sete Lagoas	
ELABORADO:		Daniela Barbati Osório	
CONTRATO:	3988	 AMBIENTAL & ENGENHARIA	
ESCALA:	1:125.000		
DATA:	DEZ/2013		

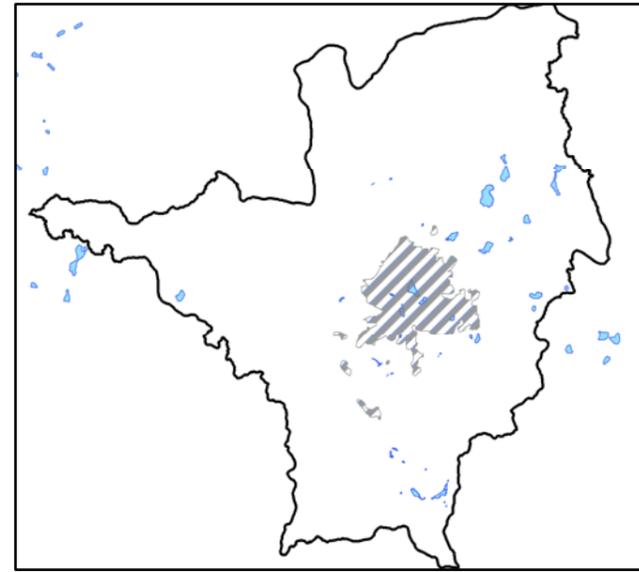
Expansão Urbana no ano de 1949



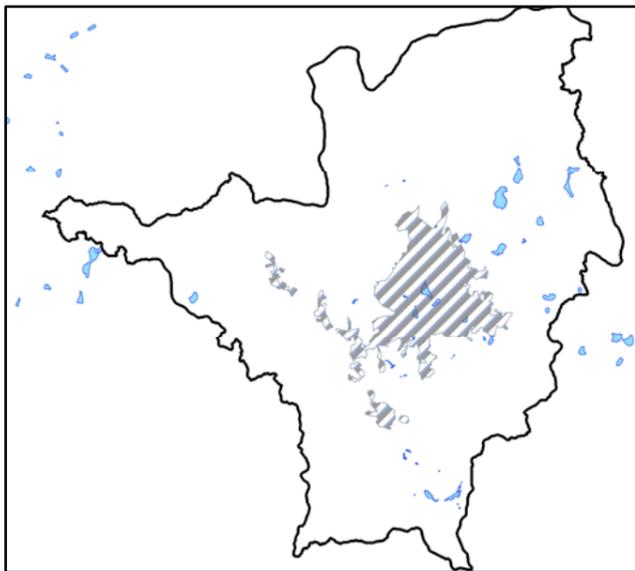
Expansão Urbana no ano de 1965



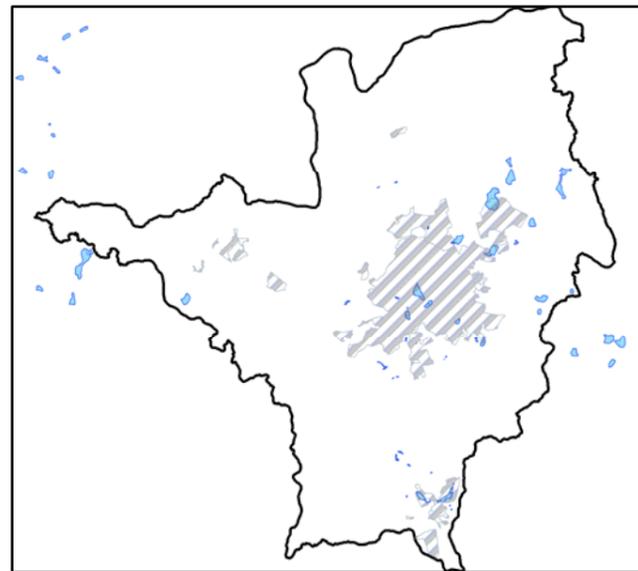
Expansão Urbana no ano de 1972



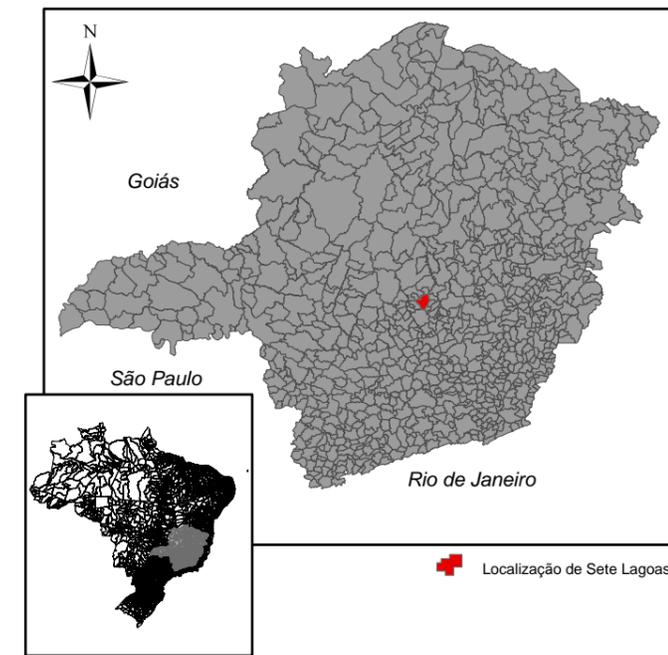
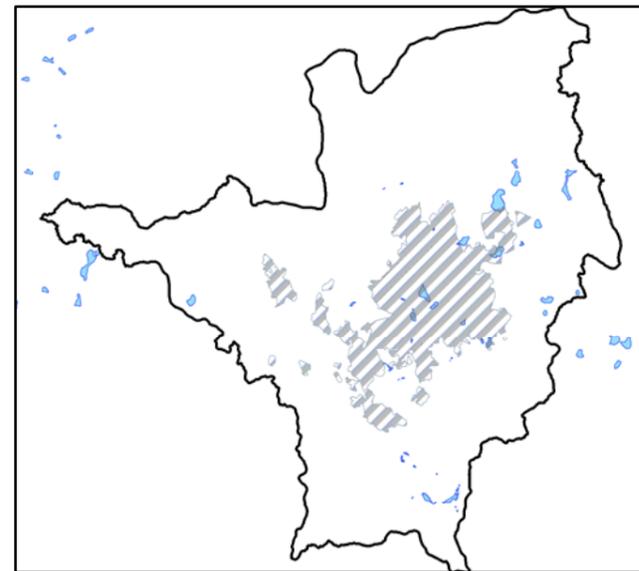
Expansão Urbana no ano de 1989



Expansão Urbana baseada na malha urbana de 2009



Expansão Urbana no ano de 2010



Legenda

-  Expansão Urbana
-  Lagoas
-  Limite Municipal



0 10.000 20.000 m

Projeção Transversal de Mercator
South American Datum 1969 (SAD69)
Zona 23 S

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas e por Guimarães et al. (2011)

CONTRATANTE:		
PROJETO:	ESTUDO HIDROGEOLÓGICO	
TÍTULO:	Fig. 3.6 Expansão urbana de Sete Lagoas	
ELABORADO:	Daniela Barbatí Osório	
CONTRATO:	3988	
ESCALA:	1:425.000	
DATA:	DEZ/2013	

O acelerado crescimento urbano, claramente evidenciado na **Figura 3.6**, nem sempre foi norteado por planejamento, sobretudo em relação às questões ambientais com foco na vulnerabilidade do aquífero, potencialidade e favorabilidade hídrica. Entretanto, em atendimento ao Estatuto das Cidades (Lei Federal nº 10.257/01), o município promulgou a Lei Complementar nº 109, de 09 de outubro de 2006, que revisa e regulamenta o Plano Diretor Municipal.

Dentre inúmeros objetivos da Política de Desenvolvimento Municipal (Art 4º da Lei Complementar 9/2006), estabelece-se: “...ordenar e controlar o uso do solo urbano e rural para o cumprimento das funções sociais da cidade e da propriedade, de forma sustentável e democrática, valorizando os recursos naturais, assegurando a toda população o acesso à infra- estrutura, ao saneamento, aos equipamentos e ao conforto ambiental...”

A **Figura 3.7** corresponde à cartografia de uso e ocupação do solo em Sete Lagoas, elaborada neste estudo com base na “Planta Cadastral do Distrito Sede de Sete Lagoas”, fornecida pelo Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas, na qual é demonstrado o zoneamento parcial da cidade regulamentado no Plano Diretor.

Nota-se que, atualmente, os aspectos ambientais condicionam diversas zonas de uso, bem como estabelece níveis de restrições com foco na proteção do meio ambiente e dos recursos hídricos.

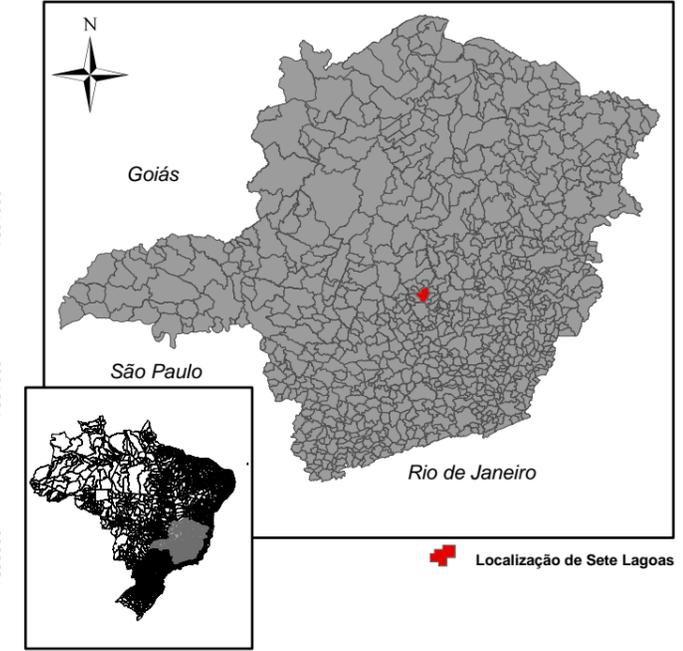
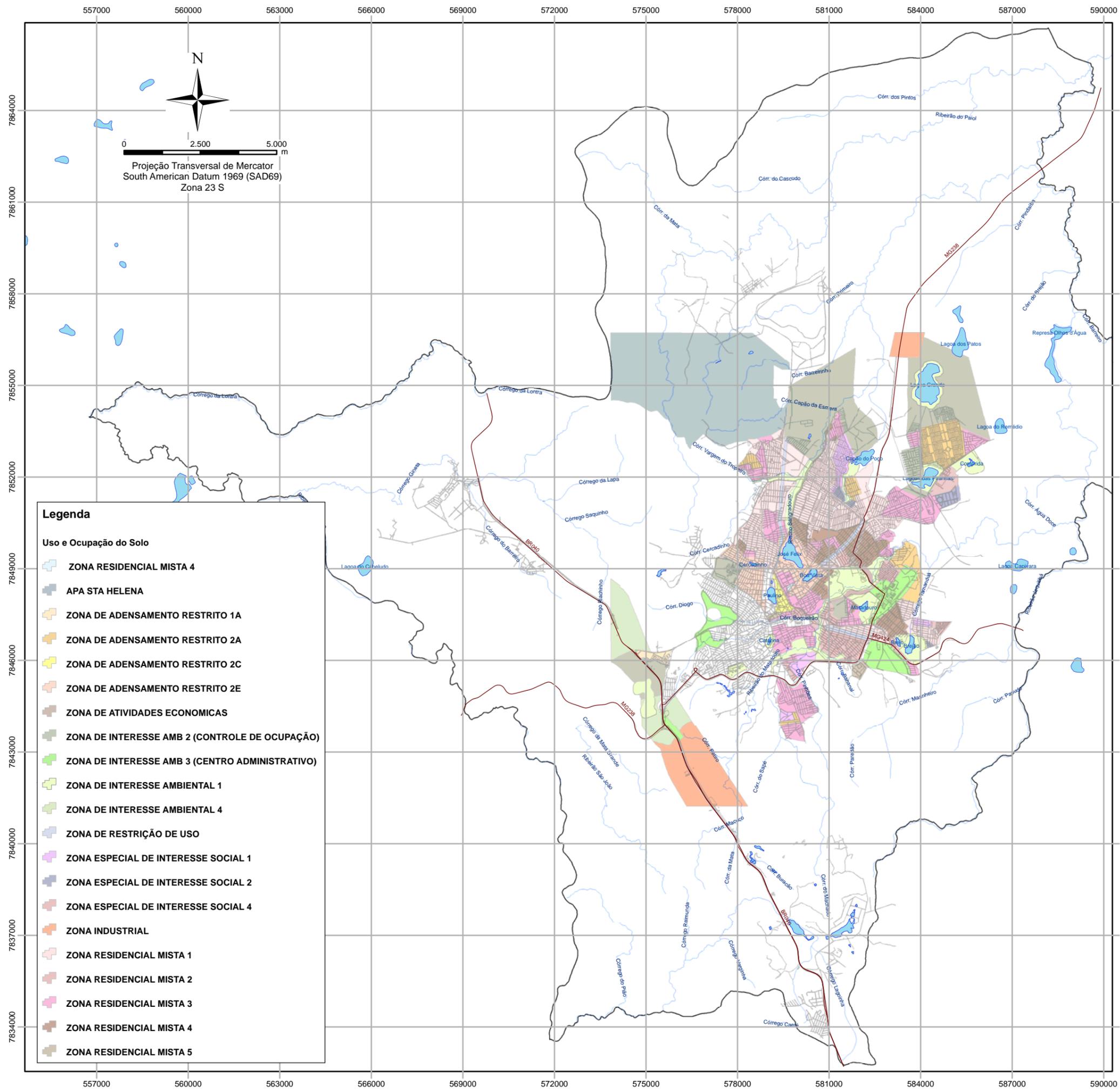
As seguintes zonas de uso estão delimitadas no mapa de uso e ocupação do solo (**Figura 3.7**), definidas pela a política de desenvolvimento urbano de Sete Lagoas:

- ZRM – Zona Residencial Mista: áreas destinadas ao uso residencial podendo haver atividades comerciais e de serviços;
- APA – Área de Proteção Ambiental;
- ZAE – Zona de Atividades Econômicas: áreas onde predominam o uso comercial e de serviços de maior porte;
- ZAR 1 – Zona de Adensamento Restrito 1: área onde a ocupação e uso do solo são restritivos;



- ZAR 2 – Zona de Adensamento Restrito 2: área onde a ocupação e uso do solo são restritivos, devido a proteção das lagoas e da paisagem da Serra de Santa Helena;
- ZEIS – Zona Especial de Interesse Social: áreas onde há interesse público em ordenar a ocupação, por meio de urbanização e regularização fundiária ou implantar empreendimentos habitacionais de interesse social;
- ZI – Zona Industrial: áreas destinadas ao uso industrial de empreendimentos de grande porte;
- ZIA 1 – Zona de Interesse Ambiental 1: áreas onde há interesse público de proteção ambiental;
- ZIA 2 – Zona de Interesse Ambiental 2: áreas onde há interesse público de estabilização entre a proteção ambiental e habitação com controle de ocupação;
- ZIA 3 – Zona de Interesse Ambiental 3: áreas prevista para a implantação do centro administrativo em que há interesse público de equilíbrio entre proteção ambiental;
- ZIA 4 – Zona de Interesse Ambiental 4: áreas onde há concessões de extração mineral, regiões onde se concentra grande número de cavidades naturais subterrâneas; e
- ZRU – Zona de Restrição de Uso: áreas de uso restrito, devido à sobrecarga do sistema viário ou da infraestrutura urbana.





Legenda

- Lagoas
- Rodovias
- Malha de Ruas
- Drenagem
- Limite Municipal

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas

CONTRATANTE:		
PROJETO:	ESTUDO HIDROGEOLÓGICO	
TÍTULO:	Figura 3.7 Zoneamento de uso e ocupação do solo	
ELABORADO:	Daniela Barbatl Osório	
CONTRATO:	3988	
ESCALA:	1:125.000	
DATA:	DEZ/2013	

3.3.2 ABASTECIMENTO PÚBLICO DE ÁGUA DE SETE LAGOAS

A cidade de Sete Lagoas começou a receber água encanada no ano de 1900, 33 anos após sua fundação. As águas captadas eram de origem superficial, proveniente da serra de Santa Helena, acumulada em pequenos sistemas de armazenamento superficial e transportada por gravidade. Inicialmente, o empreendimento foi privado, mas logo em seguida a prefeitura assumiu esta administração. Depois de quase um século da fundação da cidade, nasce o Serviço Autônomo de Água, Esgoto e Saneamento Urbano (SAAE) de Sete Lagoas, autarquia municipal sem fins lucrativos, criada pela Lei nº 1.083, de 23 de dezembro de 1965. Desde então, o SAAE é responsável pela captação e distribuição de água potável e pela coleta de esgoto sanitário de todo o município. A prestação desses serviços públicos é regulamentada pela Lei nº 5.749, de 18 de dezembro de 1998 (modificada pela Lei nº 6.062, de 04 de fevereiro de 2000).

A receita do SAAE é própria, proveniente do recebimento de tarifas sobre o consumo da água e sobre o lançamento de esgoto. O destino deste recurso é para a manutenção da estrutura administrativa, para a manutenção física das infraestruturas de captação, tratamento e distribuição, e para a ampliação do sistema. São funções da autarquia: estudar, projetar e executar obras de implantação, operação e manutenção dos sistemas de abastecimento público de água e coleta de esgotos do município; fiscalizar e executar obras de saneamento básico, realizadas por meio de convênios entre o município e órgãos públicos.

A administração do SAAE é exercida pelo diretor presidente, sob nomeação do prefeito, que possui a responsabilidade de gerir todas as atividades da autarquia. A gestão diretiva é subdividida em diretoria financeira e administrativa, secretaria geral, consultoria técnica e diretoria de operações. Ligado diretamente à diretoria administrativa e financeira, está o laboratório que atua conjuntamente com os setores de engenharia e operações para monitorar os sistemas de abastecimento. Atualmente, o SAAE possui 519 funcionários com regime de contratação estatutária, assim distribuídos: 424 efetivos, 61 aposentados e pensionistas, 25 não estáveis e 09 comissionados.

O crescimento da demanda e o desenvolvimento de técnicas de captação de águas subterrâneas levaram a mudanças da fonte hídrica do abastecimento público, em relação aos primórdios da expansão urbana local. Atualmente, o município é integralmente suprido



por captação de água subterrânea em poços tubulares profundos, mantidos e operados pelo SAAE.

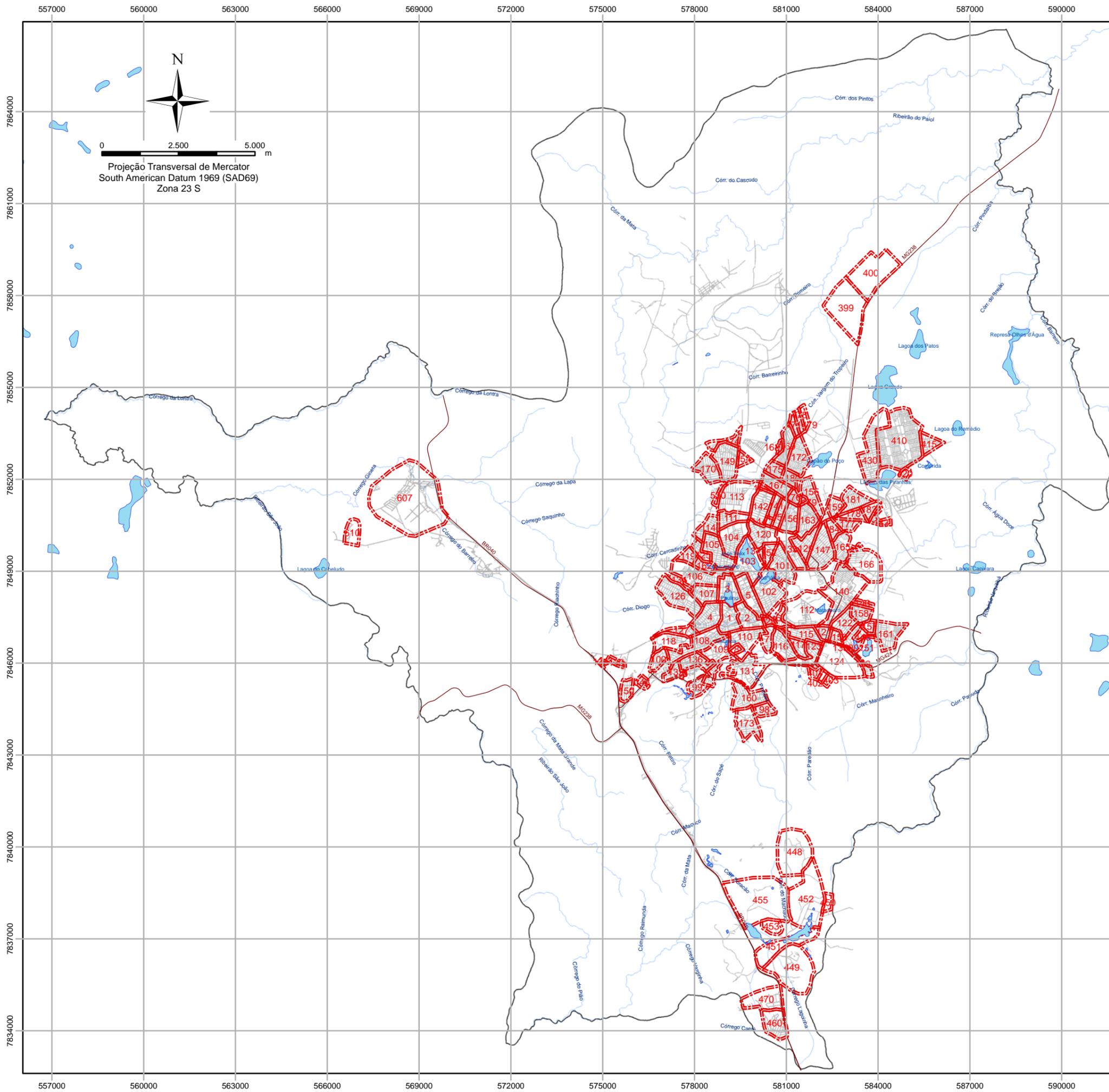
Conforme os dados fornecidos pelo SAAE ao SNIS (Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento), referente ao ano de 2011, o mesmo possui 62.620 ligações de água, 105 poços tubulares ativos, 54 reservatórios com capacidade total de reservação de 10.627 m³, 31 estações elevatórias de água (EEA), 29 unidades de tratamento simplificado (UTS) e 1.038 km de extensão de redes de distribuição. Quanto à coleta de esgoto, o SAAE possui aproximadamente 63.223 ligações, 22 estações elevatórias de esgoto (EEE), 07 mini-estações de tratamento (ETE) do tipo filtros anaeróbios de fluxo ascendente, 898 km de redes coletoras, 41,60 km de extensão de interceptores/emissários que lança um volume de 14.562.000 m³/ano. Cabe ressaltar que 2.138.000 m³/ano dos esgotos domésticos são tratados e os restantes são lançados *in natura* nos córregos que cortam a malha urbana. 60% são lançados nas bacias do Matadouro e 40% dos Tropeiros.

A estrutura organizacional do SAAE subdividiu a sede e demais aglomerados urbanos em zonas administrativas, conforme apresentado na **Figura 3.8**. A elaboração dessa cartografia contou com a digitalização e georreferenciamento dessa informação que estava disponível apenas em meio físico (documento impresso) no SAAE. Para cada zona administrativa foram levantados dados sobre o número de economias atendidas e volumes mensais de consumo que também foram compilados em um banco de dados digital com acesso possível via sistema geográfico de informações via *hyperlink*.

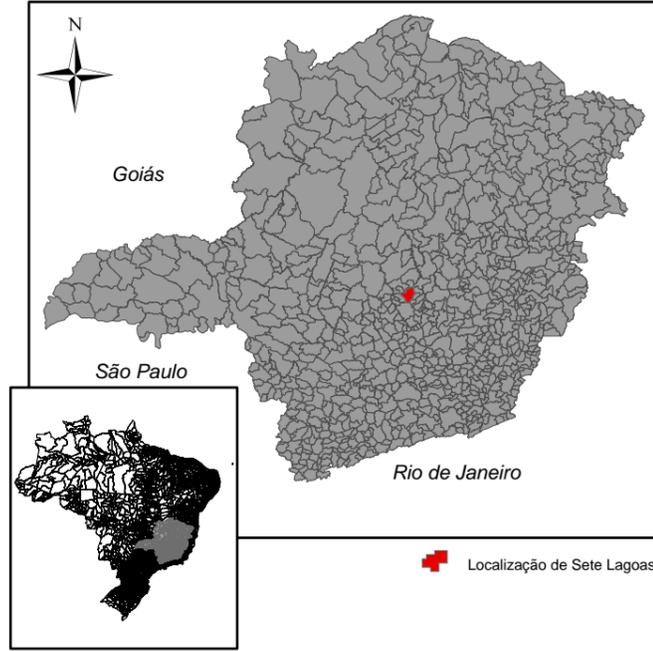
O sistema de abastecimento de água da cidade basicamente funciona da seguinte forma: toda a captação de água é feita nos mananciais subterrâneos (aquíferos), por meio de bombas instaladas em 105 poços de produção (até setembro de 2012). O bombeamento é realizado por bombas de alta potência que elevam a coluna de água subterrânea pela tubulação edutora, do poço até as estações elevatórias de água e/ou reservatórios ou lançadas diretamente na rede de distribuição.

Nos sistemas dotados de reservatórios, a distribuição de água ocorre predominantemente por gravidade. Nas estações elevatórias e reservatórios as águas recebem tratamento por cloração e as manutenções de limpeza e desinfecção ocorrem periodicamente com procedimento de esvaziamento do reservatório e posterior limpeza das paredes com solução de água sanitária ou hipoclorito de sódio.





Projeção Transversal de Mercator
 South American Datum 1969 (SAD69)
 Zona 23 S



- Legenda**
- Zonas Administrativas do SAAE
 - Lagoas
 - Rodovias
 - Malha de Ruas
 - Drenagem
 - Limite Municipal

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas e SAAE

CONTRATANTE:		
PROJETO:	ESTUDO HIDROGEOLÓGICO	
TÍTULO:	Figura 3.8 Mapa de zonas administrativas do SAAE	
ELABORADO:	Daniela Barbatli Osório	
CONTRATO:	3988	
ESCALA:	1:125.000	
DATA:	DEZ/2013	

Alguns sistemas de distribuição não possuem reservatório, sendo que as pressões necessárias às redes são mantidas pelas próprias bombas submersas dos poços e, desse modo, requerendo-se operação ininterrupta dos poços nesses sistemas. Nesses casos, o processo de cloração é realizado por injeção direta na tubulação.

O tratamento da água bruta extraída dos poços é simples e acontece de duas formas: ou em um tanque de mistura ou por injeção direta na rede. No primeiro caso, quando a água sai do poço, ela é bombeada para um tanque com dicloro isocianurato de sódio 60%, ou tricloroacidoisocianúrico 90%.

Poços de produção como os que abastecem a cidade precisam de monitoramento de integridade física para programar manutenções que devem ser específicas para cada poço devido à grande variedade de tipos, profundidades, idades e regimes de operação. Até o momento o SAAE não conta com um programa definido e integrado de manutenções preventivas dos poços. Em geral, atuam com manutenções corretivas mediante demanda pontual, sem a determinação de um padrão previamente definido.

Em relação às perdas de água do sistema de captação, reservação e distribuição, não há registros acerca de um controle sistematizado ou de estudos que tenham sido realizados. As informações prestadas ao SNIS (2011) registram perdas de 39,4% na distribuição de água.

3.3.3 GEOLOGIA REGIONAL

O município de Sete Lagoas está inserido sobre o Cráton São Francisco (ALMEIDA, 1977, e ALKMIN, 2004). E é composto por rochas cristalinas de idades arqueanas a paleoproterozoicas e por suas coberturas sedimentares mesoproterozoicas (Supergrupo Espinhaço e Grupos Canastra e Paranoá), além de sedimentos silicato-carbonatos de idade neoproterozoica, as quais compõem essencialmente o Grupo Bambuí.

O Cráton São Francisco está circundado por zonas de cisalhamento neoproterozoicas Aracuaí, Brasília, Rio Preto, Riacho do Pontal e Sergipano, sendo esses, alocados, geocronologicamente, no ciclo brasileiro (~630 – 500 Ma), de acordo com Trompette (1994) e Sial *et al.* (2009).



O Grupo Bambuí se caracteriza como uma macro região, que cobre uma área de aproximadamente 300.000 km², e tem despertado estudos de muitos geólogos desde o início dos anos 1960 (COSTA & BRANCO, 1961; BRAUN, 1968; DARDENNE, 1978^a, 1979; SIAL *et al.* 2009), em especial por minérios de Zinco e Chumbo.

As unidades do Grupo Bambuí estão distribuídas por sua porção mais basal pela Formação Carrancas/Jequitaiá, onde possui, em sua estratigrafia, diamictitos, arenitos e ritmitos. Estratigraficamente superior, ocorre a Formação Sete Lagoas, composta por sequência carbonática, sotoposta pela Formação Lagoa do Jacaré, caracterizado por calcários oolíticos de coloração escura, ocorrendo, sequencialmente siltitos, arcósios e arenitos de coloração esverdeada que compõe a Formação Serra da Saudade. Por fim, na porção estratigraficamente mais elevada, ocorrem arenitos plataformais fluviais da Formação Três Marias.

Comumente, o Grupo Bambuí é interpretado como uma Bacia de *foreland* com sistema deposicional desenvolvido e orientado sobre eixo Norte – Sul (N-S) de forma paralela à orogênese Brasília (CHANG *et al.* 1988; CASTRO & DARDENNE, 2000; DARDENNE, 2000; MARTINS-NETO & ALKMIN, 2001; ALKMIN & MARTINS-NETO, 2001; MARTINS-NETO, 2001).

Recentemente, outros autores sugeriram um hiato deposicional na porção intermediária da Formação Sete Lagoas, fato que possivelmente subdividiria o Grupo Bambuí em duas subsequências. A primeira (basal), composta por sequências glacio-sedimentares, e a segunda (superior) em depósitos típicos de *foreland* (MARTINS & LEMOS, 2007; ZALÁN & ROMEIRO-SILVA, 2007).

A estratigrafia clássica do município de Sete Lagoas é descrita na **Figura 3.9**. Estas unidades são descritas a seguir:



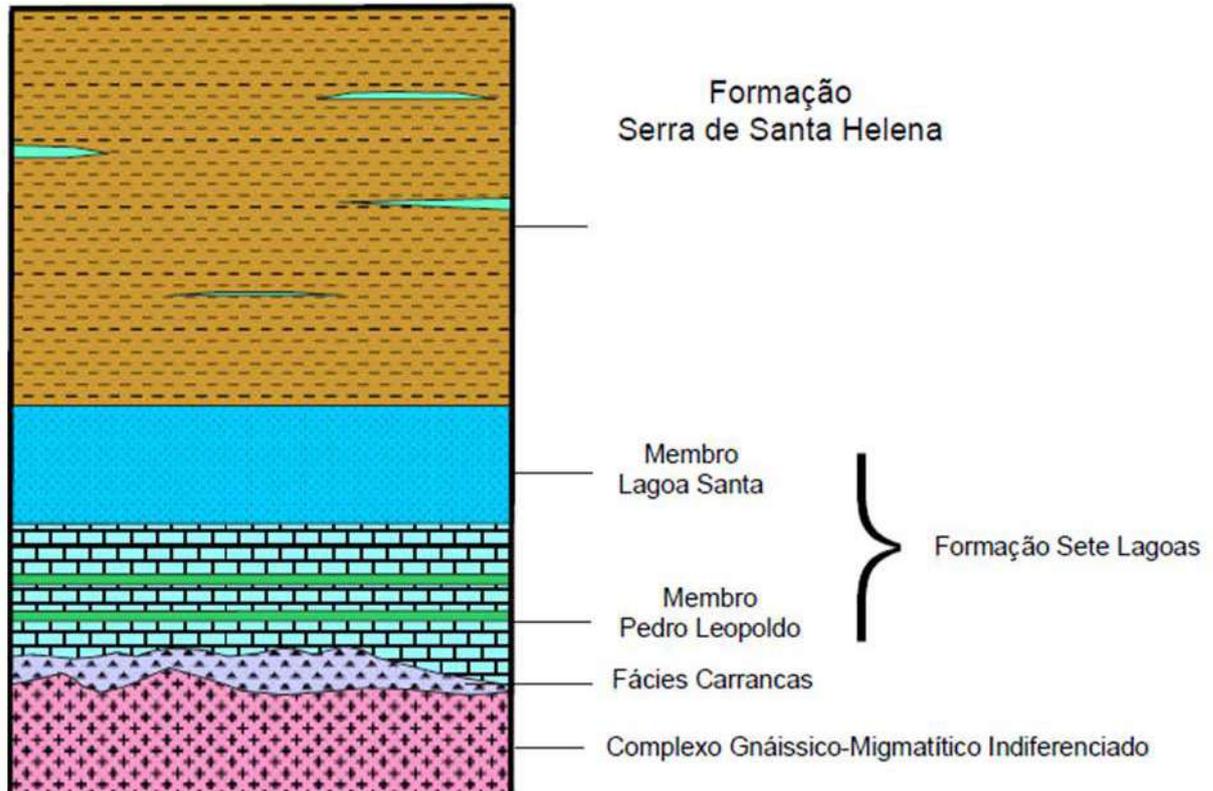


Figura 3.9 Relação litológica clássica da base do Grupo Bambuí em contato inferior com o Complexo Gnáissico-Migmatítico Indiferenciado (baseado em CPRM, 2003).

Complexo Gnáissico-Migmatítico Indiferenciado

As rochas do Complexo Gnáissico-Migmatítico Indiferenciado são litologicamente bem diversificadas, sendo identificadas algumas exposições em algumas pedreiras. Os afloramentos exibem litotipos de composição granito-gnáissica e migmatítica, com padrões texturais e estruturais variando de rochas bandadas fortemente foliadas a incipientes e isotrópicas. São rochas comumente leucocráticas a cinza claro, com muito quartzo e feldspato, pouca biotita ou quase ausente; granulação variando de fina a grossa, com faixas do tipo *augen*-gnaisse.

De acordo com a CPRM (2003), os contatos entre os vários litotipos desse Complexo são geralmente transicionais, principalmente entre gnaisses, migmatitos e/ou granitóides. É muito comum apresentarem-se intemperizados ou semi-alterados, mas quase sempre conservam a estruturação original da rocha. São também comuns evidências de minerais



estirados, com a presença de pequenas *shear-bands*, pequenas camadas e/ou veios lenticularizados concordantes e muitas vezes boudinados. A foliação, apesar de marcante, é preferencialmente de baixo ângulo.

Há locais onde ocorrem dobras ptigmáticas e porções quartzo-feldspáticas com desenvolvimento de k-feldspato, de granulação grossa, indicando processos de blastese local. As rochas granitóides, geralmente, são de cor cinza claro a esbranquiçada, granulação grossa a média, às vezes com esparsos porfiroblastos de feldspatos tabulares, foliação incipiente a mais acentuada, com xenólitos de outras rochas ou restitos resultantes de processos de anatexia. É comum encontrar-se *schliëren* de biotita nas partes granitóides e/ou migmatíticas.

A migmatização corresponde a um processo metamórfico que atingiu grande parte da área, onde as rochas afetadas exibem estruturas dos tipos estromática, dictonítica (em rede), *schliëren*, surreítica (de dilatação), dobrada, estictolítica (manchas) e nebulítica.

Localmente, ocorrem cristais de pirita oxidada e magnetita disseminados nas rochas. Nas porções migmatizadas, a rocha, ora é bandada, ora é caótica, com muitas dobras desarmônicas, porções anastomosadas, dobras ptigmáticas, muitos veios quartzo-feldspáticos e pegmatóides, abundantes fraturas, geralmente preenchidas por calcita e epidoto, além de zonas menores afetadas pelo cisalhamento rúptil-dúctil.

Petrograficamente, essas rochas variam quanto à composição em gnaisses à hornblenda, biotita gnaisses, diopsídio anfibólio gnaisses, cujos protólitos seriam granitos e tonalitos transformados, submetidos a metamorfismo da fácies anfibolito, com alteração hidrotermal, onde ocorrem substituições do plagioclásio, saussuritização e cloritização. Este complexo foi intensamente afetado por injeções básicas que provocaram o aparecimento de um enxame de diques de rochas básicas (CPRM, 2003).

Formação Sete Lagoas

Regionalmente, distribuídas pela Folha Sete Lagoas, ocorre junto à cidade de Sete Lagoas; ao sul de Prudente de Moraes; a leste de Funilândia, em uma estreita faixa de direção SE-NW que se estende da fazenda Riacho Danta, passando pelas fazendas Casa Branca, New



York até o limite da área do projeto VIDA (CPRM, 2003). Esta formação apresenta dois principais membros: Pedro Leopoldo e Lagoa Santa.

O Membro Pedro Leopoldo situa-se na base da Formação Sete Lagoas, sobrepondo o Complexo Gnáissico-Migmatítico Indiferenciado, geralmente por falha de descolamento, em contato brusco e discordante. As mesmas podem ser subdivididas em quatro fácies litoestratigráficas distintas, de acordo com a sequência:

1) Fácies A (Pedreira Canaã): o local tipo dessa litofácies é a base da Pedreira Canaã, localizada na entrada da cidade de Sete Lagoas (próximo ao trevo da Polícia Rodoviária Federal, na BR-040). Trata-se de um calcário cinza-claro a médio, em camadas tabulares, delgadas, contínuas, às vezes descontínuas e mais espessas, com intercalações mais escuras de um metapelito, formando estratos delgados.

2) Fácies B (Pedreira Ilcon): o local tipo dessa litofácies é na Pedreira da Ilcon, a SE da cidade de Sete Lagoas. Trata-se de um calcário de cor cinza médio a escuro, com intercalações de um calcário mais escuro, onde é notada a intersecção do S0/S1 (oblíqua), com as superfícies S0 bastante repetitivas, aparecendo a cada 15-20 cm. No início, essas superfícies eram horizontalizadas, mas, à medida que aumenta a deformação, tornam-se verticalizadas até que a intersecção dos planos (S0/S1), desaparecerem. O calcário evoluindo para um calcário milonitizado, onde são comuns níveis esverdeados e milimétricos de clorita e cristais euédricos de pirita. Possui espessura superior a 50 metros.

3) Fácies C (Riacho do Campo): essa litofácies é encontrada em Riacho do Campo (oeste de Sete Lagoas), na pedreira Sambra, Morro do Cabeludo (pedreira Paraíso), pedreira Capão do Meio e na fazenda Capão do Inferno. Trata-se de uma rocha onde as cores observadas são: cinza-claro, cinza-esverdeado, rósea, marrom-arroxeadada e creme. Formam estratos com espessura de aproximadamente 30 cm, com intercalações centimétricas mais escuras, de um pelito formando lentes e camadas, com estratificação cruzada de pequeno porte e plano-paralela. Encontram-se cristais de pirita euédrica, milimétricos, distribuídos em vários locais, além de marcas de cargas na rocha. Entre um estrato e outro há níveis finos, argilosos, esverdeados (com clorita) e com *drapes* de argila e superfícies de estilolização pré a pós tectônicos e veios de quartzo e calcita, quase sempre concordantes com a superfície S0. Na pedreira Sambra, a rocha possui uma cor bege, cinza-claro a marrom avermelhado e é bem estratificada. Os estratos estão separados por superfícies de estilolitização, contínuas e irregulares, com alternância cíclica de níveis de



estromatólitos e/ou esteiras algais cinza escuro, contendo filetes avermelhados como labaredas (estrutura em chamas) e frequentes agulhas de aragonita. Quando a dissolução é muito intensa, há uma redução na camada. A espessura máxima observada nessa litofácies foi de 100 metros.

4) Fácies D (Lagoa das Pedras): não ocorre no município de Sete Lagoas, mas sim em escala regional (aflorante nos municípios vizinhos). De acordo com a CPRM (2003), tais litofácies se tratam de uma marga de cor cinza claro a rósea, laminada por grãos finos, formando camadas plano-paralelas, contínuas, milimétricas, podendo chegar a quase 50 cm. Encontram-se pouco deformadas e intercaladas por estratos mais finos (argilosos), milimétricos a centimétricos, onde são observadas pequenas dobras assimétricas com vergência para oeste. Nas margas, observam-se veios lenticulares e concordantes de calcita e nos planos da laminação cristais milimétricos e euédricos de piritita, geralmente oxidados. Em lâminas delgadas, trata-se de uma marga, textura homogênea, cristalinidade muito fina (<0,025), tendo como constituintes principais, o quartzo, a mica e cimento calcítico. Quanto às transformações diagenéticas, observa-se o início da dolomitização. Estas rochas depositaram-se em condições de águas calmas com grãos detríticos finos em suspensão (influência de sedimentação terrígena).

O Membro Lagoa Santa (CPRM, 2003) se caracteriza macroscopicamente por apresentar calcário cinza escuro a preto quando “fresco” e cinza médio a claro quanto mais alterado, de granulometria variando de fina a grossa, sendo que em alguns locais, encontram-se linhas de grãos arredondados (oóides). Forma camadas tabulares contínuas ou descontínuas, com espessura variando de média a espessa. Encontram-se estratificações tabulares de pequeno porte, corpos de forma sigmoidal, grande quantidade de vênulas e nódulos de calcita branca, preta e cor de mel, como pode ser visto na fazenda Topázio, município de Prudente de Moraes.

Observam-se, também, dobras assimétricas com vergência para oeste, microfalhas, veios de calcita dobrados e *tension gashes* rotacionados. Essa rocha, quando quebrada, exala cheiro fétido (calcarenito). A espessura dessa unidade pode chegar a 150 metros.

Formação Serra de Santa Helena

Corresponde a um conjunto litológico do Grupo Bambuí e foi, primeiramente, estudada por Costa & Branco (1961), que a denominaram de Membro Santa Helena, como parte integrante da Formação Rio Paraopeba. Posteriormente, Dardenne (1977), na abordagem



da estratigrafia do Grupo Bambuí, distinguiu seis formações: Jequitáí, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias. Esta divisão é o resultado de uma síntese da estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. Neste trabalho, adotou-se a classificação proposta por Dardenne (1977), amplamente utilizada em outros trabalhos geológicos regionais.

O posicionamento estratigráfico dessa formação a coloca imediatamente acima da Formação Sete Lagoas, normalmente com passagem brusca através de contato tectônico. Em diferentes locais, principalmente na região de predomínio de gnaisses e migmatitos, a Formação Serra de Santa Helena assenta-se diretamente sobre estas rochas, de modo brusco e discordante (discordância angular), de fácil verificação na borda da bacia. Em algumas situações, torna-se difícil precisar o contato das rochas sotopostas da Formação Sete Lagoas, no caso dos calcissiltitos com intercalações argilosas, com os siltitos e argilitos da Formação Serra de Santa Helena quando ocorrem intemperizados ou decompostos.

De acordo com a CPRM (2003), a Formação Serra de Santa Helena abrange uma litologia monótona, onde predominam litotipos de origem siliciclástica e mais raramente sedimentos carbonáticos. Os siliciclásticos, predominantemente muito finos, correspondem a siltitos e argilitos. Os sedimentos carbonáticos são lentes de diferentes dimensões, distribuídas esparsamente e correspondentes às margas e calcarenitos muito finos. Os siltitos e argilitos apresentam-se em grande parte decompostos a semi alterados, mas são encontrados frescos em pedreiras ainda ativas ou desativadas, como visto na Pedreira Pururuca, nas proximidades de Inhaúma. Quando alterados a semi alterados, exibem coloração muito variada, do amarelo ao vermelho, do creme ao cinza claro. Quando a rocha está fresca, com clivagem ardosiana (ardósia), apresenta-se de coloração verde escuro. São encontrados em finos estratos caracterizando lâminas delgadas ou em camadas espessas, podendo ou não apresentar clivagem ardosiana. Geralmente, encontram-se muito fraturados e exibem com frequência manchas de redução em formas variadas de circulares a ovais. Apresentam-se em camadas e/ou lâminas com estratificação plano-paralela, localmente com marcas de ondas (*ripple marks*) assimétricas, de diferentes direções de paleocorrentes e, menos frequentemente, exibindo estratificações cruzadas de pequeno porte.

Os arenitos são bastante escassos e apresentam-se em finas lâminas e/ou camadas intercaladas na sequência pelítica e, geralmente, possuem granulometria variando de muito fina a fina e são friáveis.



Há local onde os pelitos formam camadas homogêneas de aspecto maciço. Localmente, na dorsal da Serra de Santa Helena, ocorrem lentes de calcário e rochas silto argilosas esverdeadas com cimento carbonático e clivagem ardosiana incipiente.

Toda essa sequência encontra-se cortada por abundantes veios de quartzo-feldspatos, dobrados, quase sempre preenchendo fraturas ou zonas de alívio, provenientes de processos distencionais. Exibem, frequentemente, drusas e abundantes cristais hialinos e euédricos de quartzo como se vê na serra de Santa Helena, em Sete Lagoas. Outra forma de ocorrência desses veios quartzosos é segundo a laminação ou acamamento das rochas numa atitude concordante às rochas sotopostas. São veios geralmente estriados em consequência de deslocamentos horizontais a sub-horizontais.

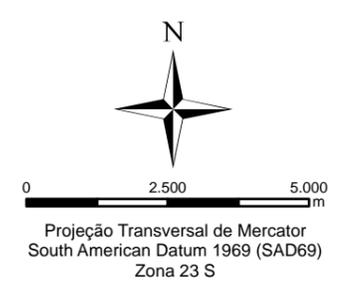
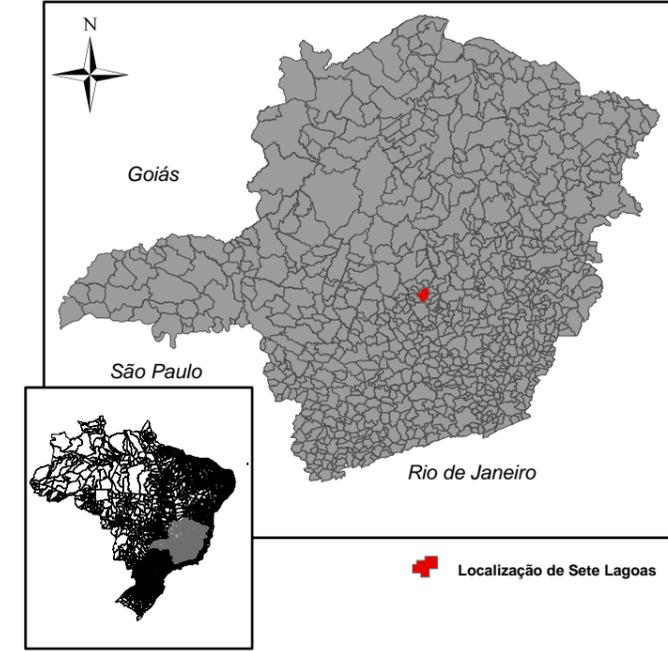
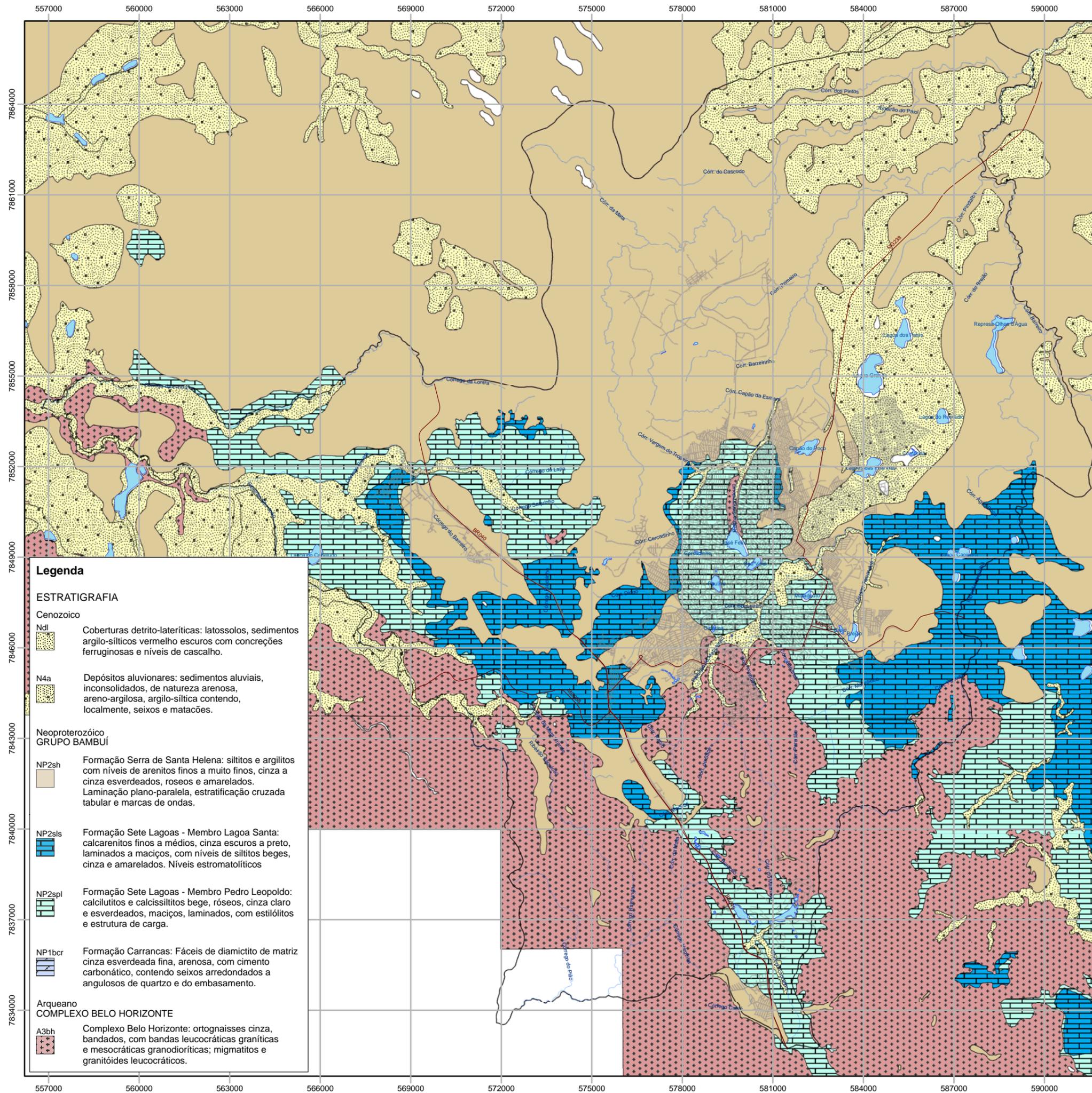
Novamente, de acordo a CPRM (2003), estas rochas foram submetidas a intensos dobramentos com cavalgamentos, situação essa muito frequente na área. A espessura de toda a Formação Serra de Santa Helena oferece valores bastante variáveis com locais onde as camadas medem centímetros e em outros atingindo até 200 metros. Além dos calcarenitos, é comum ocorrerem lentes de calcissiltitos com intercalações de argilitos e siltitos (margas) que normalmente apresentam-se com clivagem forte e ondulações assimétricas. Tratam-se de intercalações milimétricas a centimétricas que podem atingir até a granulometria de areia fina. Essas rochas são laminadas e possuem estratificação plano-paralela, com ondulações e estruturas de carga (*load casts*). Na base da Formação Serra de Santa Helena, ocorrem intercalações manganíferas, que constituem finas camadas concordantes com as rochas dominantes, siltitos e argilitos.

3.3.4 GEOLOGIA LOCAL

A geologia de Sete Lagoas será amplamente discutida adiante, considerando tanto o conhecimento pré-existente quanto as descobertas e interpretações alcançadas no presente estudo. Assim, este tópico objetiva a demonstração do mapa geológico utilizado de base para o reconhecimento e caracterização da geologia local, no entanto, sem avançar com a descrição das unidades e feições geológicas da área.

A **Figura 3.10** apresenta o mapa geológico de Sete Lagoas e arredores que foi elaborado a partir das informações em formato shapefile contidas no banco de dados digitais da GEOBANK (www.cprm.gov.br).





Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas e CPRM

CONTRATANTE:		
PROJETO:	ESTUDO HIDROGEOLÓGICO	
TÍTULO:	Fig. 3.10 Geologia do Município de Sete Lagoas (CPRM, 2003)	
ELABORADO:	Daniela Barbati Osório	
CONTRATO:	3988	
ESCALA:	1:125.000	
DATA:	DEZ/2013	

Este mapa geológico (CPRM, 2003) corresponde a melhor representação da geologia na escala local, publicamente disponível em versão digital, no julgamento destes autores. Embora, os levantamentos que o geraram sejam provenientes de trabalhos em escala regional realizados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

É importante salientar que parte das unidades aflorantes demonstradas no mapa corresponde ao substrato rochoso não visível em campo, pois subjaz à cobertura pedológica.

A estratigrafia considerada pela CPRM (2003) para Sete Lagoas é: Cenozóico – coberturas detrito-laterícias e depósitos aluvionares; Neoproterozóico – Grupo Bambuí (Formação Serra de Santa Helena, Formação Sete Lagoas - Membro Lagoa Santa, Formação Sete Lagoas - Membro Pedro Leopoldo e Formação Carrancas); e Arqueano – Complexo Belo Horizonte.

3.3.5 HIDROGEOLOGIA

Pessoa (1996) subdividiu a área de estudo em três “unidades aquíferas”: 1) Aquífero Cárstico, denominado de Unidade Aquífera Bambuí, subdividida em Aquífero Serra de Santa Helena e Aquífero Sete Lagoas; 2) Aquífero Fraturado, denominado de Unidade Aquífera Cristalina; e 3) Unidade Aquífera Granular, de cobertura inconsolidada, constituída, essencialmente, de material proveniente das rochas alteradas do embasamento cristalino e do Grupo Bambuí, que se distribuem de acordo com os processos e agente de transporte por alúvios, colúvios e elúvios.

A Unidade Aquífera Bambuí, corresponde à faixa de rochas carbonáticas e por onde os fluxos e armazenamento de água se dão pelos dutos causados pela dissolução da rocha. Essa unidade apresenta uma subdivisão que corresponde a características hidrológicas diferentes nas formações Serra de Santa Helena e Sete Lagoas. Apesar de interligarem-se litoestratigraficamente, perfazendo um sistema hídrico subterrâneo, as rochas da Formação Serra de Santa Helena e as da Formação Sete Lagoas diferenciam-se quanto às condições de fluxo e armazenamento da água. O Aquífero Serra de Santa Helena, constituído por rochas pelíticas de composição silto-argilosa, tendo como representantes as ardósias, os metassiltitos e metargilitos, podem atingir cerca de 200 metros de espessura, embora sua média seja de 60 metros. Neste aquífero, o processo de infiltração das águas é relevante, sendo responsável pela agressividade e poder para a dissolução das rochas mais



profundas. A área de recarga coincide com o conjunto serrano Santa Helena - Tombador em seus flancos oeste e leste. Quanto ao fluxo desse aquífero, foi caracterizado como sendo misto a difuso, de regime predominantemente laminar. O Aquífero Sete Lagoas, composto por rochas calcárias com espessura máxima de cerca de 160 metros, aflora localmente, evidenciando processos de carstificação superficial e desenvolvimento de cavernas e cavidades de dimensões consideráveis. Geograficamente, o aquífero distribui-se por toda a porção centro-meridional do município e aflora em uma faixa leste-oeste. Segundo Pessoa (1996), o fluxo subterrâneo foi caracterizado como de regime turbulento, devido à intensidade da circulação de água em meio ao calcário. Com relação aos parâmetros hidráulicos, a **Tabela 3.1**, modificada de Pessoa (1996), apresenta os respectivos valores de transmissividade (T) e condutividade hidráulica (K) para os aquíferos regionais (incluindo o município de Sete Lagoas). O autor utilizou-se do método simplificado de Cooper & Jacob (1946), com base nos dados dos testes de vazão máxima e recuperação. Embora os pré-requisitos necessários à interpretação e aplicação do método de Cooper & Jacob, sejam para aquíferos confinados de porosidade primária e sedimentar, o método usado pelo autor para o Aquífero Sete Lagoas, a fim de permitir algum tipo de comparação, e partindo do pressuposto de que o método Cooper & Jacob é aplicável ao se trabalhar com volumes elementares representativos em grande escala.

Tabela 3.1 Parâmetros hidráulicos (Pessoa, 1996)

Aquífero	Id do poço	T (m ² /dia)	K (m/dia)
Cristalino	177	38,4	0,768
	56	1,4	0,028
Santa Helena	Funilândia	10,3	0,257
	Paraopeba	8,73	0,218
Sete Lagoas	182	1.029,00	12,86
	185	127,6	1,6
	214	136,5	1,7
	188	1.405,00	17,56

De acordo a Pessoa (1996), os aquíferos cársticos, de acordo com os cálculos de reservas reguladora e permanente, são estimadas, respectivamente, em $1,17 \times 10^8$ e $1,85 \times 10^8$ m³. A quantificação das reservas hídricas subterrâneas, por meio da execução do balanço hídrico, permitiu a separação dos componentes hidrológicos em questão, sendo verificada uma taxa de infiltração de 19,8% em relação ao total precipitado na área, sendo 15,3% relativos ao escoamento subterrâneo.



A Unidade Aquífera Cristalina, composta por rochas granitóides indiferenciadas de caráter polimetamórfico, aflora principalmente no sul do município, onde há grande variação topográfica. Eventos tectônicos produziram fraturas e falhas que podem ser alimentadas por uma zona saturada livre, com espessura que pode atingir 35 metros de solos (PESSOA, 1996). O fluxo subterrâneo, nessa unidade, está condicionado ao sistema de falhas e fraturas das rochas cristalinas.

Por fim, a Unidade Aquífera Granular, composta por cobertura inconsolidada, foram representadas em toda extensão superficial, caracterizada por materiais inconsolidados provenientes, ou da alteração das rochas *in situ*, ou por rampas de colúvio de materiais pouco transportados, e ainda, pelos aluviões concentrados especialmente em zonas das calhas dos cursos d'água. São essencialmente aquíferos de caráter livre e descontínuos.

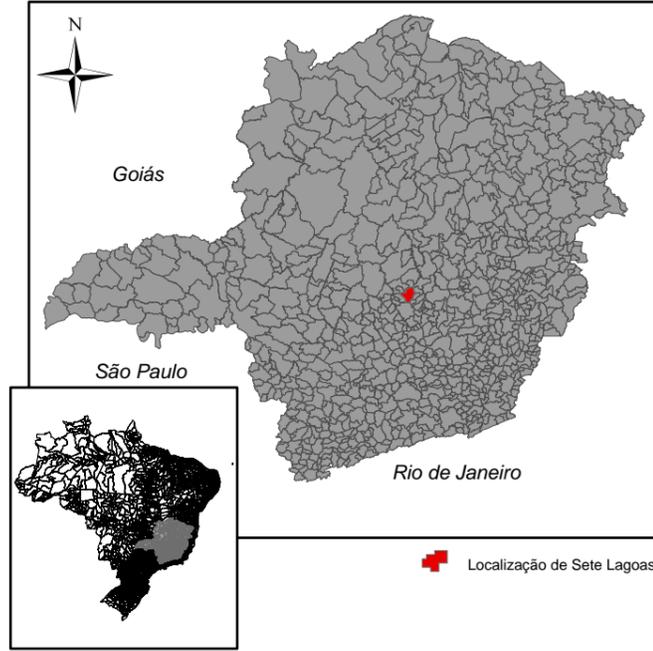
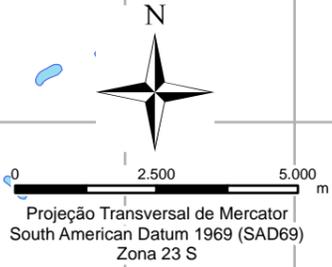
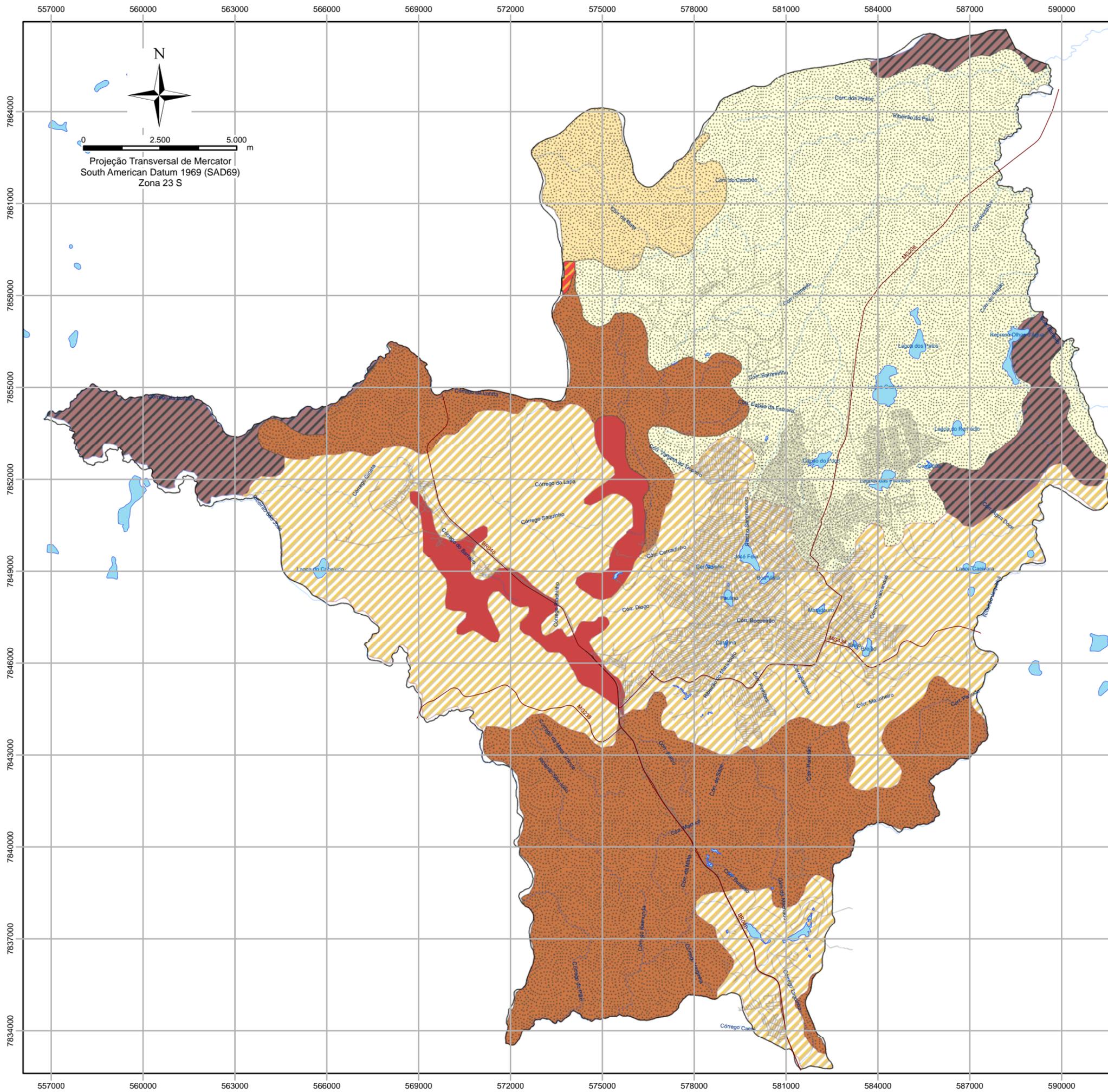
De acordo com a CPRM (2010), os aquíferos estudados, por Pessoa (1996) foram inseridos dentro de três domínios principais: 1) Domínio Aquífero Carbonático/Metacarbonático, constituído pelas rochas do Grupo Bambuí, representado pelas formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena; 2) Domínio Aquífero Cristalino, correspondendo aos litotipos do embasamento cristalino; e 3) Domínio Aquífero Poroso, referindo-se, essencialmente, pela deposição de sedimentos cenozoicos.

3.3.6 GEOMORFOLOGIA

O Mapa dos Domínios Geomorfológicos (**Figura 3.11**) foi elaborado com base nos dados fornecido pelo Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas. De acordo com o plano de controle da APASSH (Área de Proteção Ambiental Serra de Santa Helena), o município de Sete Lagoas está inserido em três unidades geomorfológicas denominadas de Planaltos Residuais do São Francisco, Superfícies Aplainadas e Zonas de Colinas.

Em áreas classificadas como “Planaltos Residuais do São Francisco”, pela CPRM (2010) como “Domínio 3”, afloram rochas da Formação Serra de Santa Helena que recobrem boa parte do norte do município de Sete Lagoas. Refere-se a relevo ondulado, colinoso e rebaixado, desenvolvido sobre rochas pelíticas de baixa permeabilidade. Possui vales abertos e a drenagem geralmente obedece a um padrão dendrítico. Na área, as cotas variam de 750 a 1000 metros.





- Legenda**
- Feições Geomorfológicas**
- Colinas
 - Colinas com vales encaixados
 - Colinas e cristas com vales encaixados
 - Cristas com vales encaixados
 - Superfície aplainada
 - Superfície ondulada em depressão
 - Superfície tabular reelaborada
 - Lagoas
 - Rodovias
 - Malha de Ruas
 - Drenagem
 - Limite Municipal

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas

CONTRATANTE:		
PROJETO:	ESTUDO HIDROGEOLÓGICO	
TÍTULO:	Figura 3.11 Domínios Geomorfológicos	
ELABORADO:	Daniela Barbati Osório	
CONTRATO:	3988	
ESCALA:	1:125.000	
DATA:	DEZ/2013	

A “Unidade Superfícies Aplainadas”, associada ao Domínio 2 (CPRM, 2010), corresponde às rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas, distribuídas de forma esparsa pela área, diminuindo para norte (N); e rochas oriundas de depósitos aluvionares. No caso das rochas carbonáticas, essas desenvolvem um relevo cárstico caracterizado por estruturas tais como sumidouros, dolinas, vales cegos, relevo ruiforme, lapiás, galerias e grutas. Com relação aos depósitos aluvionares, esses são encontrados, estratigraficamente, recobrimdo todas as unidades descritas anteriormente, porém, ocorrem mais comumente em baixos topográficos.

A Unidade “Zonas de Colinas”, associada ao Domínio 1 (CPRM, 2010), corresponde às áreas de ocorrência do Complexo Belo Horizonte. Trata-se de uma área geomorfologicamente arrasada, com morros ondulados (ortognaisses, migmatitos e granitóides). Localmente, ocorre uma morfologia na forma de cristas finas, alongadas, com comprimento variando de dezenas de metros a quilômetros. O domínio assume drenagens de formato dendrítico, com vales abertos e geralmente assoreados por sedimentos recentes.

Não possuindo subdivisão ou domínio próprio, mas também em destaque, ocorrem sedimentos recentes, preenchendo baixos topográficos (vales de drenagens e áreas de taludes ou maior declividade). De acordo com o mapeamento geomorfológico realizado pela equipe CPRM/CETEC (1991), escala de 1:100.000, várias feições geomorfológicas foram observadas e plotadas em mapa que abrange aproximadamente 70% da área do município de Sete Lagoas.

A partir das relações descritas pela CPRM, a sequência de feições classificadas como “superfícies aplanadas ou onduladas de depósitos predominantemente argilosos” estão associados diretamente com rochas filíticas e ardosianas da Formação Serra de Santa Helena, inseridas no “Domínio 1” (CPRM, 2010).

As rochas da Formação Sete Lagoas (Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa), as quais compõe o “Domínio 2”, estão de acordo com a descrição da CPRM/CETEC (1991), associadas a feições descritas como “colinas de topo arredondados”, “superfícies onduladas sobre rochas calcárias”, e localmente, sendo mais associadas a pontos de afloramentos da Formação Sete Lagoas – Membro Lagoa Santa, feições denominadas como “depressões cársticas”, ocorrendo em especial na porção centro-oeste do município.

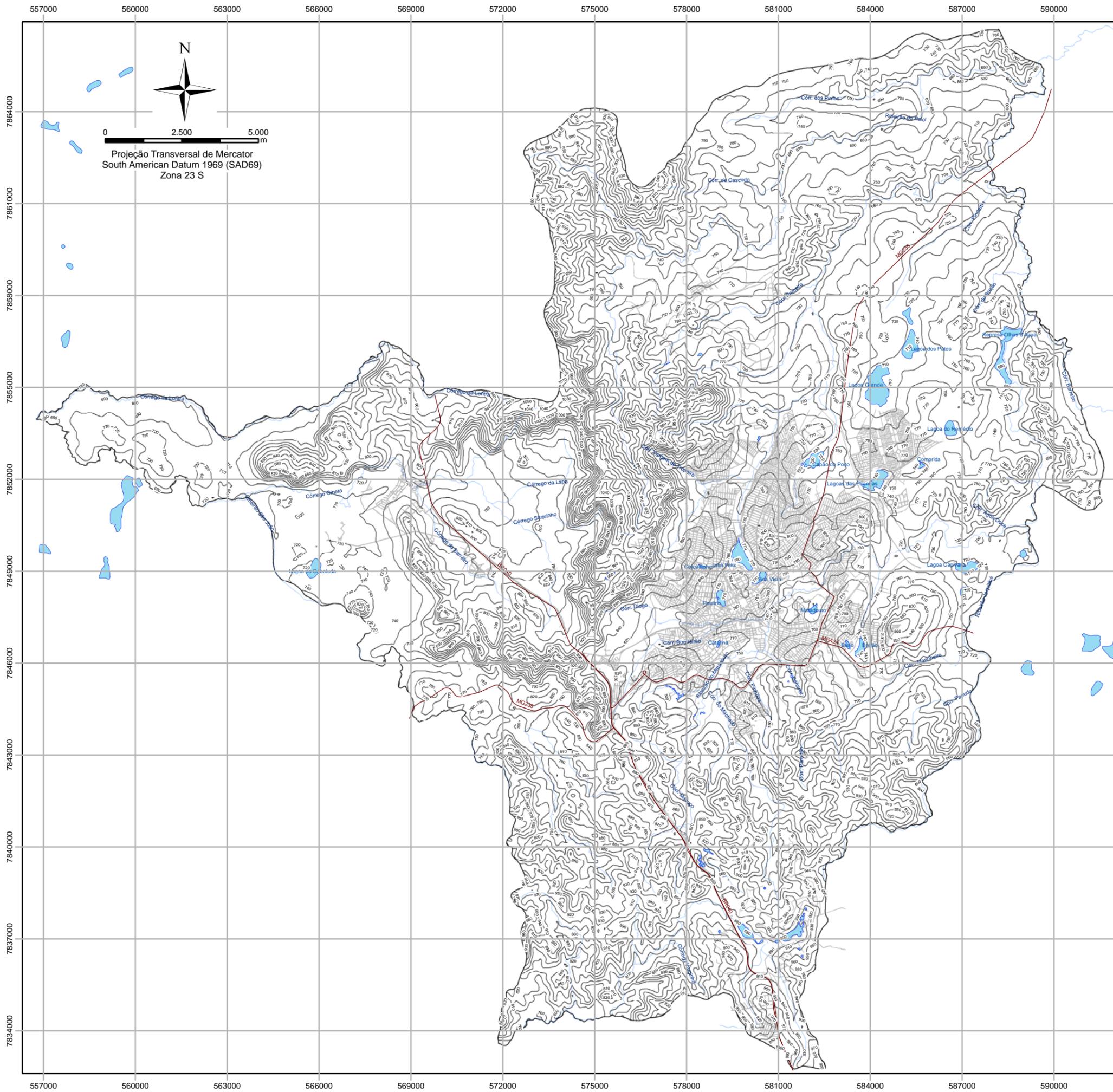
Os depósitos cenozoicos que ocorrem no município de Sete Lagoas são caracterizados como planícies ou terraços fluviais, ou rampas de colúvio.



Na concepção da CPRM/CETEC (1991), não se contemplou na área correspondente ao município de Sete Lagoas, feições típicas do “Domínio 3”, ou seja, aquele que insere rochas gnáissico-migmatíticas do Complexo Belo Horizonte.

As feições geomorfológicas descritas acima determinam o relevo da área de estudo que pode ser observado pelo mapa topográfico (**Figura 3.12**), elaborado a partir do banco de dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), disponibilizados pela EMBRAPA.






 0 2.500 5.000 m
 Projeção Transversal de Mercator
 South American Datum 1969 (SAD69)
 Zona 23 S


 Goiás
 São Paulo
 Rio de Janeiro

 Localização de Sete Lagoas

- Legenda**
-  Curva de Nível (manm)
 -  Lagoas
 -  Rodovias
 -  Drenagem
 -  Malha de Ruas
 -  Limite Municipal

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento
 da Prefeitura de Sete Lagoas e SAAE

CONTRATANTE:		
PROJETO:	ESTUDO HIDROGEOLÓGICO	
TÍTULO:	Figura 3.12 Topografia	
ELABORADO:	Daniela Barbati Osório	
CONTRATO:	3988	
ESCALA:	1:125.000	
DATA:	DEZ/2013	

3.3.7 HIDROGRAFIA

O município de Sete Lagoas está localizado nos domínios da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Sobre a superfície, instala-se um sistema de drenagem pobre, com uma rede de córregos esparsos e com pequena quantidade de drenos subordinados (LLADÓ, 1970; CABRAL, 1994).

A serra de Santa Helena tem o papel de divisor de bacias: a do rio Paraopeba e a do rio das Velhas. A sub-bacia do rio Paraopeba é representada no município pelo ribeirão São João e está localizada na parte noroeste do município, sendo que seus afluentes são os ribeirões dos Macacos, Inhaúma e o Córrego do Lontra. Esta sub-bacia abrange 36,8% do município, cerca de 185 km², distribuindo-se, geograficamente, pelas poções sul e oeste do mesmo (**Figura 3.13**).

A sub-bacia do ribeirão Jequitibá e seus afluentes, que deságuam no rio das Velhas, está presente em 63,2% do território. Seus afluentes, os ribeirões Paiol e Matadouro e o córrego Vargem do Tropeiro, nascem a cerca de 1.000 metros de altitude. A partir de seu curso médio, o ribeirão Jequitibá percorre terrenos cársticos até despejar suas águas no rio das Velhas, no município vizinho de Jequitibá. O município de Sete Lagoas se insere na área classificada como “Médio Velhas” (**Figura 3.14**).



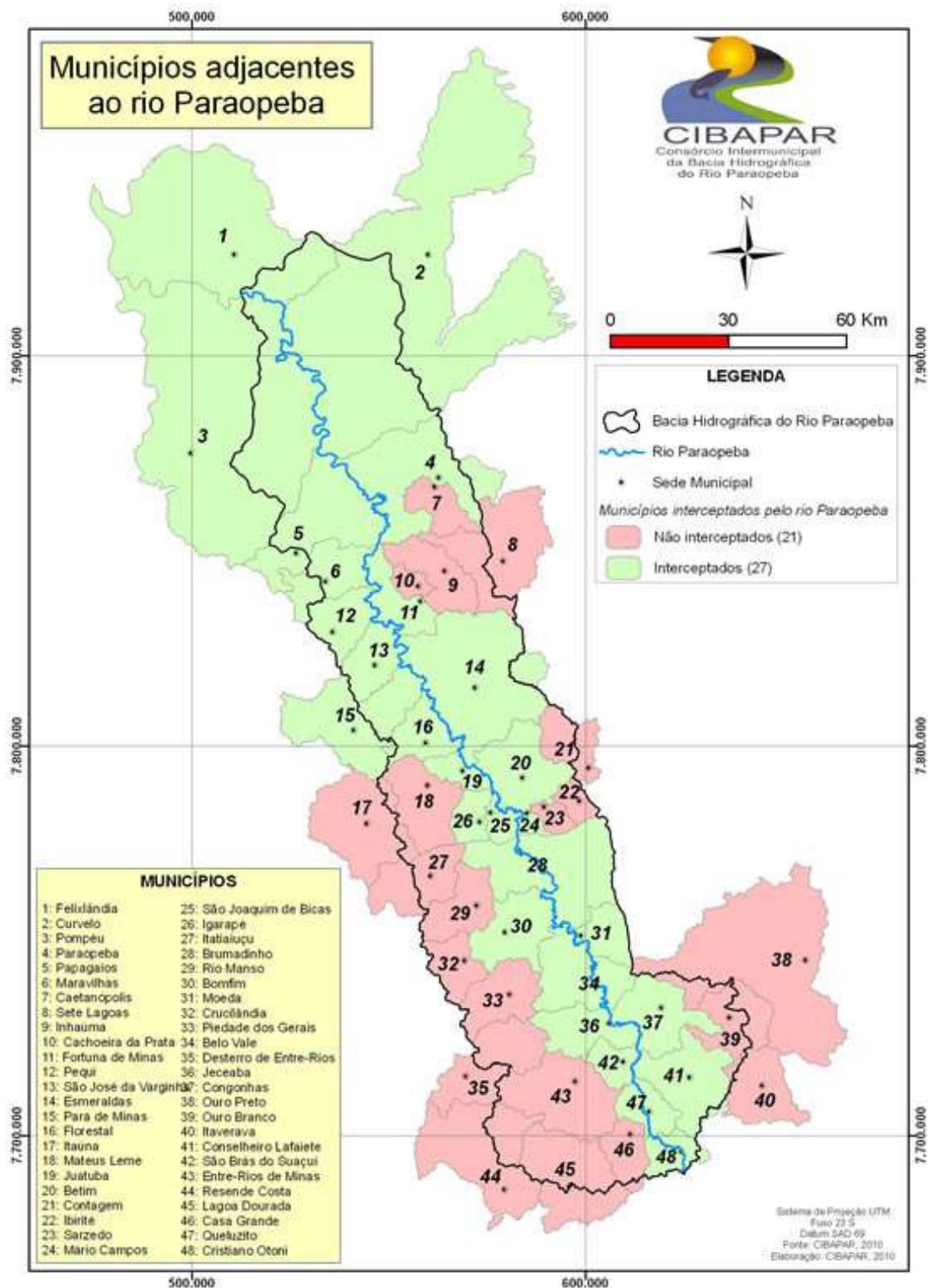


Figura 3.13 Localização e municípios abrangidos pela sub-bacia hidrográfica do Rio Paraopeba (CIBAPAR, 2013).



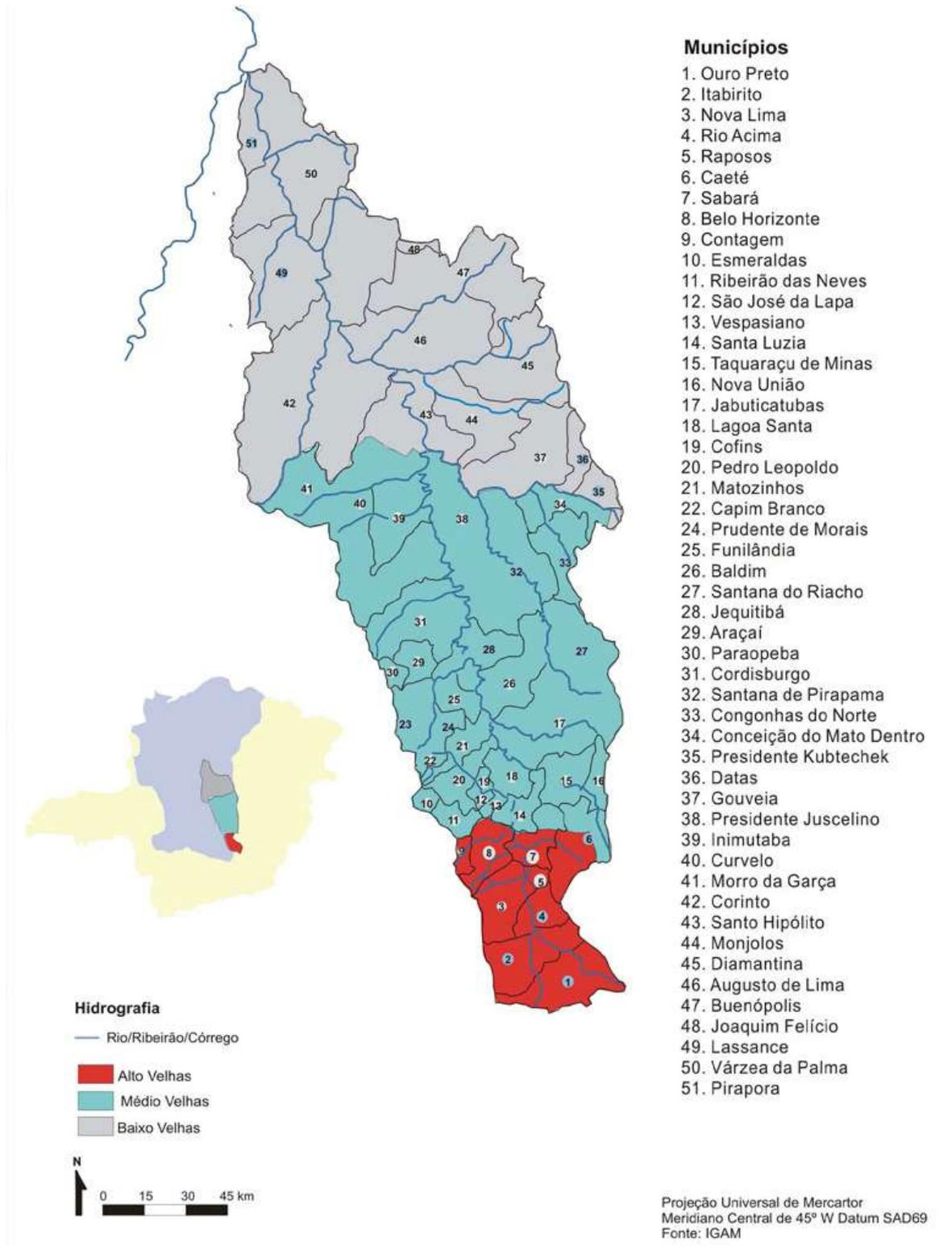


Figura 3.14 Bacia hidrográfica do rio das Velhas, com destaque a sua porção média, a qual se insere o ribeirão Jequitibá (CBH VELHAS, 2013)



De acordo com Cabral (1994), o sistema cárstico proporciona a presença de lagoas, que em alguns casos, estão interligadas ao regime dos aquíferos livres de ambientes pelito-carbonáticos, como o caso das lagoas Grande, dos Porcos, dos Remédios, da Capivara e Feia. Já as lagoas Paulino, Catarina, Boa Vista, Cercadinho, Vapabuçu e José Félix, que se encontram em áreas urbanizadas, não apresentam qualquer ligação com os aquíferos (**Figura 3.15**).

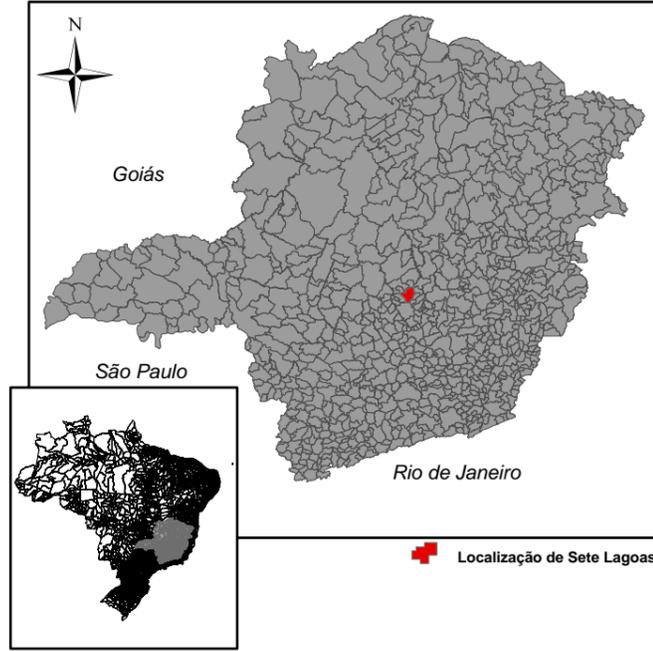
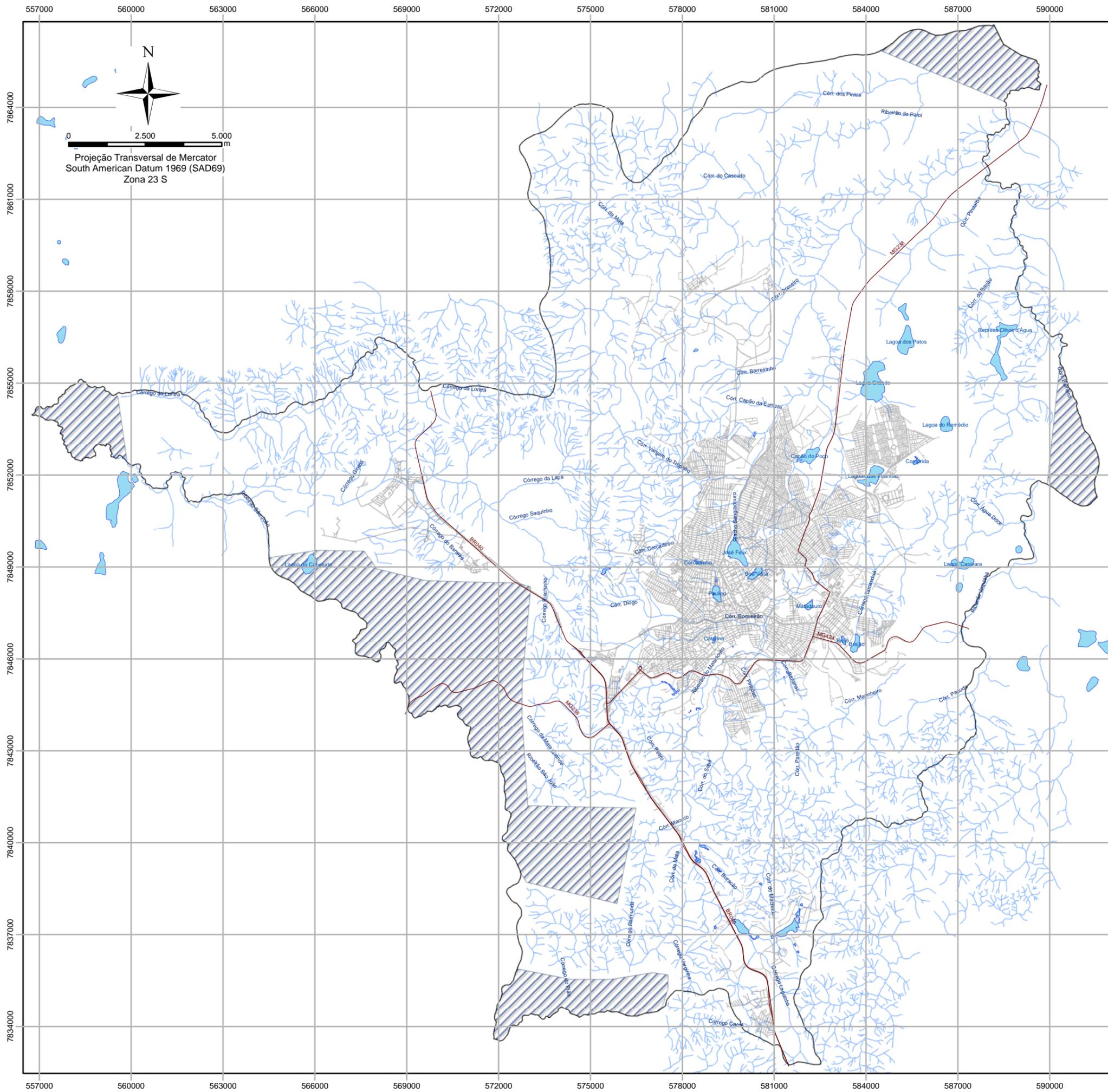
Pessoa (1996) considera que existem três sub-bacias inseridas dentro da área do município de Sete Lagoas, sendo o ribeirão Jequitibá com suas drenagens associadas o afluente mais importante, além do interflúvio gerado pela associação entre as serras de Santa Helena e Roncador.

Tais sub-bacias estão associadas geralmente a rochas pouco permeáveis, do Complexo Belo Horizonte e Formação Serra de Santa Helena. São representadas pelos córregos do Diogo e Matadouro. Esses possuem vertente para leste, com deságue preferencial para a sub-bacia do rio Jequitibá, e mais a jusante, conseqüentemente, no rio das Velhas.

Uma terceira sub-bacia é constituída pelos córregos Lontra e ribeirões São João e Inhaúma. Novamente, segundo Pessoa (1996), tais cursos de água possuem orientação E-W e ocorrem superficialmente a sedimentos pelíticos e carbonáticos (respectivamente formações Serra de Santa Helena e Sete Lagoas). De acordo com o autor, os cursos de água supostamente sofrem a influência de vazões intermitentes de surgências oriundas de rochas carbonáticas.

A **Figura 3.15** apresenta a rede de drenagens e as principais lagoas do município, sendo resultante da digitalização de fotointerpretações. Os padrões verificados são resultantes das características geográficas, geológicas e morfológicas do terreno, sendo destacados dois padrões predominantes. Nas porções centro-norte da área, o padrão de drenagem é descrito como dendrítico e, na porção sul, como predominantemente retangular relacionado com a ocorrência de rochas ígneas.





- Legenda**
- Drenagem
 - Área sem informação
 - Lagoas
 - Rodovias
 - Malha de Ruas
 - Limite Municipal

Nota: a área delimitada pelas linhas de drenagem corresponde a distribuição das ortofotos aéreas

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas e CEMIG (1970)

CONTRATANTE:	 Serviço Autônomo de Água e Esgoto	
PROJETO:	ESTUDO HIDROGEOLÓGICO	
TÍTULO:	Figura 3.15 Rede de drenagens e localização das lagoas	
ELABORADO:	Daniela Barbati Osório	
CONTRATO:	3988	 AMBIENTAL & ENGENHARIA
ESCALA:	1:125.000	
DATA:	DEZ/2013	

3.3.8 CLIMATOLOGIA

Guimarães *et al.* (2003, *apud* AVELAR & SILVA, 2000) revelam o início das medições meteorológicas no município, a partir de operações na Estação Climatológica Principal, em maio de 1926.

De acordo com Botelho (2008), o IBGE classifica o clima da região de Sete Lagoas como tropical semi-úmido, com duas estações bem distintas: inverno ameno e seco, e verão chuvoso e quente. A temperatura média do mês mais frio é de 18°C e do mais quente é de 22°C.

A média normal anual de precipitação total varia entre 1.200 a 1.500 mm, com uma distribuição das chuvas não homogênea, com 4 a 5 meses de estiagem, sendo o mês de janeiro o mais chuvoso (289,0 mm) e o mês de agosto o mais seco (10,1 mm). A média da umidade relativa do ar anual é de 70%, ocorrendo baixos valores médios mensais durante a estação seca, entre maio e setembro, período de menor índice pluviométrico. Na estação chuvosa, pode ocorrer inundações nas várzeas e regiões mais baixas.

Ressalta-se que, em ambientes cársticos, os estágios da evolução do relevo estão diretamente ligados à quantidade das chuvas.



4 BANCO DE DADOS DOS POÇOS PRODUTORES DE ÁGUA

O Banco de Dados de Poços Produtores de Água ou Cadastro de Poços, como será denominado para facilitar a citação, corresponde ao conteúdo digital e georreferenciado produzido no âmbito deste trabalho que compila dados acerca de poços tubulares usados para a captação das águas subterrâneas no município de Sete Lagoas.

Este estudo se baseia na norma técnica de projeto e construção de poço da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR 12.212 (ABNT, 2006) para definir que poço tubular é uma obra de hidrogeologia para acessar um ou mais aquíferos para captação de água subterrânea, executada com sonda perfuratriz mediante perfuração com diâmetro nominal de revestimento mínimo de 101,6 mm (4”), podendo ser parcial ou totalmente revestido em função da geologia local. Os poços tubulares também podem ser popularmente chamados de poços profundos e comercialmente denominados, de maneira inadequada, de poços artesianos.

O cadastro de poços foi consistido com informações de poços de propriedade do SAAE, ou seja, utilizados para o abastecimento público de Sete Lagoas e foi complementado com dados publicamente disponíveis sobre poços particulares, principalmente, do banco de dados do Sistema Integrado de Informação Ambiental do Estado de Minas Gerais (SIAM) e do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas da CPRM (SIAGAS).

O levantamento de dados dos poços do SAAE ocorreu a partir de fichas impressas, listas digitais, relatórios de perfuração dos poços e outras fontes de propriedade da autarquia, bem como, de dados obtidos a partir de atividades de campo realizadas no presente estudo e que serão descritas adiante.

Os dados provenientes do SIAM foram disponibilizados pela equipe técnica do Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM que acompanhou a execução deste estudo em diversas fases, bem como da validação deste relatório final. O cadastro de poços do SIAM consistia informações dos processos de solicitação de outorgas de uso das águas, atualizado em 2013, e representou significativa contribuição ao conhecimento sobre o volume de água retirado dos mananciais subterrâneos em Sete Lagoas por poços particulares.



Os dados provenientes do SIAGAS foram obtidos por acesso na página eletrônica do Serviço Geológico do Brasil (<http://siagas.cprm.gov.br>), a partir da qual foram baixados dados em planilha *Excel* e perfis litológicos e construtivos dos poços em pdf.

Todos os dados foram compilados sistematicamente em planilha digital, organizada de maneira a permitir interface com o Sistema Informações Georreferenciadas (SIG) e, desse modo, possibilitar a produção de cartografias e operações com os dados para a geração de informações e interpretações de interesse.

Deve-se ressaltar que o trabalho de compilação dos dados contou com a necessidade de avaliação e depuração dos dados, visando eliminar duplicidades e discrepâncias dos registros das diversas fontes consultadas.

Neste tópico será apresentado separadamente o cadastro de poços do SAAE e, em seguida, uma análise de todo o banco de dados de poços, visando descrever o perfil de uso das águas subterrâneas em Sete Lagoas, bem como a estimativa de retirada (exploração) dos mananciais subterrâneos.

4.1 ORGANIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE DADOS SOBRE OS POÇOS DO SAAE

A sistemática de trabalho adotada, em um primeiro momento, se deu por meio da busca e agrupamento de toda a documentação existente relacionada a um determinado poço. A pesquisa detalhada foi realizada em todos os setores responsáveis e participantes da manutenção periódica das captações: o Setor de Engenharia controla toda a documentação de poços antigos e de novas perfurações; o Setor de Manutenção e Elétrica é responsável direto pela manutenção dos equipamentos elétricos. Os dados existentes no SAAE também foram confrontados com informações disponíveis nas bases de dados do SIAM e SIAGAS.

O primeiro passo foi o reconhecimento que os poços não contavam com uma nomenclatura padronizada, levando a dificuldades acerca de identificar de qual poço era uma dada informação coletada. Os poços, em geral, em denominados por “apelidos” dados pelos operadores, em função da localidade do poço, nome do zelador ou de algum fato particular ocorrido. Desse modo, a ação inicial de cadastramento foi visita em campo, juntamente com funcionários experientes, visando à denominação e identificação padronizada de todos os poços do SAAE, bem como o registro fotográfico e o levantamento da posição geográfica



com a utilização de GPS portátil. Este levantamento inicial permitiu identificar a localização de todos os poços do SAAE (**Figura 4.1**).

Após a etapa de campo, houve a categorização das informações em uma base digital consistente e padronizada, compilada pela equipe técnica da Servmar, visando o reconhecimento e registro dos seguintes atributos:

- Endereços, coordenadas, ponto de referência, área administrativa a qual cada poço tubular pertencia e sua estação elevatória de abastecimento;
- Localização hidrográfica e hidrogeológica, constando qual bacia e sub-bacia hidrográfica o poço está inserido, bem como o tipo de aquífero e a formação geológica no ponto de captação, e,
- Compilação de dados técnicos e construtivos fazendo menção à empresa responsável pela perfuração, vazão, níveis estáticos (instalação) e dinâmicos, tipo de tubulação, diâmetro, a situação do poço (ativo ou inativo), o modelo da bomba e a data de sua instalação, dados elétricos e históricos operacionais.

Além dos dados existentes sobre os poços do SAAE, este trabalho contemplou a atualização e o reconhecimento de informações sobre os poços pela realização de atividades de perfilagens óticas e ensaios de bombeamento. Para tanto, foram efetuados desmontes, limpezas, desinfecção e instalação de tubos-guia em alguns dos poços de propriedade do SAAE. A seguir serão descritas as atividades executadas visando à avaliação e adequação dos poços, bem como à obtenção de dados atualizados sobre os poços do SAAE.

No intuito de adequar os poços às condições mínimas para a realização de ensaios hidráulicos, foram coletadas informações de sua situação. As atividades nos poços foram coordenadas e fiscalizadas pela equipe técnica da Servmar e executadas pela Jundsondas, empresa subcontratada, especializada na construção e manutenção de poços tubulares.

As atividades executadas compreenderam a execução de 50 testes de vazão escalonada, 06 ensaios de bombeamento de vazão máxima com 24 horas de duração e 09 testes de aquífero com duração de 48 horas. Além desses testes de bombeamento, foram realizados desmontes e desinfecção em 62 poços e 30 perfilagens óticas. A **Tabela 4.1** apresenta a identificação dos poços com a indicação das atividades executadas.



Tabela 4.1 Resumo dos serviços executados.

ID	ID SAAE	Retirada Bomba Desinfecção Poço	Instalação Tubo guia	Perfilagem Ótica	Análises Químicas	TIPO DE TESTE		
						Aquífero 48 horas	Produção	
							Vazão Máxima	Escalonado
PT-01	MUCURI I	X	X	X	X	X		X
PT-02	MUCURI II	X	X		X			X
PT-03	POLICLÍNICA	X	X		X			X
PT-04	PÇA DE ESPORTES III	X	*	X				
PT-05	PÇA DE ESPORTES V	X	*	X				
PT-06	PRAÇA DE ESPORTES I	X	X		X			X
PT-07	PÇA DE ESPORTES II	X	X		X			X
PT-08	TIRO DE GUERRA I	X	X	X	X			X
PT-09	TIRO DE GUERRA II	X	X		X			X
PT-10	PÇA DE ESPORTES IV	X	X		X			X
PT-11	J. Custodio CABINE	X	X	X	X			X
PT-12	J. CUSTÓDIO I BAMBÚ	X	X		X	X	X	
PT-13	SANTA LUZIA	X	X		X			X
PT-14	BOA VISTA I	X	X	X	X			X
PT-15	BOA VISTA II	X	X	X	X	X		X
PT-16	BOA VISTA III	X						
PT-17	SINHÁ ANDRADE II	X	*	X				
PT-18	SINHÁ ANDR III	X	X		X			X
PT-19	CDI - POÇO II	X	X	X	X	X		X
PT-21	CDI - POÇO III	X		X				
PT-22	POÇOS RESERVAS	X	X	X	X	X		X
PT-24	MONTE CARLO IV	X	X	X	X			X
PT-25	BAIRRO CDI II	X	X		X			X
PT-28	AV. DAS NAÇÕES	X	X	X	X			X
PT-29	TEÓFILO OTONI V	X	X		X			X
PT-30	TEÓFILO OTONI III	X	X		X			X
PT-34	CERCADINHO	X	X	X	X			X
PT-36	ELDORADO (PERIMETRAL)	X	X	X	X			X
PT-39	RECA DO JACARÉ I	X	X		X			X
PT-40	REc DO JACARÉ III	X	X	X	X	X		X
PT-41	RECDO JACARÉ II	X	X	X	X			X
PT-43	FÁBRICA MANILHAS (COLETA SELETIVA)	X	X	X	X			X
PT-44	NERY II	X	x	X	x			X

“*” = Não existia espaço entre a parede do poço e a tubulação. Com isso, o tubo-guia de ¾” não pôde ser adicionado.

“-“ = Não foi realizado.



Tabela 4.1 Resumo dos serviços executados (continuação).

ID	ID SAAE	Retirada bomba e Desinfecção	Instalação Tubo guia	Perfilagem Ótica	Análises Químicas	TIPO DE TESTE		
						Aquífero 48 horas	Produção	
							Vazão Máxima	Escalonado
PT-45	MATA GRANDE	X	X	X	X			X
PT-46	SANTO ANTÔNIO II	X	X	X	X			X
PT-47	SANTO ANTÔNIO I	X	X	X	X			X
PT-48	LAGOA CATARINA	X	X	X	X			X
PT-51	PROGRESSO	X	X		X			X
PT-52	DONA DORA	X	X	X	X			X
PT-56	HORTA JK	X	X		X			X
PT-57	PORTAL DA SERRA	X	X		X			X
PT-63	W. BRAZ I	X	X		X			X
PT-64	W. BRAZ II	X	X		X	X		X
PT-66	W. BRAZ III	X	X	X	X			X
PT-69	ITAPOÁ/BRASÍLIA	X	X		X			X
PT-70	ESMERALDAS II		*					
PT-71	ESMERALDAS II (LAGOA BREJÃO)	X	X		X			X
PT-72	VAPABUCÚ	X						
PT-73	NOSSA SRA DE LOURDES	X	X		X			X
PT-74	FCA	X	X		X			X
PT-75	CIDADE DE DEUS	X	X	X	X			X
PT-77	PRIMAVERA	X	X	X	X			X
PT-78	MORRO REDONDO	X	X		X		X	
PT-81	QUINTAS DA VARGINHA III	X	X		X			X
PT-82	EST. ECOLÓGICAS	X	X		X		X	
PT-84	PEDRAS	X	X		X			X
PT-85	QUINTAS DO LAGO I	X	X		X			X
PT-86	QUINTAS DO LAGO II	X	X		X	X		X
PT-87	QUINTAS DO PARAÍSO	X	X		X		X	
PT-89	LONTRA	X	X		X		X	
PT-90	RIACHO DO CAMPO	X	X		X		X	
PT-99	BARREIRO I (RECANTO GINETA)	X	X	X	X			X
PT - 105	TEÓFILO OTONI VI	X	X	X	X	X		X
TOTAL		62	56	30	56	9	6	50

“*” = Não existia espaço entre a parede do poço e a tubulação. Com isso, o tubo-guia de 3/4” não pôde ser adicionado.

“-” = Não foi realizado.



4.1.1 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES FÍSICAS E ADEQUAÇÃO DOS POÇOS

O escopo de trabalho não contemplava a execução de atividades em todos os poços do SAAE e, desse modo, foi necessária uma triagem para selecionar o elenco de maior interesse aos serviços executado. Os critérios adotados para a seleção dos poços foram:

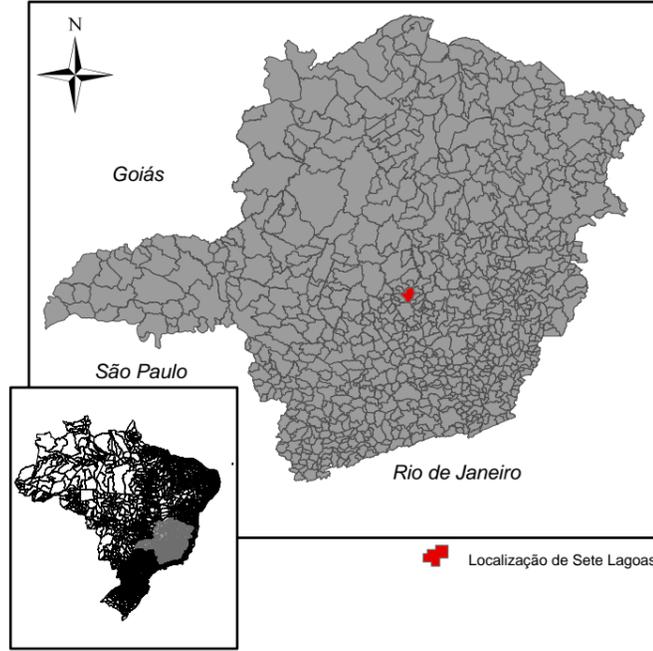
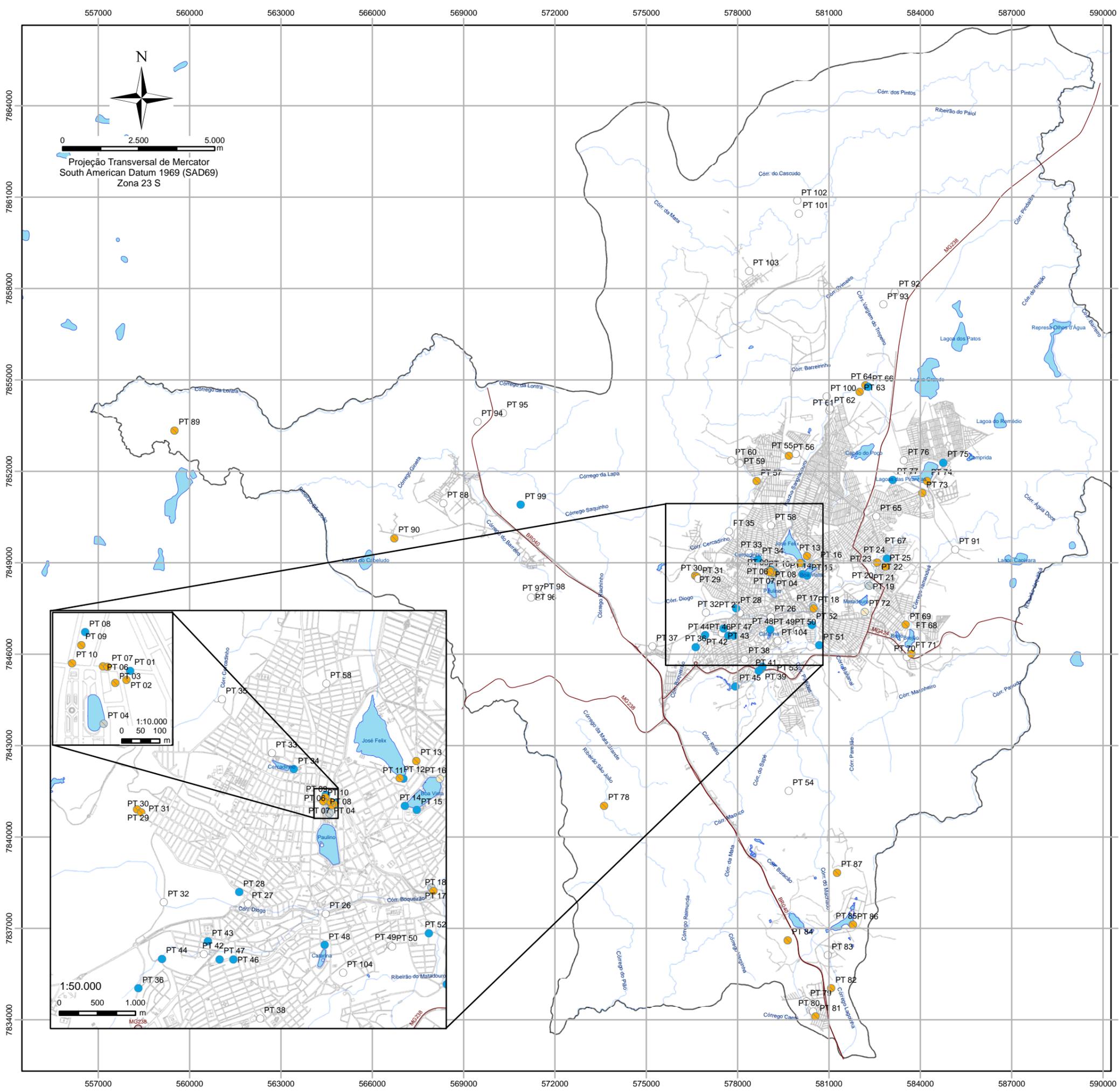
- Relevância dos poços para o SAAE, com relação ao nível de atendimento aos requisitos legais e normativos vigentes;
- Relevância de poços para a determinação de parâmetros hidráulicos dos principais aquíferos (cárstico, poroso e fraturado) em áreas de interesse;
- Importância relativa dos poços em termos de regime de produção, tipo de uso e demanda; e
- Nível de dependência do abastecimento público em relação aos poços, de acordo com as características do sistema de distribuição suprido pelos mesmos.

Entre os dias 16.08.2011 e 25.04.2012, foram executadas as intervenções nos poços relacionadas à retirada do equipamento de bombeamento existente, cadastramento em ficha de campo correspondente e reinstalação do equipamento nos poços identificação e localizados na **Figura 4.1**. Nesses poços foram realizadas desinfecções e instalados tubos-guia para a medição dos níveis de água. Em 5 poços não foi possível a instalação de tubos guia, devido o espaço insuficiente entre o revestimento do poço e a tubulação.

Atividade de Desmonte

Iniciou-se com a retirada do equipamento de bombeamento existente nos poços, sendo esse cadastrado em ficha de campo correspondente (**Fotos 4.1 e 4.2**). Em seguida, foram anotados os dados de profundidade de instalação (**Foto 4.3**), diâmetro do tubo edutor e espessura dos cabos de alimentação de energia. Na reinstalação e descida do equipamento, foi acrescido um tubo de medição de nível em PVC rígido, de diâmetro ¾" (tubo guia) (**Fotos 4.4 e 4.5**). No caso em que não foi possível a instalação do tubo-guia, devido ao espaço insuficiente entre a parede do poço e os tubos geomecânicos, foi utilizada outra tubulação, de ½" de diâmetro.





- Legenda**
- Poços do SAAE
- Sem intervenção
 - Retirada da Bomba
 - Retirada da Bomba+Instalação do tudo guia
 - Retirada da Bomba+Instalação do tudo guia + filmagem
 - Retirada da Bomba+filmagem
 - Lagoas
 - Rodovias
 - Malha de Ruas
 - Drenagem
 - Limite Municipal

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas e SAAE

CONTRATANTE:	 Serviço Autônomo de Água e Esgoto	
PROJETO:	ESTUDO HIDROGEOLÓGICO	
TÍTULO:	Figura 4.1 Localização dos Poços do SAAE e intervenções	
ELABORADO:	Daniela Barbati Osório	
CONTRATO:	3988	 AMBIENTAL & ENGENHARIA
ESCALA:	1:125.000	
DATA:	DEZ/2013	



Foto 4.1 PT-78, antes do desmonte.



Foto 4.2 Retirada do equipamento de bombeamento do PT-72.





Foto 4.3 Medição da profundidade do PT-78.



Foto 4.4 Tubulação do PT-78 e tubos para a medição de nível.





Foto 4.5 PT-78, após término do serviço.

Atividade de Desinfecção

Após a reinstalação dos equipamentos, foi feita a desinfecção do poço, aplicando-se uma solução clorada, composta por água e cloro (em pó) (**Foto 4.6**).



Foto 4.6 Desinfecção do poço.



Atividade de perfilagem ótica

A perfilagem ótica consiste na filmagem do interior do poço com foco na verificação das condições internas dos revestimentos e filtros, na avaliação quanto à integridade construtiva e adequado funcionamento e na descrição ou confirmação do perfil construtivo do poço.

As perfilagens foram executadas com o equipamento “R-1000 Dual Cam” que registra imagens em cores com capacidade de rotação e captação em 360° (**Foto 4.7**). O **Anexo II** apresenta os relatórios das perfilagens óticas de todos os poços filmados, sendo que os originais das filmagens, em arquivos digitais foram entregues ao SAAE em 30 mídias DVD, sendo uma para cada poço.

O procedimento de perfilagem consiste em conduzir o sensor ótico por um guincho elétrico portátil, conectado a cabos de fibra ótica que podem alcançar profundidades máximas de 300 metros e que estão conectados a um aparelho receptor com monitor que viabiliza, em tempo real, a filmagem (**Foto 4.8**).



Foto 4.7 Sensor ótico responsável pela captação das imagens.





Foto 4.8 Sistema de controle e recepção de imagens.

Análise crítica da situação dos poços vistoriados

As observações de campo mostraram que há um universo variável de diâmetros de instalação dos poços do SAAE, com uma frequência maior apontando para poços de 6 e 8 polegadas (aproximadamente 70% dos poços). Outros 10% dos poços exibem uma relação de diâmetro entre o revestimento interno e externo menor que $\frac{3}{4}$ de polegada, o que impede a instalação de tubos de monitoramento dos níveis de água (**Foto 4.9**). Deduz-se que, ao longo dos anos, os revestimentos internos foram sendo alargados para que bombas de maior potência fossem instaladas, ou que as empresas encarregadas da execução negligenciaram os requerimentos e normas relacionadas à instalação de poços. Nesta mesma linha, alguns poços, no momento de realização das adequações, só puderam receber tubos de $\frac{1}{2}$ polegada.

Com relação à parte elétrica, pelo fato de a energia disponível ser somente de 220V trifásica, para a maioria dos poços (aproximadamente 95% dos poços), os cabos de alimentação atuais não podem ter seus diâmetros reduzidos. Com uma voltagem de 380V, por exemplo, seria possível uma redução de 50%, implicando diretamente em uma redução nos custos energéticos e diminuindo o espaço ocupado entre a parede do poço e tubulação de adução; adicionalmente, haveria mais espaço interno para equipamentos, diminuindo os riscos de aprisionamento nas manobras de instalação e retirada da bomba e cabos.





Foto 4.9 Espaço insuficiente entre tubulação e revestimento do poço.

Outra situação observada foi que, em todos os poços que foram retirados os equipamentos, verificou-se a utilização de tiras de borrachas, como forma de fixação dos cabos elétricos nas tubulações. O estado físico dessas tiras mostrava sempre alto grau de desgaste, significando que o peso do cabo livre ou o atrito com a parede do poço as deslocavam para baixo. Em alguns poços, foram encontradas as tiras de borracha alocadas no fundo dos poços ou dentro das fraturas.

Com relação à conservação das tubulações, na maioria dos poços, foi observado, além de sinais de oxidação, um precário estado de conservação, como excessivo desgaste nas roscas (**Foto 4.10**), o que pode gerar problemas na reinstalação ou em futuras manutenções. Não por acaso, há um histórico de perdas de bombas dentro dos poços, bem como problemas de manobra durante as manutenções. Outros poços apresentavam, além dessas características, furos de até 2 centímetros de diâmetro, o que compromete a capacidade de bombeamento do poço (**Foto 4.11**). Provavelmente, algumas perdas de vazão também estejam relacionadas às perdas de água dentro do próprio poço.



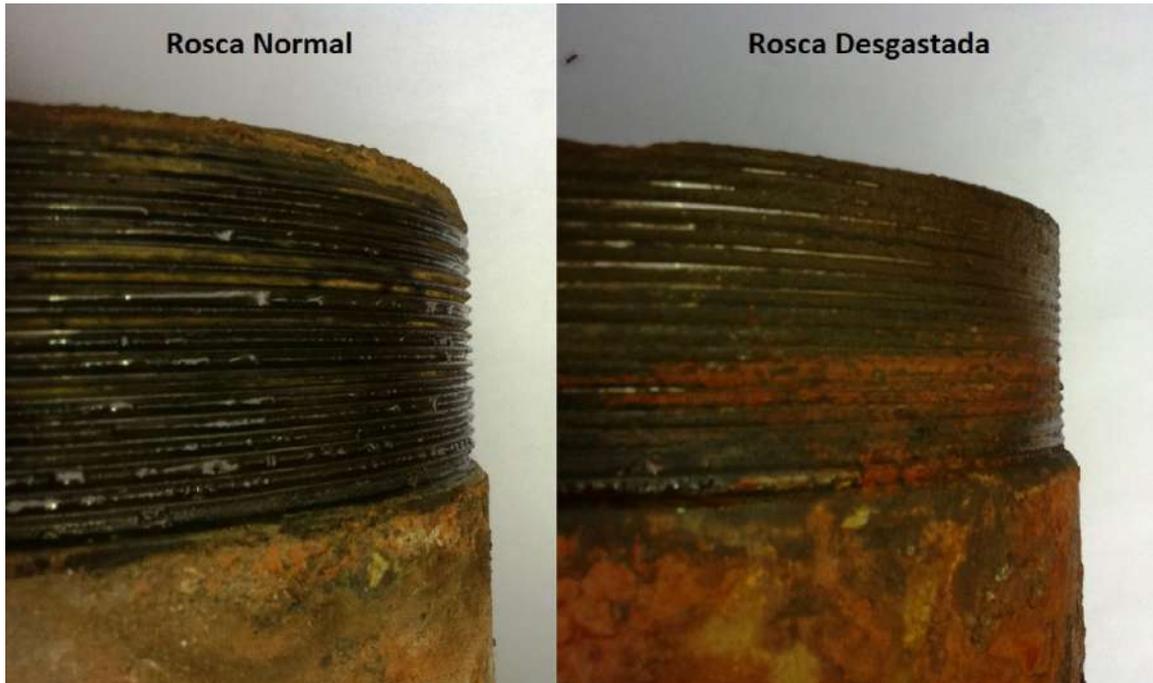


Foto 4.10 Comparativo entre roscas normal e com elevado grau de desgaste.



Foto 4.11 Furos encontrados na tubulação, no PT-45.



Dentre os poços que tiveram filmagem, apenas os poços PT-41, PT-43, PT-45, PT-46, PT-47, PT-51, PT-52, PT-55 e PT-105 não apresentaram irregularidade. Os principais critérios de avaliação dos poços foram resumidos na **Tabela 4.2**, permitindo ao SAAE planejar futuras ações de manutenção, adequação e/ou substituição de poços.

Tabela 4.2 Condições Construtivas dos Poços do SAAE.

Poço	Profundidade (m)	Condição Construtiva do Poço
PT-01	7,95	Furo na Tubulação de revestimento
	13,96	Rosca na tubulação de revestimento oxidada
	52,33	Coloração avermelhada indicando a presença de concentração de ferro na água
	52,57	Furo na Tubulação de revestimento
PT-04	67,66	Fundo do poço preenchido por pedaços de câmara de borracha
PT-05	77,05	Canaleta em inox desprendida de bomba submersa
	81,62	Presença de pedaços de borracha
PT-08	86,88	Partículas sólidas presentes
PT-11	89,70	Coloração avermelhada decorrente de decantação/colmatação de ferro
	94,88	Possível alteração na composição da rocha carbonática
PT-14	80,68	Presença de pedaços de borracha
PT-15	34,35	Presença de água superficial (entrada a 13,89m)
PT-17	49,4	Entrada de água no contato da rocha carbonática com a base do revestimento
PT-19	58,67	Movimentação acentuada de água indicando proximidade de caverna/fratura
PT-21	59,4	Presença de pedaços de borracha
PT-22	-	Excesso de partículas de ferro
PT-24	1,4	Furo na Tubulação de revestimento
	20,72	Pedaço de cabo da bomba
PT-28	29,35	Entrada de água superficial (furo na emenda da tubulação)
PT-34	-	-
PT-36	110,82	Canaleta de inox no fundo do poço
PT-40	7,77	Excesso de partículas de ferro
PT-41	-	-
PT-43	-	-
PT-44	24,75	Pedaço do tubo solto e entrada de água superficial na rosca entre os tubos
	24,90	Entrada de água superficial pela rosca danificada entre os tubos
	25,17	Entrada de água superficial
PT-45	-	-
PT-46	-	-
PT-47	-	-
PT-48	60,89	Possível martelo DTH "quebrado" no fundo do poço
	61,11	"Parte superior do martelo"
	61,57	"Corpo do Martelo"
PT-51	-	-
PT-52	-	-
PT-55	-	-
PT-66	40,14	Presença de pedaços de borracha
	64,31	Presença de pedaços de borracha
PT-75	79,43	Canaleta em inox solta no poço
	79,52	Canaleta em inox solta no poço
PT-77	32,12	Canaleta em inox solta no poço
	32,15	Excesso de partículas de ferro
PT-99	116,19	Presença de ferro bactéria nas paredes do poço
	117,86	Presença de ferro bactéria nas paredes do poço
PT-105	-	-



Pela situação física observada no sistema submerso dos poços (o que inclui desde o cavalete, as tubulações de adução, cabos elétricos, eletrodos e a bomba submersa), os poços avaliados provavelmente não passaram por serviços de manutenção preventiva. Em uma manutenção preventiva, além do painel elétrico, todo o sistema deve ser avaliado por técnico capacitado, juntamente com o controle dos materiais existentes nos poços para verificação da necessidade de substituição ou não.

Em consequência, é recomendável a prática de algumas ações, como forma de dinamizar e fazer mais eficientes as manobras de manutenção e limpeza de poços, por exemplo:

- Turbilhonamento e desenvolvimento de poços recém instalados mediante a injeção de ar;
- Estabelecer protocolos rígidos de manutenção preventiva que devem ter um ciclo de até dois anos;
- Realizar melhoras no entorno imediato dos poços para mantê-los acessíveis ao maquinário de manutenção e monitoramento;
- Substituir coluna de tubulação de adução por barras de 6 metros de comprimento, a fim de diminuir o tempo de manobra à manutenção do poço.

A **Tabela 4.3** apresenta as rotinas mínimas para a gestão dos poços, sugeridas pela equipe técnica envolvida nos trabalhos de limpeza e adequação de poços.

Tabela 4.3 Rotinas mínimas para a gestão dos poços.

Tarefa	Frequência	Observação
Limpeza com Compressor	Mínimo 2 anos	Pode variar para mais ou menos após diagnóstico
Limpeza com Produto Químico	Mínimo 2 anos	
Vistoria Sistema Elétrico	Mínimo Semestral	-
Teste de Vazão	-	Atender a legislação IGAM/FEAM
Substituição tubulação adução	-	Avaliar durante o serviço de limpeza a cada 2 anos



4.1.2 EXECUÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS HIDRÁULICOS

Com o objetivo de se determinar a vazão de exploração, equações características dos poços e curvas de rebaixamento, bem como a eficiência do poço, foram realizados 50 testes de produção, do tipo escalonado. Além desses, foram realizados também 9 testes de aquífero e 6 ensaios de bombeamento de vazão máxima com 24 horas (**Tabela 4.1**). O **Anexo III** traz os dados relativos aos testes, bem como os gráficos de interpretações.

Para a medição do nível estático (NE) e acompanhamento da evolução dos níveis dinâmicos (ND) dos testes, foram utilizados medidores eletrônicos de nível de água. Concomitantemente aos valores do ND, foram medidos os valores de oxigênio dissolvido (OD), condutividade elétrica (CE), pH, temperatura e potencial de oxirredução (ORP) da água, utilizando o medidor multiparâmetro HI 9828, da HANNA. O objetivo desses registros se vinculou ao trabalho de hidrogeoquímica.

Para a medição e controle de vazão, foi utilizado um medidor de vazão ultrassônico, modelo Portaflow 300, da Micronics (**Foto 4.12**) que tem como princípio o tempo de trânsito do feixe de ultrassom no sentido do fluxo e no sentido contra o fluxo da água, onde dois transdutores que são acoplados na parede externa do tubo emitem e recebem pulsos de ultrassom. O tempo de trajeto desses pulsos é analisado por um circuito eletrônico microprocessado que efetua o cálculo da vazão instantânea.



Foto 4.12 Medidor de vazão ultrassônico.



Teste de Vazão 24 horas

Foram realizados seis ensaios de vazão que consistiram no bombeamento de 24 horas de duração, ininterruptas, e o registro da evolução dos rebaixamentos no próprio poço bombeado, seguida de um período de recuperação de até 80% no valor do nível da água. O objetivo foi a obtenção da exploração da vazão ideal. Com os resultados desses testes também foi possível calcular os valores de Q/s (vazão específica) e de transmissividades (T); este último, a partir do método de Cooper & Jacob (1946).

Testes de Produção ou Testes Escalonados

Os cinquenta poços que foram submetidos aos testes de produção estão localizados na **Figura 4.2**, sendo que esses ensaios consistiram no bombeamento da água dos poços e o registro da evolução dos rebaixamentos no próprio poço bombeado. O bombeamento foi executado em quatro etapas, com 2 horas de duração cada, com vazões (Q) progressivamente crescentes. Durante cada etapa, a vazão foi mantida constante, passando-se de uma para outra mediante o aumento brusco da vazão. O escalonamento da vazão variou entre um mínimo e um máximo, em função do rendimento da bomba. Com isso, de acordo com Feitosa *et al.* (2008), testes com no mínimo as três primeiras vazões, onde não ocorre fluxo turbulento no pré-filtro, já são suficientes para serem utilizadas para a determinação da equação característica do poço (S_w), dada pela expressão:

$$S_w = BQ + CQ^2$$

Onde: B: coeficiente de perdas laminares totais e BQ as perdas de carga do aquífero; C: coeficiente das perdas turbulentas, e CQ^2 a perda de carga no poço; e 2: expoente de vazão (adimensional).

Para o cálculo de eficiência hidráulica do poço (EF), esse é definido como sendo a relação entre as perdas de cargas naturais (B_1Q) e totais ocorridas durante o bombeamento (B_1Q+CQ^2):

$$EF = B_1Q / (B_1Q + CQ^2)$$



Portanto, um poço seria 100% eficiente na hipótese de que todas as perdas laminares ou turbulentas, com exceção das perdas naturais no aquífero, fossem nulas.

O conhecimento das características físicas do aquífero em cada local é o fator que comanda a interpretação das condições hidráulicas dos poços. Em geral, nos poços perfurados em terrenos granulares os parâmetros hidráulicos seguem mais de perto as formulações teóricas, dando maior margem de segurança na interpretação dos resultados de ensaios. O mesmo não se dá nos poços perfurados em terrenos cristalinos ou em rochas calcárias

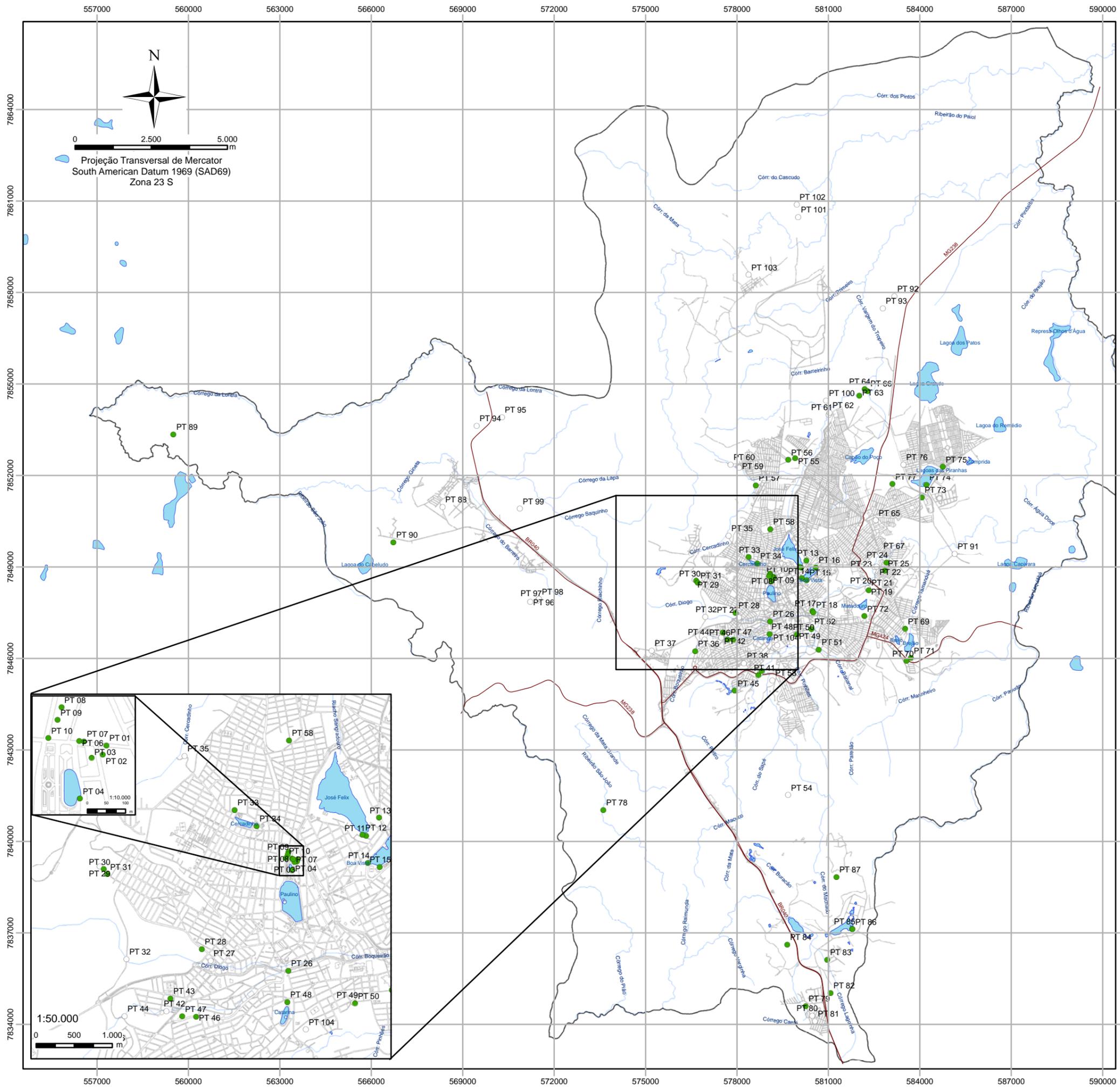
Como a obtenção das equações são determinadas graficamente, por meio de retas, a partir de dados de cada etapa escalonada de rebaixamento, é imprescindível que o ensaio apresente dados de rebaixamento consistentes. Entretanto, do total dos 50 ensaios realizados, somente 28 testes obtiveram resultados de rebaixamento confiáveis e que puderam ser aplicados à metodologia. Os 22 ensaios restantes apresentaram dados, em cada etapa de escalonamento, inconsistentes, resultado de rebaixamentos incipientes dos níveis dinâmicos (ND), e em alguns casos, até a elevação desses.

Salienta-se que, como os testes foram realizados na sua grande maioria em região cárstica e de altíssima transmissividade, que é reflexo das características hidrogeológicas do meio: carstes com grandes espaços onde a água circula e se armazena.

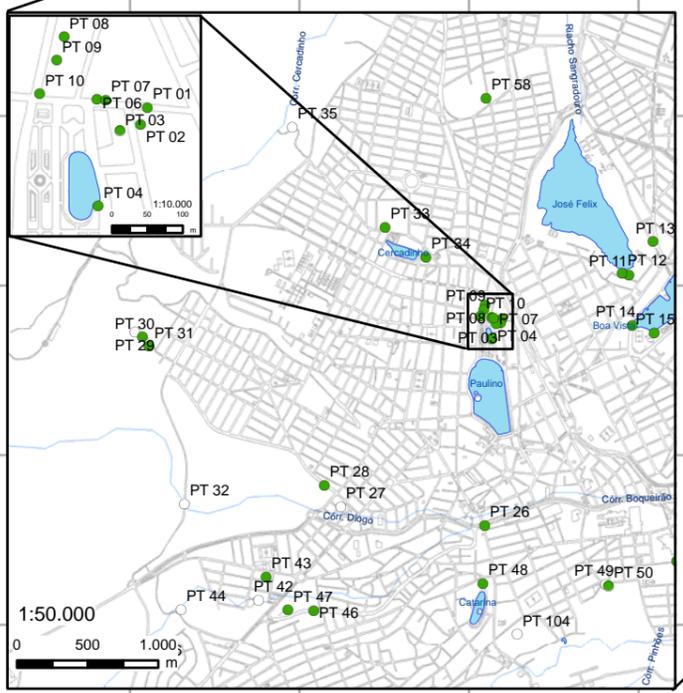
A dificuldade de interpretação está em que este tipo de testes e seus cálculos refletem melhor a realidade quando aplicados a aquíferos porosos, não tanto assim aos cársticos; adicionalmente, uma boa parte das bombas dos poços do SAAE está subdimensionadas e/ou sofrem de desgaste, o que limita a vazão máxima explotável. A coleta de dados durante os ensaios indicaram que o aquífero estudado tem grande condutividade hidráulica, de modo que, para que haja rebaixamentos significativos em testes de produção dessa natureza, a vazão de bombeamento necessária exigiria bombas de maior capacidade que as atuais. Desta forma, para uma parte dos poços as altas transmissividades, somadas às baixas vazões não permitem interpretações consistentes.

Considerando o anterior, e somente para aqueles poços que mostraram rebaixamento de nível dinâmico, a **Tabela 4.4** compila as equações características do poço, a eficiência hidráulica, as vazões específicas médias e os rebaixamentos específicos médios dos poços, enquanto que os gráficos referentes a esses ensaios podem ser encontrados no **Anexo III**.





- Legenda**
- Poços**
- Poços do SAAE
 - Poços do SAAE submetidos aos testes de produção
 - Lagoas
 - Rodovias
 - Malha de Ruas
 - Drenagem
 - Limite Municipal



Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas

CONTRATANTE:	 Serviço Autônomo de Água e Esgoto	
PROJETO:	ESTUDO HIDROGEOLÓGICO	
TÍTULO:	Figura 4.2 Poços do SAAE submetidos aos testes de produção	
ELABORADO:	Daniela Barbati Osório	
CONTRATO:	3988	 AMBIENTAL & ENGENHARIA
ESCALA:	1:125.000	
DATA:	DEZ/2013	

Tabela 4.4 Equações características dos poços, eficiência hidráulica dos poços, vazões específicas médias e rebaixamentos específicos médios.

Poço	Tipo de Teste	Equação Característica Poço ($S_w = BQ + CQ^2$)	Eficiência Hidráulica Poço ($EF=B1Q/B1Q+CQ^2$)	Vazão Específica Média (Q/sw - m ³ /h/m)	Rebaixamento Específico Médio (sw/Q - m/m ³ /h)
PT-13	Escalonado	0,0041742440Q + 0,000097532Q2	59%	128,77	0,012
PT-18	Escalonado	0,00855Q + 0,000085Q2	77%	81,44	0,012
PT-22	Escalonado	0,557413446Q + 0,0134251760Q2	80%	2,87	0,352
PT-24	Escalonado	0,009301Q +0,00004007Q2	72%	73,79	0,011
PT-25	Escalonado	0,02298151Q + 0,00275755Q2	53%	17,92	0,062
PT-28	Escalonado	0,0360447Q + 0,002898452Q2	54%	12,77	0,081
PT-30	Escalonado	0,0267979Q + 0,0013351163Q2	56%	113,79	0,008
PT-36	Escalonado	0,00254966667Q + 0,0014342Q2	11%	30,46	0,035
PT-39	Escalonado	0,053734Q + 0,01134074074Q2	28%	3,67	0,291
PT-40	Escalonado	0,962571904Q + 0,0549268932Q2	94%	1,16	0,859
PT-41	Escalonado	0,093899285Q + 0,0023584Q2	61%	11,94	0,093
PT-45	Escalonado	27,44349209 Q + 11,41631606Q2	38%	0,21	5,921
PT-46	Escalonado	6,127701802Q + 0,1659347002Q2	75%	8,99	0,112
PT-47	Escalonado	0,0744774482Q + 0,0015640252Q2	38%	20,23	0,049
PT-48	Escalonado	0,0107228198Q + 0,0001597964Q2	61%	54,25	0,018
PT-51	Escalonado	0,242501066Q + 0,002695585Q2	86%	5,75	0,175
PT-52	Escalonado	20,42123447Q + 0,8594643707Q2	72%	9,26	0,115
PT-57	Escalonado	127,1936465Q + 0,59686144 Q2	98%	0,18	6,448
PT-63	Escalonado	11,3177277Q + 0,3149247222Q2	86%	8,53	0,118
PT-66	Escalonado	15,86109089Q + 0,1861873745Q2	68%	7,02	0,145
PT-73	Escalonado	1,150156056Q + 0,1331871118Q2	90%	0,46	2,155
PT-74	Escalonado	0,0022433581Q + 0,0004258065Q2	40%	142,87	0,007
PT-77	Escalonado	0,680072463Q + 0,0087753623Q2	79%	3,56	0,285
PT-81	Escalonado	5,520888889Q + 1,009629542Q2	83%	0,14	7,429
PT-84	Escalonado	0,479964121Q + 0,01487127273Q2	94%	2,48	0,407
PT-85	Escalonado	0,005116804Q + 0,02024167742Q2	16%	0,06	20,731
PT-86	Escalonado	3,261216117Q + 0,4865787546Q2	77%	0,19	5,329
PT-99	Escalonado	8,287459007Q + 0,6925862247Q2	71%	3,87	0,268



Com relação à eficiência dos poços, os dados mostraram que 45% dos testes apresentaram uma eficiência hidráulica acima de 70%, enquanto que 55% dos poços avaliados apresentaram eficiência abaixo desses 70%. As explicações mais plausíveis para esta particularidade são:

- Desgaste da tubulação (furos, roscas desgastadas);
- Bombas submersas subdimensionadas e/ou desgastadas;
- Obstrução mecânica do poço (tubulações e parede do poço, cabo elétrico, tiras de borracha); e
- Obstrução química do poço (incrustações da parede interna do poço ou da bomba submersa).

Para ilustrar as zonas de maior produtividade quanto à exploração subterrânea, foi confeccionado um mapa de distribuição de Q/s (**Figura 4.3**), utilizando-se dados dos ensaios de produção escalonados mais confiáveis, dos testes 24 horas de vazão, bem como dos testes de aquífero, de 48 horas de duração e interpretações de ensaios realizados por outras empresas (**Tabela 4.5**). Foi possível observar que a região que apresenta os maiores valores de Q/s localiza-se na porção central do município, com valores médios entre 50 e 80 m³/h/m (tons claros), com picos de valores acima de 120 e 140 m³/h/m (tons escuros), localizados próximos dos poços do Sistema Mucuri (PTs 01, 09 e 13).



Tabela 4.5 Valores de Q/s dos poços ensaiados.

Poço	Vazão Específica Média (Q/sw - m ³ /h/m)	Poço	Vazão Específica Média (Q/sw - m ³ /h/m)
PT-01	143,13	PT-48	54,25
PT-07	15,43	PT-51	5,75
PT-08	25,54	PT-52	9,26
PT-09	360,59	PT-56	32,76
PT-12	60,00	PT-57	0,18
PT-13	128,77	PT-63	8,53
PT-14	16,31	PT-64	7,22*
PT-15	25,25	PT-66	7,02
PT-18	81,44	PT-67	2,63*
PT-19	42,38*	PT-71	35,77
PT-20	88,89*	PT-73	0,46
PT-22	2,87	PT-74	142,87
PT-24	73,79	PT-75	11,93*
PT-25	17,92	PT-77	3,56
PT-28	12,77	PT-78	0,14
PT-29	49,01	PT-81	0,14
PT-30	113,79	PT-82	0,12
PT-36	30,46	PT-84	2,48
PT-39	3,67	PT-85	0,06
PT-40	1,16	PT-86	0,19
PT-41	11,94	PT-89	0,14
PT-43	101,25	PT-90	1,59
PT-44	46,9	PT-92	12,5*
PT-45	0,21	PT-93	7,1*
PT-46	8,99	PT-99	3,87
PT-47	20,23		

* Dados retirados de testes de bombeamento das empresas AguaCenter e Hidropoços.



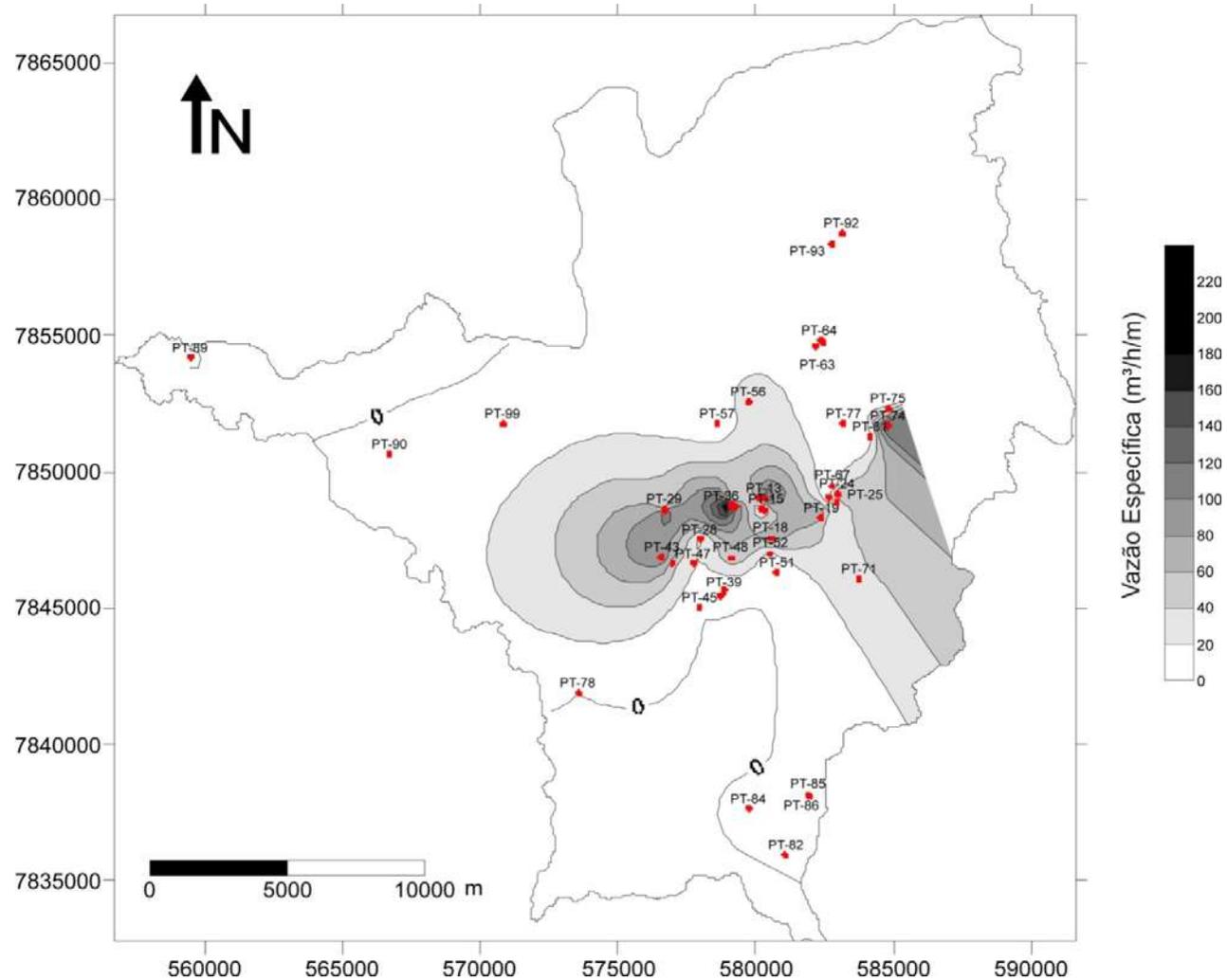


Figura 4.3 Mapa de vazões específicas (Q/s) de Sete Lagoas. -



Teste de Aquífero

Para a determinação dos parâmetros hidrogeológicos (coeficiente de armazenamento – S, e transmissividade – T) dos aquíferos localizados em Sete Lagoas, foram realizados 09 testes de aquífero. Os ensaios consistiram no bombeamento do poço mantendo sua vazão constante “Q”, e o acompanhamento da evolução dos rebaixamentos produzidos em um (ou mais de um) poço de observação situado a uma distância “r” qualquer desse poço bombeado. Todos os ensaios de aquífero tiveram 48 horas de duração. A **Figura 4.4** apresenta o mapa de localização dos poços bombeados e seus respectivos poços de observação, enquanto que a **Tabela 4.6** mostra as informações sobre os testes de aquífero.

Para a interpretação dos testes de aquífero, foram utilizadas duas metodologias básicas para interpretação dos testes de aquífero: Theis (1935) e Cooper & Jacob (1946). A escolha desses métodos foi feita, dada a inexistência de testes de aquíferos específicos para terrenos cársticos, e admitindo-se que tais resultados permitiriam comparar os valores obtidos em diferentes partes do município, desde que se reconhecessem as limitações desse procedimento. Desta forma, quando o comportamento da curva de rebaixamento do nível dinâmico *versus* tempo de bombeamento apresentou feição compatível com as curvas teóricas das metodologias adotadas.



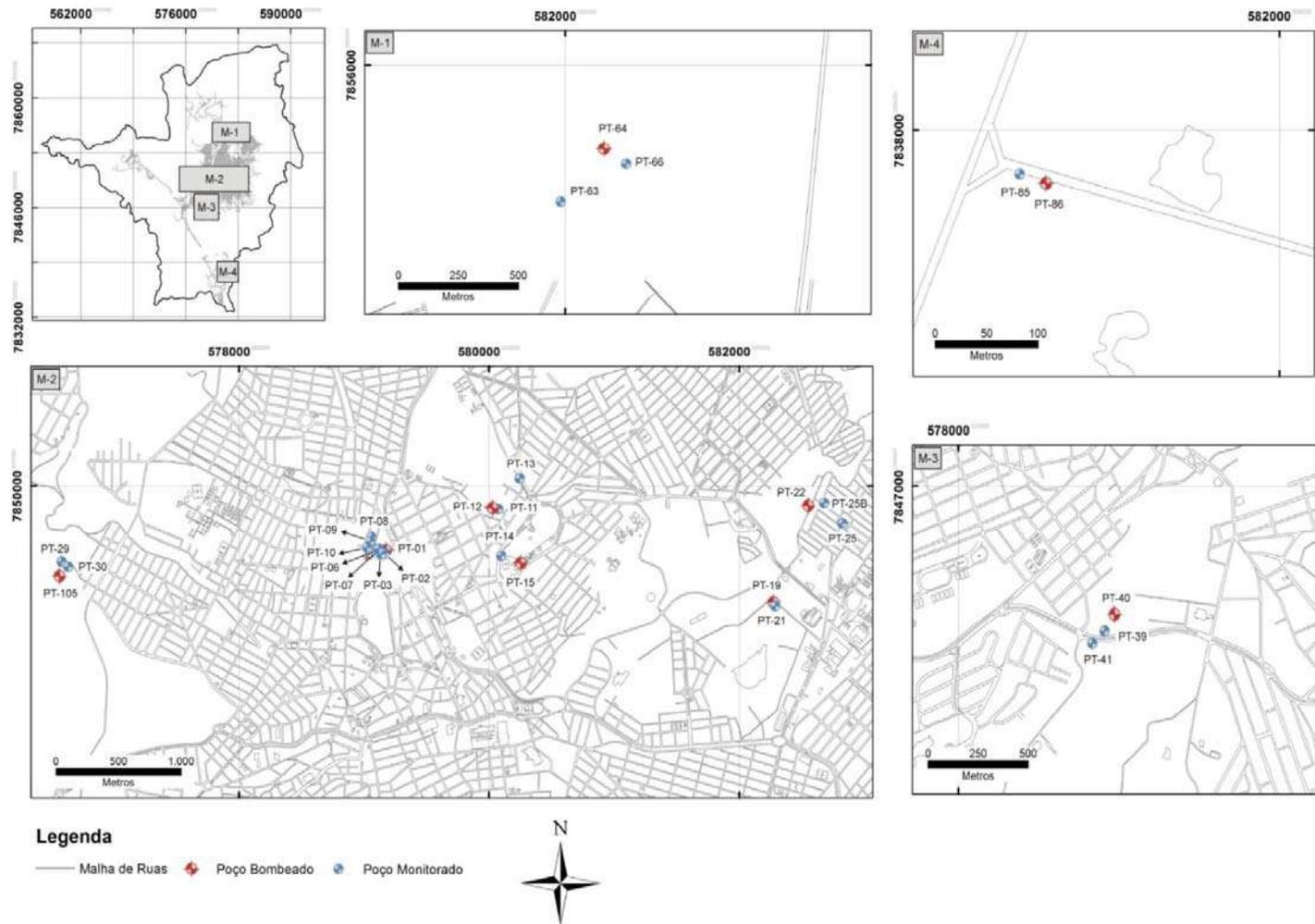


Figura 4.4 Localização dos poços bombeados e seus respectivos poços de observação.



Tabela 4.6 Dados sobre os testes de aquífero.

Tipo Aquífero	Poço Bombeado	Nível Estático (m)	Duração Teste (min)	Vazão Q (m ³ /h)	Poço Observação	Distâncias Poço Bombeado (m)	Nível Estático Poço Observado (m)
Cárstico	PT-01	55,565	3030	128	PT-02	25	57,725
					PT-03	51	57,31
					PT-06	72	57,63
					PT-07	60	58,013
					PT-08	155	58,63
					PT-09	145	58,69
					PT-10	153	57,775
Cárstico	PT-12	57,39	3060	96,2	PT-11	70	57,02
					PT-13	280	63,823
Cárstico	PT-15	49,67	3210	40,4	PT-14	200	55,481
Cárstico	PT-19	9,9	3210	128,2	PT-21	72	9,744
Cárstico	PT-22	12,079	3030	92,2	PT-25	420	17,745
					PT-25B	75	9,36
Cárstico	PT-40	0,76	3000	61,5	PT-39	175	2,14
					PT-41	230	2,524
Cárstico	PT-64	22,45	3060	194	PT-63	310	29,114
					PT-66	70	18,75
Fraturado	PT-86	10,13	3210	4,6	PT-85	57	11,74
Cárstico	PT-105	29,72	3210	47	PT-29	28,3	31,661
					PT-30	31,85	29,115

De acordo com os resultados dos 09 testes de aquífero, foi possível estimar os parâmetros hidráulicos coeficiente de armazenamento (S), transmissividade (T) e condutividade hidráulica (K) para os aquíferos cárstico e fissural. Os dados hidrogeológicos pertinentes à Formação Serra de Santa Helena foram obtidos de Lima (1980 *apud* Pessoa, 1996), e representam condições hidrogeológicas equivalentes, em áreas correlatas, nos municípios de Funilândia e Paraopeba, ambos no Estado de Minas Gerais.

Os resultados dos parâmetros hidráulicos são mostrados na **Tabela 4.7**, enquanto que os seus respectivos gráficos e tabelas dos testes podem ser encontrados no **Anexo III**.

Com relação à transmissividade (T), Heath (1982) a definiu como “a capacidade de um aquífero de transmitir água horizontalmente, por unidade de largura e espessura saturada do aquífero sob um gradiente hidráulico unitário”. De acordo com os ensaios de bombeamento, os resultados de T indicaram diferenças consideráveis entre os aquíferos



cristalino e cárstico. O primeiro apresentou valores de transmissividade baixas, com ordem de grandeza de $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (ou $0,1 \text{ m}^2/\text{h}$), típico de rochas cristalinas, enquanto que o segundo apresentou valores de T com grandezas entre 10^{-2} (aproximadamente $155 \text{ m}^2/\text{h}$) e $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (cerca de $07 \text{ m}^2/\text{h}$). A **Figura 4.5** apresenta o mapa de transmissividade para a região estudada, sendo esse confeccionado a partir de dados dos testes de aquíferos e de produção de 24 horas, bem como de dados de testes de vazão já realizados por outras empresas e calculadas para o âmbito desse projeto.

O conceito de coeficiente de armazenamento (S) se baseia nas forças de pressão que agem sobre o aquífero. Em aquíferos confinados, é definido como volume de água liberado por um prisma de seção unitária e altura igual à espessura de aquífero, sob o efeito de uma variação unitária do nível potenciométrico, sendo que o seu valor varia na faixa de 10^{-5} a 10^{-3} (adimensional), aproximadamente (FEITOSA *et al.*, 2008). A respeito dos resultados encontrados nos testes, todas as ordens de grandeza, com exceção do resultado do PT-29, para o método de Theis ($S=10^{-2}$), apresentaram valores que apontaram um comportamento de confinamento nos aquíferos ($S=10^{-3}$, 10^{-4} e 10^{-5}). No caso do PT-29, o resultado encontrado pode indicar um comportamento de aquífero não confinado (ou livre), o que seria mais coerente, visto que o poço localiza-se na base da serra de Santa Helena, região considerada neste estudo como uma das áreas de possível recarga do aquífero. Após isso, baseando-se no conceito de aquífero confinado como uma formação geológica permeável que armazena e transmite água, sendo que a pressão da água em seu topo é maior do que a pressão atmosférica (FEITOSA *et al.* 2008) e que, devido a isso, o nível potenciométrico está teoricamente acima do topo do aquífero, foram consultados os dados das profundidades das primeiras ocorrências dos aquíferos estudados e seus respectivos níveis estáticos nos perfis litoconstrutivos dos poços. Essas análises mostraram relação entre os resultados encontrados nos testes de aquífero e nos dados analisados nesses perfis, onde os níveis de água estavam acima do topo do aquífero, comprovando assim, a condição de confinamento.

Analisando a **Tabela 4.7**, observou-se que os rebaixamentos máximos aumentam à medida que as transmissividades diminuem, enquanto que o mesmo comportamento foi notado com relação aos coeficientes de armazenamento. A transmissividade parece exercer uma influência mais significativa nos valores de rebaixamento do que o coeficiente de armazenamento. Outra relação foi a de que transmissividades maiores, em aquíferos confinados, indicam valores menores de rebaixamento (FEITOSA *et al.* 2008), sendo que o raio de influência do cone de rebaixamento (r), que é a distância limite do cone de



rebaixamento, aumenta de acordo com o aumento das transmissividades, já que o T é diretamente proporcional ao raio de influência, conforme a equação:

$$r = 1,5\sqrt{\frac{T.t}{S}}$$

Onde, r = raio de influência ou limite do cone de rebaixamento; T = transmissividade; t = tempo de bombeamento; e S = coeficiente de armazenamento.

Sobre a condutividade hidráulica (K), essa é estimada pela razão entre a transmissividade (T) e a espessura do aquífero. Tendo isso em mente, e os dados estimados para os litotipos encontrados em Sete Lagoas, os valores de K médio para os calcários apresentaram valores de grandeza da ordem de 10^{-4} m/s (cerca de 10^{-2} cm/h), apresentando similaridade com os valores de K para os calcários carstificados (SANDERS, 1998). Para os litotipos da Formação Serra de Santa Helena, nos municípios vizinhos, apresentaram valores de grandeza iguais a 10^{-6} m/s (10^{-4} cm/h). Com relação às rochas do embasamento (que caracterizam o arcabouço litológico), devido a impossibilidade de dados consistentes sobre a sua espessura, não foi possível o cálculo das condutividades hidráulicas.



Tabela 4.7 Resultados dos parâmetros hidráulicos.

Litotipos	Poço Bombeado	Nível Dinâmico Máximo (m)	Poço Observação	Transmissividade				Coeficiente de Armazenamento		Condutividade Hidráulica				
				T = m ² /s	T = m ² /h	T = m ² /s	T = m ² /h	S = adimensional		K = m/s	K = m/h	K = m/s	K = m/h	Espessura Aquífero (m)
				Theis		Cooper & Jacob		Theis	Cooper & Jacob	Theis		Cooper & Jacob		
Formação Sete Lagoas	PT-01	0,16	PT-02	Inválido	Inválido	Inválido	Inválido	Inválido	Inválido	Inválido	Inválido	Inválido	50	
			PT-03											
			PT-06											
			PT-07											
			PT-08											
			PT-09											
	PT-12	0,37	PT-11	Inválido	Inválido	Inválido	Inválido	Inválido	Inválido	Inválido	Inválido	Inválido	50	
			PT-13											
	PT-15	2,81	PT-14	2,00x10 ⁻³	7,21	Inválido		Inválido		4,00x10 ⁻⁵	1,44x10 ⁻¹	Inválido		50
	PT-19	4,31	PT-21	1,18x10 ⁻²	42,48	1,08x10 ⁻²	38,88	2,95x10 ⁻⁵	3,11x10 ⁻⁵	2,36x10 ⁻⁴	8,49x10 ⁻¹	2,15x10 ⁻⁴	7,77x10 ⁻¹	50
	PT-22	8,54	PT-25	Inválido		Inválido		Inválido		Inválido		Inválido		50
			PT-25B	5,09x10 ⁻³	18,32	2,51x10 ⁻²	9,04	4,56x10 ⁻⁴	3,51x10 ⁻³	8,51x10 ⁻⁵	3,05x10 ⁻¹	4,18x10 ⁻⁴	1,51x10 ⁻¹	60
PT-40	2,43	PT-39	1,04x10 ⁻²	37,44	1,13x10 ⁻²	40,68	1,97x10 ⁻⁴	5,79x10 ⁻⁵	2,61x10 ⁻⁴	9,36x10 ⁻¹	2,83x10 ⁻⁴	1,017	40	
		PT-41	1,09x10 ⁻²	39,24	1,18x10 ⁻²	42,48	2,41x10 ⁻⁴	5,87x10 ⁻⁵	2,73x10 ⁻⁴	9,81x10 ⁻¹	2,95x10 ⁻⁵	1,062	40	
PT-64	6,42	PT-63	7,14x10 ⁻³	25,71	6,31x10 ⁻³	22,72	5,35x10 ⁻⁵	1,59x10 ⁻⁵	1,02x10 ⁻⁴	3,67x10 ⁻¹	9,00x10 ⁻⁵	3,24x10 ⁻¹	70	
		PT-66	7,26x10 ⁻³	26,14	7,86x10 ⁻³	28,29	3,91x10 ⁻³	1,29x10 ⁻³	1,04x10 ⁻⁴	3,73x10 ⁻¹	1,12x10 ⁻⁴	4,04x10 ⁻¹	70	
PT-105	0,35	PT-29	3,71x10 ⁻²	133,56	3,67x10 ⁻²	132,12	1,33x10 ⁻²	7,43x10 ⁻³	1,86x10 ⁻⁴	6,67x10 ⁻¹	1,84x10 ⁻⁴	6,60x10 ⁻¹	200	
		PT-30	4,32x10 ⁻²	155,52	3,98x10 ⁻²	143,28	6,13x10 ⁻³	5,45x10 ⁻³	2,16x10 ⁻⁴	7,77x10 ⁻¹	1,99x10 ⁻⁴	7,16x10 ⁻¹	200	
Complexo Belo Horizonte	PT-86	34	PT-85	3,17x10 ⁻⁵	0,114	7,11x10 ⁻⁵	0,256	6,57x10 ⁻⁵	3,63x10 ⁻⁵	-	-	-	-	-
Formação Serra de Santa Helena*	Municípios			T = m ² /s		T = m ² /h		S = adimensional		k = m/s		k = m/h		
	Funilândia*			1,19x10 ⁻⁴		4,91x10 ⁻¹		-		2,97x10 ⁻⁶		1,07x10 ⁻²		
	Paraopeba*			1,01x10 ⁻⁴		3,64x10 ⁻¹		-		2,52x10 ⁻⁶		9,08x10 ⁻³		

* Dados obtidos de Lima (1980 *apud* Pessoa, 1996), em regiões correlatas - Funilândia e Paraopeba; - sem dados.



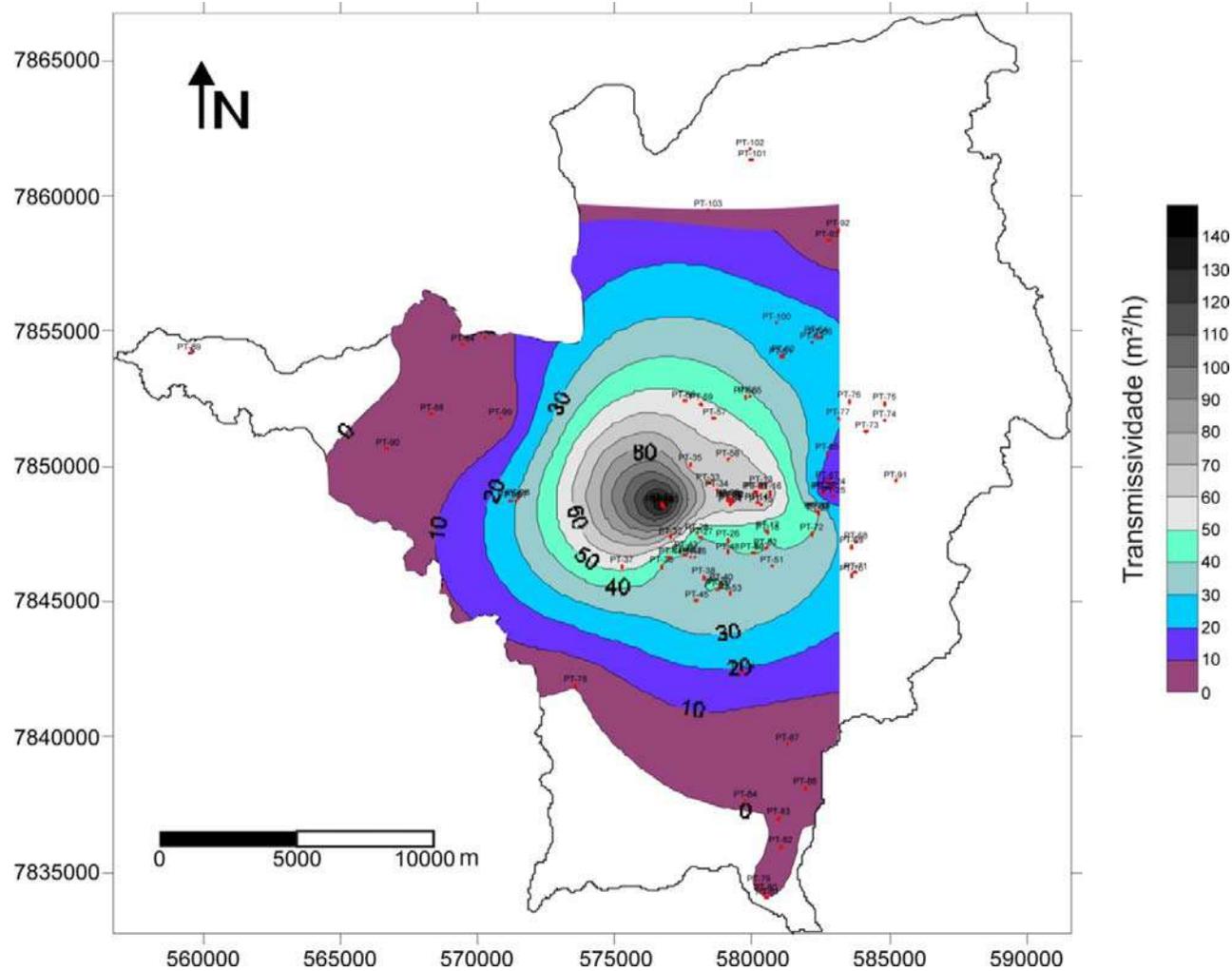


Figura 4.5 Transmissividade para a região estudada.



4.2 CADASTRO DE POÇOS DO SAAE

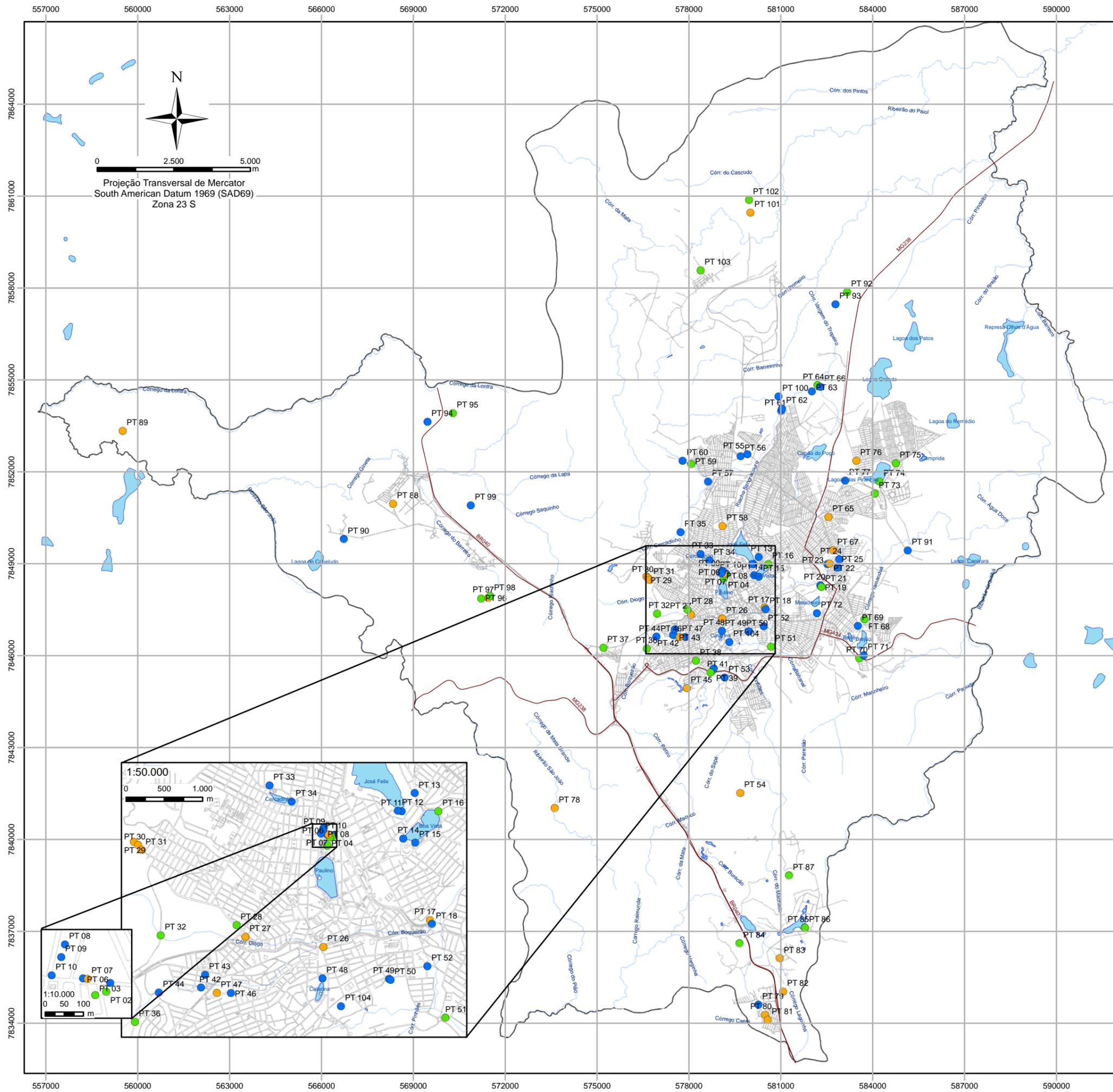
As atividades descritas anteriormente, relativas ao levantamento de informações, adequações e ensaios hidráulicos dos poços, permitiram consistir um banco de dados atualizados e padronizados sobre os poços do SAAE. Esse banco de dados está digitalizado em formato Excel, compilando todas as informações em um único local e foi disponibilizado ao SAAE em documento eletrônico editável que poderá ser continuamente atualizado.

Os dados cadastrais e técnicos dos poços também estão organizados individualmente para cada poço. Neste caso, foi elaborado um formulário, denominado “ficha de poço”, apresentando conteúdo compatível com os requisitos solicitados no processo de outorga de uso das águas. As fichas de todos os poços do SAAE cadastrados neste estudo estão apresentadas no **Anexo IV** deste relatório final e os arquivos digitais editáveis foram disponibilizados ao SAAE.

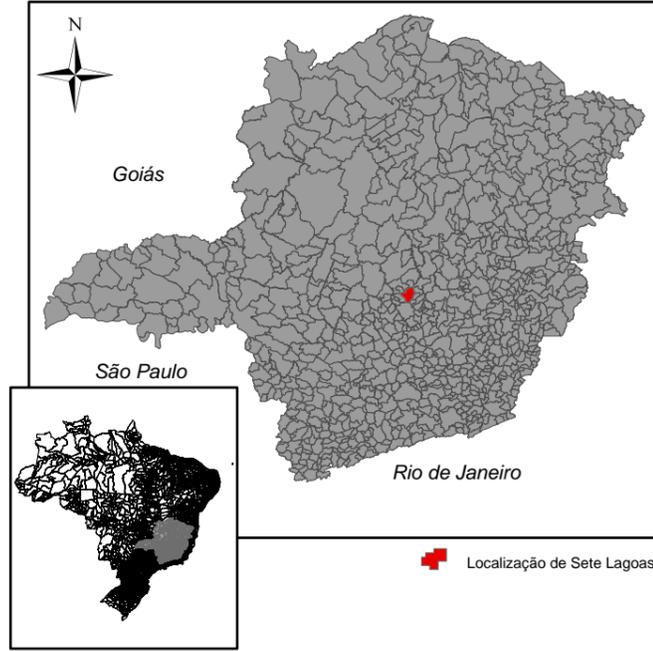
O cadastro de poços do SAAE compilou informações de 105 poços tubulares de produção de água utilizados no abastecimento público de Sete Lagoas, correspondente ao elenco de poços em operação no ano de 2011, momento em que foram realizados os levantamentos e atividades de campo, conforme já demonstrado na **Figura 4.1**.

Ressalta-se que os dados de perfis litológico dos poços do SAAE foram utilizados para o reconhecimento e revisão da geologia, sobretudo de subsuperfície, conforme será demonstrado no capítulo específico. Os dados dos poços foram utilizados para a construção de seções geológicas, bem como para o reconhecimento das litologias aflorantes. A localização dos poços que possuem perfis litológicos e/ou construtivos está demonstrada na **Figura 4.6**.

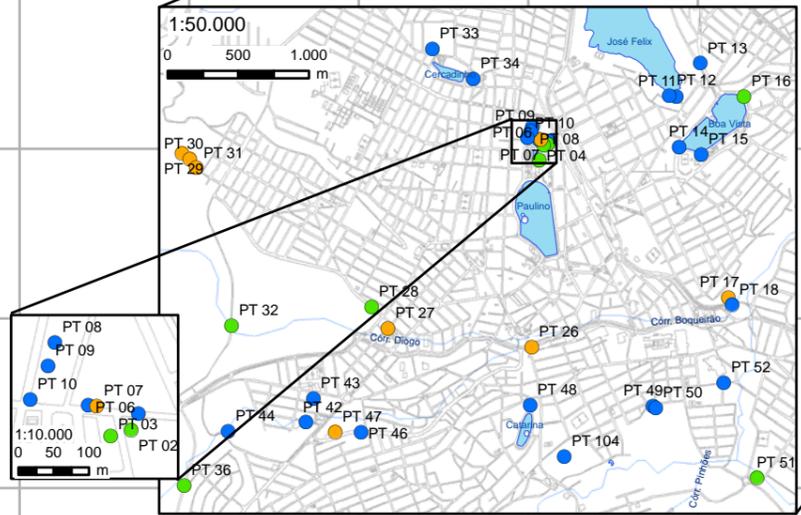




Projeção Transversal de Mercator
South American Datum 1969 (SAD69)
Zona 23 S



- Legenda**
- Poços do SAAE**
- Perfil Construtivo e Litológico
 - Perfil Construtivo
 - Sem Perfil
- Lagoas
- Rodovias
- Malha de Ruas
- Drenagem
- Limite Municipal



Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas e SAAE

CONTRATANTE:	 Serviço Autônomo de Água e Esgoto	
PROJETO:	ESTUDO HIDROGEOLÓGICO	
TÍTULO:	Figura 4.6 Localização dos Poços do SAAE com perfil construtivo e/ou litológico	
ELABORADO:	Daniela Barbati Osório	
CONTRATO:	3988	 AMBIENTAL & ENGENHARIA
ESCALA:	1:125.000	
DATA:	DEZ/2013	

A distribuição e o número de poços do SAAE no município é bastante abrangente, sendo que os dados obtidos sobre os poços contribuíram significativamente para o reconhecimento da geologia, hidrogeologia e parâmetros hidráulicos dos aquíferos.

Além servirem como fonte de dados técnicos, os arquivos do cadastro de poços do SAAE permitem interface com o SIG e, dessa maneira, podem ser utilizados como ferramenta operacional e gerencial do SAAE sobre suas fontes de captação de água para o abastecimento público. As fichas de poços, por exemplo, são arquivos em hiperlinks no SIG e, assim, todos os dados de qualquer poço, incluindo a figura esquemática do perfil litológico e construtivo do poço, podem ser visualizados no sistema. O banco de dados compilado permite a elaboração de mapas específicos com o uso do SIG e, no futuro, o SAAE poderá integrar outros tipos de informações georreferenciadas, podendo, inclusive, automatizar suas operações de captação e distribuição de água com a ferramenta SIG, como ocorre nas empresas de saneamento de países desenvolvidos.

No âmbito deste estudo, foi realizado um treinamento de 20 horas a um grupo de funcionários do SAAE sobre fundamentos de hidrogeologia e noções básicas de operação do software ArcView, demonstrando o uso e algumas aplicações do SIG nas atividades relacionadas aos poços.

4.3 CADASTRO DE POÇOS DO MUNICÍPIO DE SETE LAGOAS

A avaliação sobre a quantidade de água subterrânea na área de estudo deve considerar os volumes atualmente captados do aquífero pelos poços em operação no município. Desse modo, para dar suporte ao estudo, foi realizado o levantamento de informações para constituir um banco dados dos poços produtores de água em Sete Lagoas.

O ponto de partida do banco de dados foi a relação de 105 poços do SAAE e, a partir desses, foi efetuada a complementação com dados de poços particulares, por vezes denominados, coloquialmente, de “Terceiros”.

A base de dados do Sistema Integrado de Informação Ambiental - SIAM forneceu dados sobre 544 poços tubulares. O Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS exibiu o cadastro de 221 poços no município de Sete Lagoas. O SAAE forneceu uma lista de 103 poços privados. O cadastro de poços de Sete Lagoas foi elaborado apenas em formato



digital georreferenciado com armazenamento dos registros em planilha *Excel*. O conteúdo digital editável foi entregue ao SAAE e, neste relatório, são apresentados cartografias e interpretações produzidas com os dados do cadastro.

Os dados originalmente recebidos pela equipe técnica da Servmar foram compilados sistematicamente em um único banco de dados, sendo realizadas análise e depuração dos dados, visando eliminar duplicidade de informações e possíveis contradições entre as diferentes fontes de dados. Em consequência, dos 973 registros de poços levantados, aproximadamente 400 dados sobre poços se apresentaram duplicados. Desta forma, o cadastro de poços de Sete Lagoas está consistido com um total de 545, sendo 440 particulares e 105 de abastecimento público do SAAE. A **Figura 4.7** expõe a distribuição das fontes de dados dos poços contidos em Sete Lagoas.

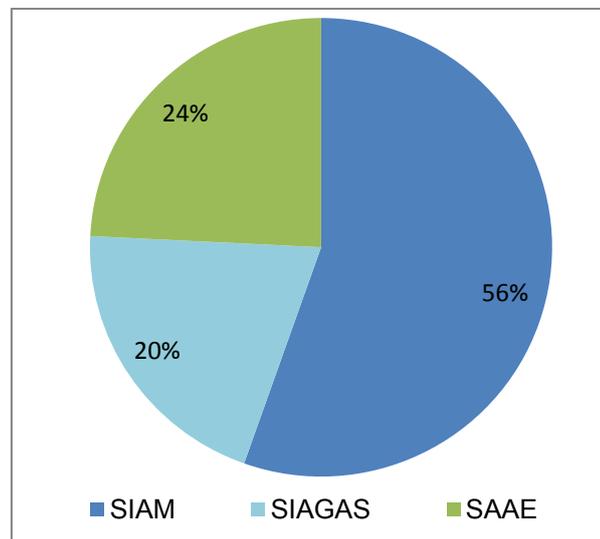


Figura 4.7 Fontes de dados do cadastro de poços de Sete Lagoas

O cadastro de poços compila dados de cadastramento dos poços, números de processos de outorgas, dados técnicos operacionais, registros sobre geologia e hidrogeologia. Essas informações contribuíram com a compreensão acerca da geologia e hidrogeologia da área de estudo.

Os registros do cadastro permitiram caracterizar os usos da água subterrânea em Sete Lagoas, agrupadas nas seguintes tipificações de uso/finalidade:

- Consumo Humano - Abastecimento Público;



- Consumo Humano – Doméstico e Comercial;
- Consumo Humano - Dessedentação Animal;
- Consumo Humano – Irrigação;
- Consumo Humano – Industrial;
- Dessedentação Animal;
- Irrigação;
- Processo Industrial;
- Outros Usos; e
- Desconhecido

A finalidade para o consumo humano ocorre em 61% dos poços que pode também ter usos múltiplos em setores de abastecimento público, doméstico, comercial, industrial e agrícola (dessedentação animal e irrigação). A classe de uso doméstico e comercial é a mais abundante com 23% dos poços do cadastro, seguida pela classe de uso de abastecimento público (20%) e industrial (20%). As **Figuras 4.8 e 4.9** apresentam, respectivamente, o gráfico e o mapa de distribuição do uso da água subterrânea.

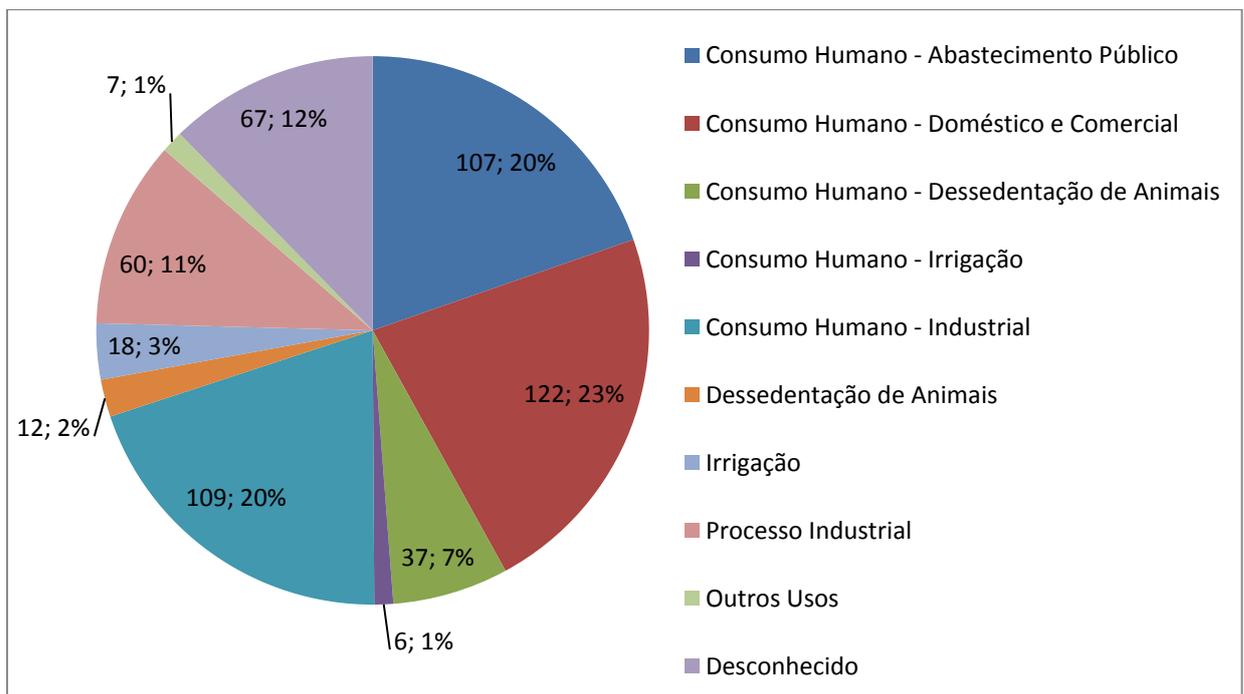
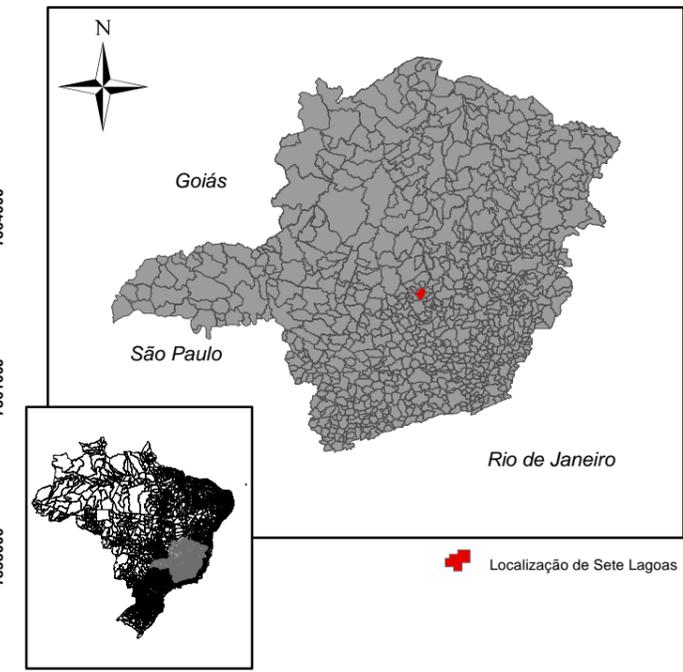
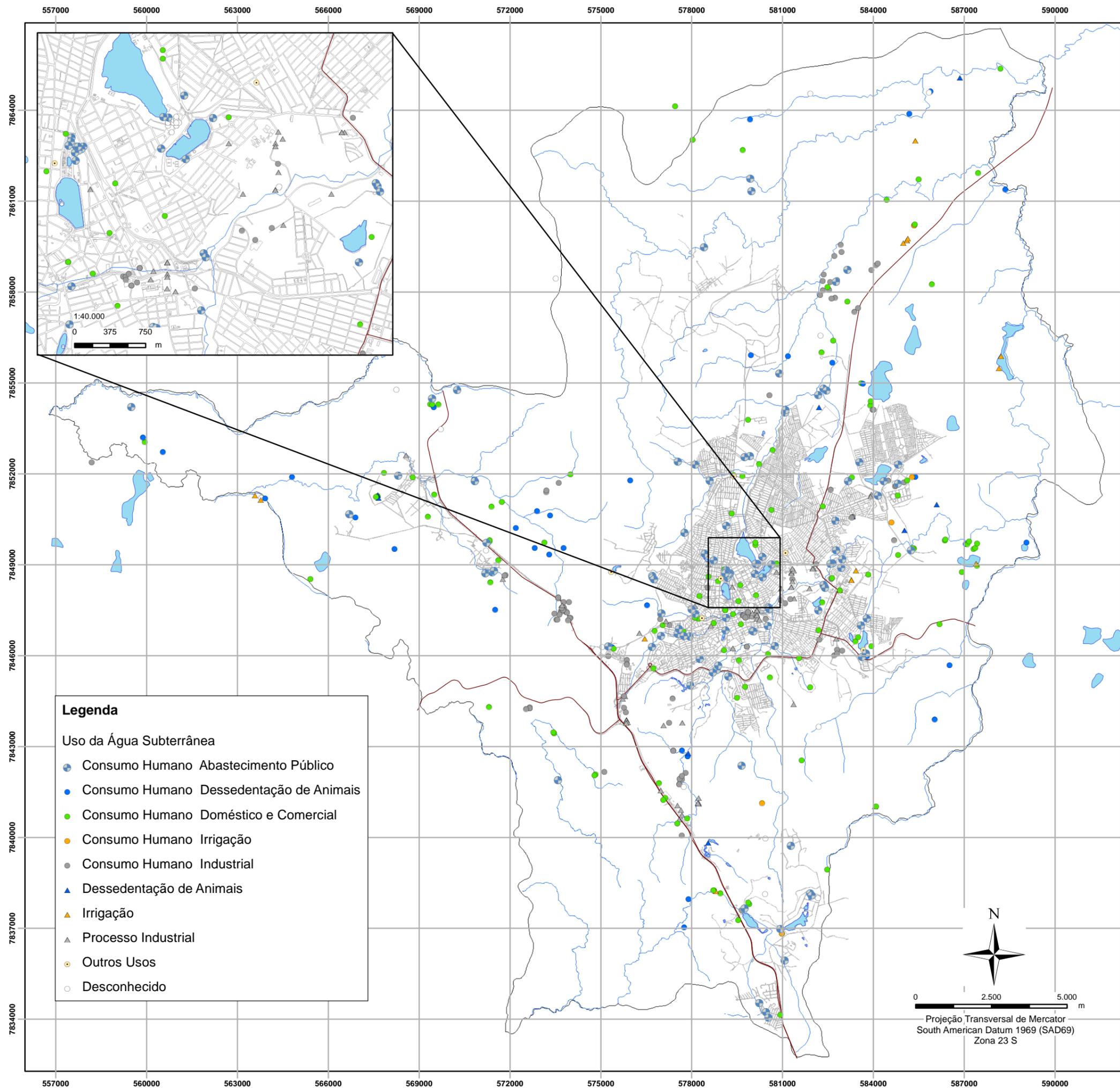


Figura 4.8 Gráfico de distribuição do uso da água subterrânea





Legenda

- Lagoas
- Rodovias
- Malha de Ruas
- Drenagem
- Limite Municipal

Legenda

- Uso da Água Subterrânea**
- Consumo Humano Abastecimento Público
 - Consumo Humano Dessedentação de Animais
 - Consumo Humano Doméstico e Comercial
 - Consumo Humano Irrigação
 - Consumo Humano Industrial
 - Dessedentação de Animais
 - Irrigação
 - Processo Industrial
 - Outros Usos
 - Desconhecido

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas, SIAGAS e IGAM

CONTRATANTE:		 Serviço Autônomo de Água e Esgoto
PROJETO:		
TÍTULO:		Figura 4.9. Uso da Água Subterrânea
ELABORADO: Daniela Barbatí Osório		
CONTRATO:	3988	 AMBIENTAL & ENGENHARIA
ESCALA:	1:125.000	
DATA:	DEZ/2013	

Na análise à **Figura 4.8**, ressaltam-se dois aspectos importantes: i) não há detalhamento acerca do uso em 12% dos poços do cadastro; e ii) os poços de abastecimento público correspondem apenas a 20% dos poços do cadastro.

De acordo com os fundamentos da Política Estadual de Recursos Hídricos (Lei 13.199/1999), no Artigo 3º, estabelece-se que seja observado o direito de acesso de todos aos recursos hídricos, com prioridade para o abastecimento público e a manutenção dos ecossistemas. Nota-se pelo cadastro de poços de Sete Lagoas que existe uma forte competição dos usos privados, em relação ao uso para o abastecimento público, conforme demonstrado acima.

Nos registros obtidos do cadastro do SIAM, correspondente a uma atualização dos processos de outorga de outubro/2013, apenas 161 poços possuem outorga deferida e válida, ou seja, 30% dos poços de Sete Lagoas estão em conformidade com a legislação vigente (**Figura 4.10**). Desse montante, 47 poços outorgados são do SAAE, ou seja, do total de poços para abastecimento público, 45% estão outorgados, enquanto, apenas 25% dos poços particulares possuem outorga de uso das águas.

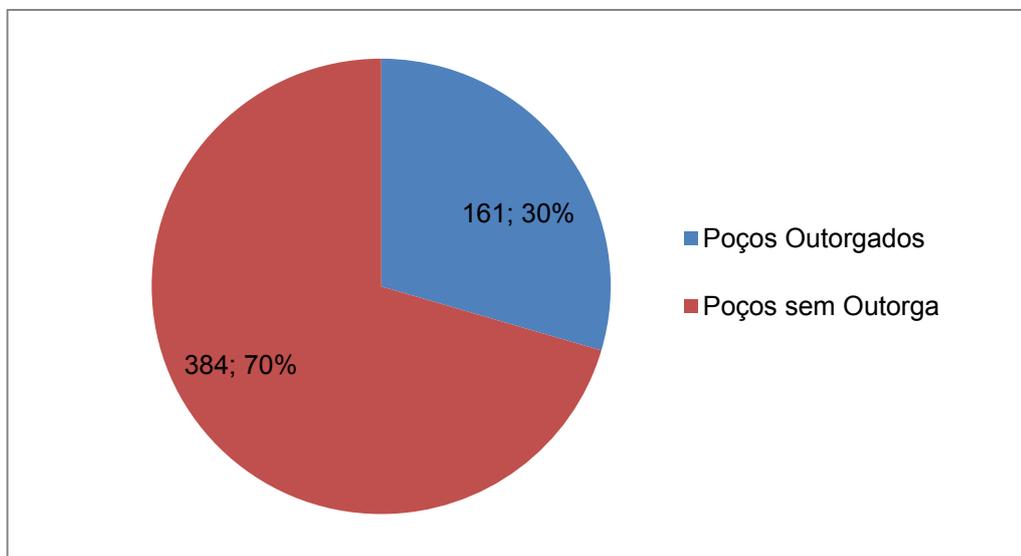


Figura 4.10 Situação da outorga dos poços no município de Sete Lagoas.



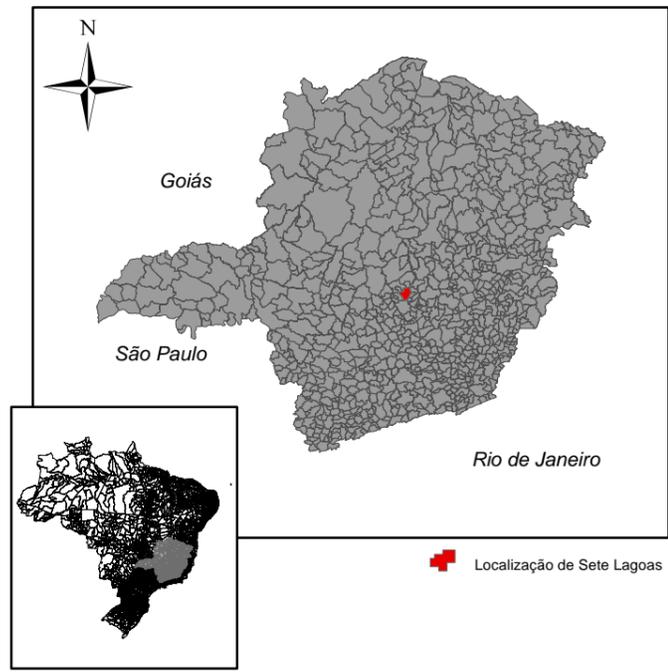
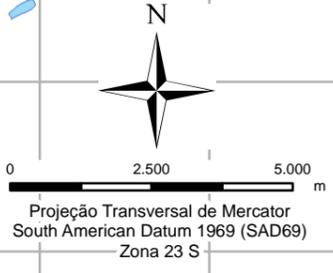
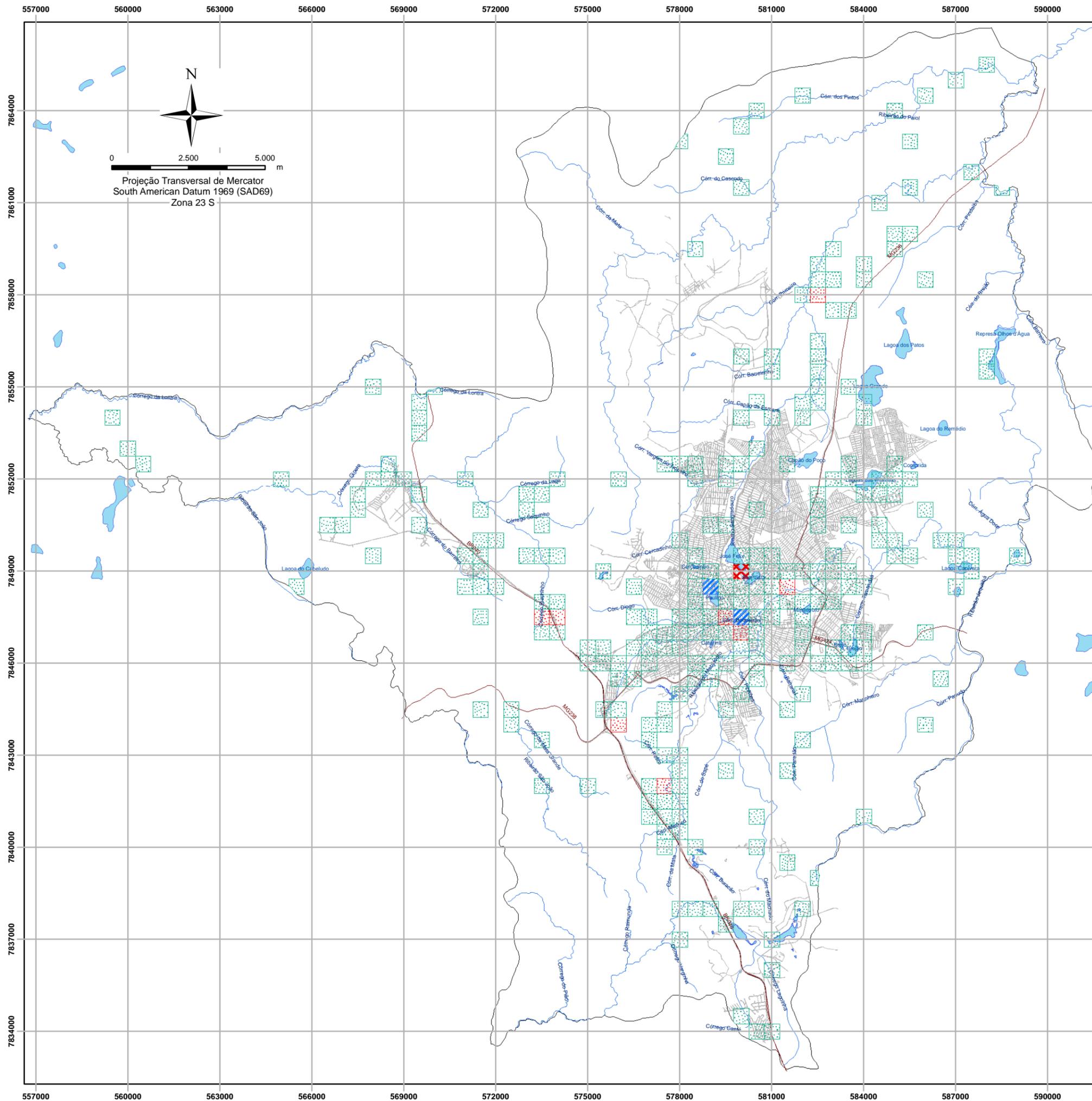
Deve-se registrar que, do total de poços classificados como não-outorgados (384 poços), existem aproximadamente 280 poços que estão em diversas fases do processo de outorga, por exemplo, em análise técnica, aguardando informações complementares, em espera da análise técnica, entre outros estágios. Ainda que estejam em situação irregular perante a lei, se estiverem em operação, estão em curso com o processo de regularização. A partir do momento que este universo de poços estiver outorgado, o índice de regularização em Sete Lagoas estará entre os maiores no país. Estudos de cadastramento de poços realizados por órgãos gestores de diversos Estados brasileiros têm encontrado normalmente índices de outorga inferiores a 30% do total de poços existentes.

A distribuição de poços no território do município pode ser visualizada na **Figura 4.11** que apresenta a densidade de poços por quadrículas de 500 x 500 m. Desta forma, foi possível avaliar que as áreas com as maiores densidade de poços distribuem-se, preferencialmente, na porção central do município e ao longo da rodovia BR-040 (zona industrial). Na porção norte de Sete Lagoas, a densidade de poços é em decorrência da concentração de indústria com elevado uso de água nos processos produtivos.

A densidade máxima encontrada foi de 18 poços por quadrícula, situada na região central da cidade, onde também ocorrem outras cinco quadrículas com densidade de poços variando de 5 a 13 poços, evidenciando ser a região com a maior ocorrência de poços.

O adensamento de poços em determinadas regiões sugere que a retirada de água do aquífero também não ocorrer homoganeamente distribuída nos aquíferos, levando à discussão que podem existir áreas em condição de intenso uso da água, enquanto em outras, toda a potencialidade do aquífero está disponível. Essa análise será detalhadamente apresentada na avaliação hidrogeológica adiante, pela discussão acerca das potencialidades e reservas explotáveis dos aquíferos em Sete Lagoas.





Legenda
Concentração de poços por quadrícula

- 0
- 1 - 4
- 5 - 8
- 9 - 12
- 13 - 18
- Lagoas
- Rodovias
- Malha de Ruas
- Drenagem
- Limite Municipal

Nota: Área da quadrícula unitária corresponde a 500 x 500 metros (0.25 km²)

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas, SIAGAS e IGAM

CONTRATANTE:		 SAAE Serviço Autônomo de Água e Esgoto
PROJETO:		
TÍTULO:		ESTUDO HIDROGEOLÓGICO
ELABORADO:		Daniela Barbatí Osório
CONTRATO:	3988	 Servmar AMBIENTAL & ENGENHARIA
ESCALA:	1:125.000	
DATA:	DEZ/2013	

5 HIDROGEOQUÍMICA

O estudo sobre a hidrogeoquímica das águas subterrâneas foi baseado principalmente nos resultados analíticos das amostras coletadas em campo e na geologia da área de estudo. Os principais objetivos deste capítulo foram identificar as características naturais das águas subterrâneas, associar com os tipos litológicos e verificar a possível ocorrência de contaminação do aquífero.

Das 56 amostras de água coletadas para análise química, 50 são representativas do aquífero cárstico. Quando possível, são destacadas características do aquífero cristalino, entretanto, apenas de maneira indicativa, pois o número de amostras é muito pouco representativo. Vale ressaltar que todas as 56 análises químicas foram amostradas a partir de poços tubulares em produção.

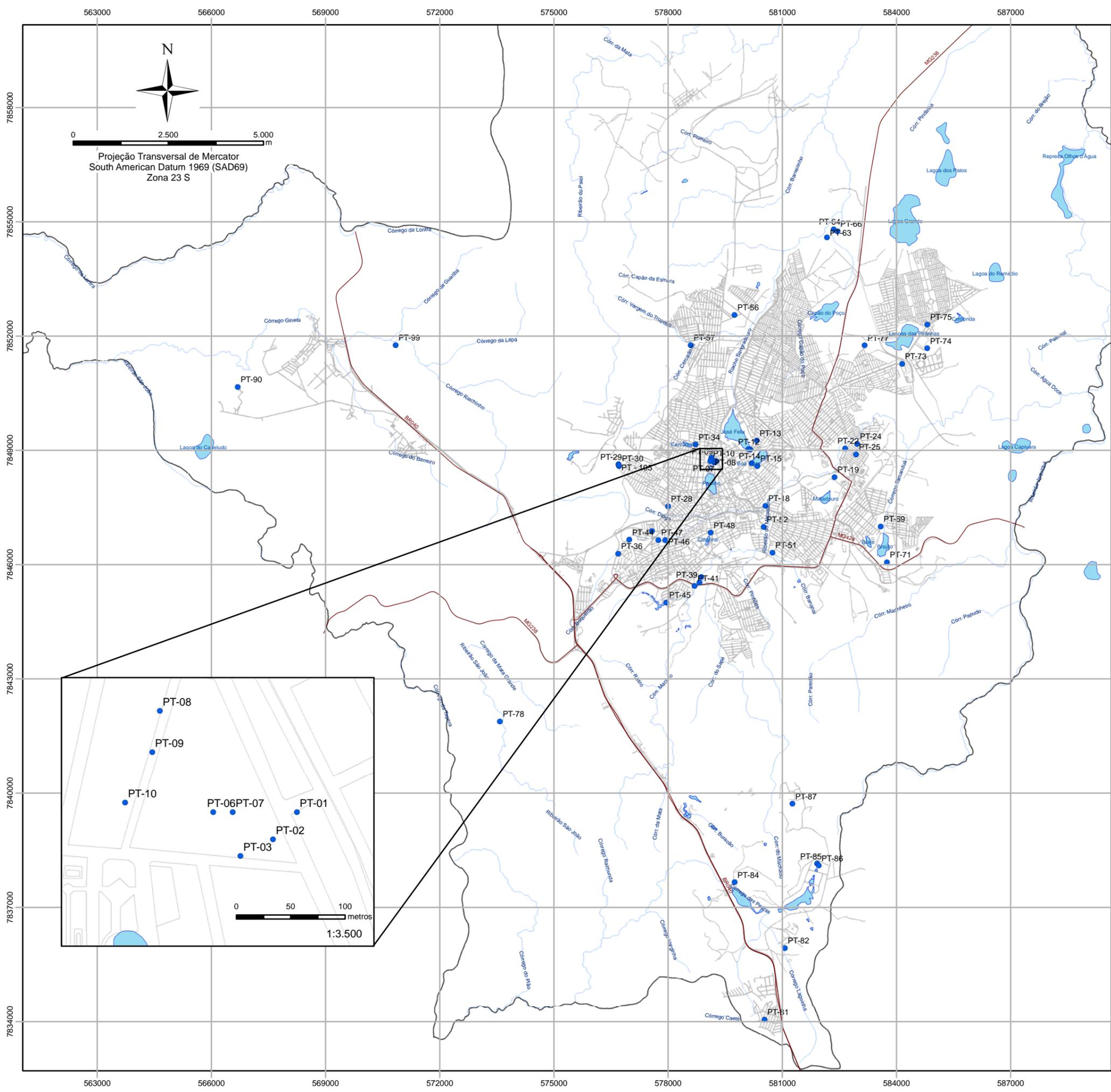
5.1 COLETA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A campanha de amostragem dos poços foi realizada no período de 18.08.2011 a 25.04.2012 e abrangeu 56 poços tubulares do SAAE (**Figura 5.1**). Momentos prévios ao final de cada teste de produção, do tipo escalonado, as águas foram coletadas e enviadas para o laboratório Analytical Solutions, acreditado pelo INMETRO. Para garantir a representatividade das amostras, o momento mais adequado para a coleta foi os minutos finais da quarta e última etapa dos testes escalonados, devido a estabilização dos níveis dinâmicos e dos parâmetros físico-químicos (condutividade elétrica, pH, potencial de oxirredução, temperatura e Eh). Para as leituras desses parâmetros, foi utilizado o medidor multiparâmetros (HANNA HI 9828 – **Foto 5.1**) (**Tabela 5.1**).

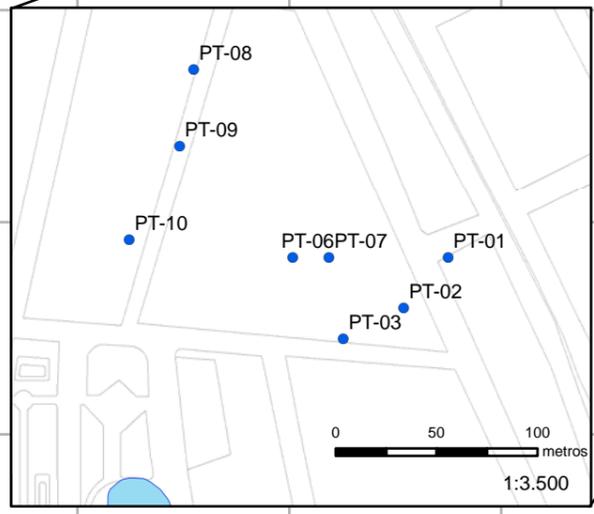
Tabela 5.1 Parâmetros analisados.

Alcalinidade	Ânions	Cátions	Coliformes	Série Nitrogenada	Sólidos
Alcalinidade a Fenoltaleína	Bicarbonatos	Cálcio	Coliformes Fecais	Nitritos	Sólidos Dissolvidos Totais
	Carbonatos	Ferro Total		Nitratos	
	Cloretos	Magnésio		Nitrogênio Orgânico	Sólidos Suspensos Totais
Alcalinidade Total	Fluoretos	Potássio		Nitrogênio Amoniacal	
	Fosfato	Sílica Dissolvida		Nitrogênio Kjeldhal	Sólidos Totais
	Sulfatos	Sódio			





- Legenda**
- Poço do SAAE Amostrado
 - Lagos
 - Rodovias
 - Malha de Ruas
 - Drenagem
 - Limite Municipal



Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas

CONTRATANTE:	 Serviço Autônomo de Água e Esgoto	
PROJETO:	ESTUDO HIDROGEOLÓGICO	
TÍTULO:	Figura 5.1. Poços do SAAE amostrados	
ELABORADO:	Daniela Barbati Osório	
CONTRATO:	3988	 AMBIENTAL & ENGENHARIA
ESCALA:	1:100.000	
DATA:	DEZ/2013	



Foto 5.1 Equipamento de medição *in situ* dos parâmetros físico-químicos

Para análise da alcalinidade utilizou-se a titulação por volumetria, usando ácido sulfúrico 0.1 e 0.01 N, padronizado previamente em laboratório. Além do ácido, foram necessários indicadores (misto e fenolftaleína) (**Foto 5.2**).

A partir do valor do pH encontrado nas amostras, determinou-se o indicador a ser utilizado:

- pH entre 6,35 e 8,58: indicador misto “verde de bromocresol”, o qual assume coloração verde entre pH 6,35 e 8,58 e coloração rósea com pH inferior a 6,35.
- pH entre 8,58 e 10,33: indicador fenolftaleína “vermelho de metila”, o qual possui ponto de virada da cor vermelho para a coloração verde em condições de pH inferiores a 8,58.

Os valores determinados no campo foram tratados mediante a equação definida por Hypolito (1998 *apud* Procel, 2011), descrita a seguir:

$$(\text{CaCO}_3) \text{ mg/L} = (\text{N}_{\text{H}_2\text{SO}_4} \times V_{\text{H}_2\text{SO}_4} \text{ (ml)} \times 50,045 \times 103) / (V_{\text{amostra}} \text{ (ml)})$$

Onde: $\text{N}_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ é a normalidade média do ácido sulfúrico, determinada a partir da massa de carbonato de sódio e do volume de ácido consumido na titulação. $V_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ (ml) é o volume do ácido sulfúrico medido em mililitros. V_{amostra} (ml) é o volume da amostra correspondente a 100 ml. A partir dos resultados, foram calculados os componentes da alcalinidade (OH^- , HCO_3^- , CO_3^{2-}).





Foto 5.2 Titulação *in situ* no PT-77, com utilização de indicador misto “verde de bromocresol” em alíquota apresentando pH 6,98 (a) e posteriormente com variação a coloração rosa, após aplicação de ácido sulfúrico (H_2SO_4) na concentração de 0,1 N (b).

As amostras coletas foram armazenadas em frascos fornecidos pelo laboratório e refrigerados a 4°C, respeitando-se o prazo de validade das amostras. A **Tabela 5.2** apresenta os parâmetros analisados, as frascarias utilizadas, a preservação e validade.

A **Tabela 5.3** apresenta os parâmetros, unidades, limite de detecção (LD), limite de quantificação (LQ), método externo e interno, e técnica utilizada. Os resultados obtidos foram comparados com os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011 e pela Resolução CONAMA nº 396, de 03 de abril de 2008, os quais dispõem, respectivamente, sobre a qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade e, sobre o enquadramento das águas subterrâneas.

No **Anexo V**, podem ser verificadas as Cadeias de Custódia do laboratório que certificam o recebimento das amostras em prazo e condições, de acordo com os procedimentos de controle de qualidade.



Tabela 5.2 Parâmetros analisados, frascaria, preservação e validade das amostras.

Parâmetros	Frascaria	Preservação	Validade
Alcalinidade Total	Pet 250 mL	Refrigeração	14 dias
Alcalinidade a Fenolftaleína	Pet 250 mL	Refrigeração	14 dias
Bicarbonatos	Pet 250 mL	Refrigeração	14 dias
Carbonatos	Pet 250 mL	Refrigeração	14 dias
Hidróxidos	Pet 250 mL	Refrigeração	14 dias
Cloreto, Fluoreto, Fosfato e Sulfato	Pet 250 mL	Refrigeração	48 hr (PO_4^{2-}) e 28 dias
Nitrato, Nitrito, N-total	Pet 500 mL	Refrigeração	28 dias (N-total), 2 dias
N-org, NKT, N-amoniacal	Pet ou vidro	H_2SO_4 até pH<2, refrigeração	28 dias
Sílica	Pet 250 mL	Refrigeração	28 dias
Sólidos Dissolvidos Totais	Pet 250 mL	Refrigeração	7 dias
Sólidos Suspensos Totais	Pet 250 mL	Refrigeração	7 dias
Sólidos Totais	Pet 250 mL	Refrigeração	7 dias
MICRO Coliformes Fecais e Totais	Pet 350 mL	Refrigeração	24 horas
Dureza Total	Pet 250 mL	HNO_3 até pH<2, refrigeração	6 meses
Cátions	Pet 250 mL	HNO_3 até pH<2, refrigeração	6 meses
Ferro total	Pet 250 mL	HNO_3 até pH<2, refrigeração	6 meses

Pet: Politerefitalato de etileno



Tabela 5.3 Metodologia de quantificação.

Parâmetros	Unidade	L.D.	L.Q.	Método Externo	Método Interno	Técnica
Alcalinidade a Fenolftaleína	(mg CaCO ₃ /L)	N.A.	1	SM 2320-B 20 ed. 2005	PE 4.9 - 437/CR, PE 4.9 - 438/CR	Titulometria
Alcalinidade Total	(mg CaCO ₃ /L)	N.A.	1	SM 2320-B 20 ed. 2005	PE 4.9 - 437/CR, PE 4.9 - 438/CR	Titulometria
Bicarbonatos	(mg/L)	N.A.	1	SM 2320-B 20 ed. 2005	PE 4.9 - 437/CR, PE 4.9 - 438/CR	Titulometria
Carbonatos	(mg/L)	N.A.	1	SM 2320-B 20 ed. 2005	PE 4.9 - 437/CR, PE 4.9 - 438/CR	Titulometria
Cloretos	(mg/L)	N.A.	5	USEPA 9056 A Fev 2007 / USEPA 300.1 . 1999	PE 4.9 - 400_SP	Cromatografia iônica
Fluoretos	(mg/L)	0,01	0,05	USEPA 9056 A Fev 2007 / USEPA 300.1 . 1999	PE 4.9 - 400_SP	Cromatografia iônica
Fosfatos	(mg/L)	0,01	0,02	SM 4500 PB E C 21 ed 1999	PE 4.9 - 400_SP	Espectrofotometria
Hidróxidos	(mg/L)	N.A.	1	SM 2320-B 20 ed. 2005	PE 4.9 - 437/CR, PE 4.9 - 438/CR	Titulometria
Nitratos	(mg/L)	0,03	0,2	SM 4500 NO ³ -E 21 ed 2005	PE 4.9 - 449/CR	Espectrofotometria, com redução em coluna de cádmio
Nitritos	(mg/L)	0,002	0,005	SM 4500 NO ² -B 21 ed 2005	PE 4.9 - 416/CR	Espectrofotometria
Nitrogênio Orgânico	(mg/L)	0,1	0,5	SM 4500 Norg B 21 ed 1984	PE 4.9 - 454_SP	Espectrofotometria, Íon seletivo
Nitrogênio Amoniacal	(mg/L)	0,01	0,05	SM 4500 NH ³ - F 20 ed 1997	PE 4.9 - 451/CRP	Espectrofotometria
Nitrogênio Kjeldhal	(mg/L)	0,1	0,5	SM 4500 Norg B 21 ed 2005,	PE 4.9 - 454_SP	Espectrofotometria, Íon seletivo
Sílica Dissolvida	(mg/L SiO ₂)	0,01	0,05	SM 4500 SiO ² - C 20 ed 1997	PE 4.9 - 417/CR	Espectrofotometria
Sólidos Dissolvidos Totais	(mg/L)	N.A.	10	SM 2540 20 ed 1997	PE 4.9 - 703/CR	Gravimetria
Sólidos Suspensos Totais	(mg/L)	N.A.	10	SM 2540 20 ed 1997	PE 4.9 - 703/CR	Gravimetria
Sólidos Totais	(mg/L)	N.A.	10	SM 2540 20 ed 1997	PE 4.9 - 703/CR	Gravimetria
Sulfatos	(mg/L)	1	1	USEPA 9056 A Fev 2007 / USEPA 300.1 . 1999	PE 4.9 - 400_SP	Cromatografia iônica
Coliformes Fecais	(mg/L)	N.A.	1,1	SM 9221B (199) / SM 9221C (1999) / SM 9221E (1999)	PE 4.9 - 600/CR	Contagem
Coliformes Totais	(mg/L)	N.A.	1,1			Contagem
Dureza Total	(mg CaCO ₃ /L)	1,25	2,5	USEPA 6010-C. 2007	PE 4.9 - 401_SP, PE 4.9 - 404_SP	Espectrometria de Emissão Atômica
Cálcio	(mg/L)	0,1	0,2	USEPA 7061-A. 1992; USEPA 7062. 1994; USEPA 6010-C. 2007; USEPA 7741-A. 1994; USEPA 7742. 1994; USEPA 7061-A. 1992; USEPA 7062. 1994	PE 4.9 - 401_SP, PE 4.9 - 404_SP	Espectrometria de Emissão Atômica
Ferro Total	(mg/L)	0,01	0,05			Espectrometria de Emissão Atômica
Magnésio	(mg/L)	0,25	0,5			Espectrometria de Emissão Atômica
Potássio	(mg/L)	0,1	0,2			Espectrometria de Absorção Atômica
Sódio	(mg/L)	0,1	0,2			Espectrometria de Absorção Atômica



5.2 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS HIDROQUÍMICOS

Os resultados das análises químicas das águas subterrâneas foram avaliados com foco na qualidade dos resultados pelo balanço iônico; na correlação entre os parâmetros analisados visando identificar padrões de comportamento de trocas catiônicas e eventuais indícios de alteração da qualidade natural das águas; e na classificação das águas com base na proporcionalidade dos íons dissolvidos nas águas subterrâneas.

5.2.1 BALANÇO IÔNICO

Para a avaliação e validação dos resultados apresentados pelo laboratório, foi realizado o balanço iônico de todas as amostras. No balanço iônico, a somatória dos cátions deve ser aproximadamente igual à somatória dos ânions, admitindo-se um determinado erro com base na concentração de sólidos totais dissolvidos e tipo de água (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1976, e HEM, 1969). A equação utilizada foi definida por Logan (1965):

$$Erro (\%) = 100 \times \left(\frac{\sum \text{cátions} - \sum \text{ânions}}{\sum \text{cátions} + \sum \text{ânions}} \right)$$

Os percentuais de erros, no balanço iônico, calculados para as 56 amostras, foram comparados com as suas respectivas condutividades elétricas. Nas águas com baixa condutividade elétrica, admite-se uma maior percentagem de erros no balanço iônico. Os erros permitidos no cálculo do balanço iônico em função da condutividade elétrica, segundo Custódio & Llamas (1976), estão na **Tabela 5.4**.

Tabela 5.4 Erros permitidos em função da condutividade elétrica.

CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	50	200	500	2000	>2000
Erro Permitido (%)	30	10	8	4	<4

CE: condutividade elétrica.

Em 93% das amostras, o erro de balanço iônico foi inferior ou igual a 10%. Apenas 4 amostras apresentaram erros acima de 10%, referentes aos poços PT-41 (10,3%), PT-64 (10,6%), PT-78 (10,2%) e PT-105 (10,8%). Entretanto, essas não foram descartadas, devido a ordem de grandeza dos erros relatados serem pouco acima dos limites, permitindo aceitar



os resultados sem mais ressalvas. Sendo assim, as 56 análises foram utilizadas na interpretação das características hidroquímicas da água subterrânea (**Tabela 5.5**), demonstrando excelente qualidade e confiabilidade dos resultados analíticos.

As cópias dos resultados analíticos emitidos pelo laboratório encontram-se no **Anexo V** e os resultados analíticos compilados e tabelados para facilitar a visualização, são apresentados no **Anexo VI**.

Tabela 5.5 Balanço iônico dos resultados analíticos.

POÇOS	Σ cátions	Σ ânions	CE (μ S/cm)	Erro (%)	POÇOS	Σ cátions	Σ ânions	CE (μ S/cm)	Erro (%)
PT-01	2,45	2,27	458	4,0	PT-45	1,68	1,55	-	4,2
PT-02	1,86	1,81	446	1,3	PT-46	2,90	3,17	302	-4,5
PT-03	2,56	2,80	489	-4,5	PT-47	1,83	1,58	315	7,3
PT-06	2,16	1,82	404	8,5	PT-48	2,96	2,55	438	7,5
PT-07	2,26	1,85	444	9,9	PT-51	5,47	5,55	492	-0,8
PT-08	2,14	2,01	381	3,1	PT-52	3,32	2,93	456	6,1
PT-09	2,17	1,83	384	8,4	PT-56	1,85	1,63	28	6,3
PT-10	2,23	2,39	389	-3,3	PT-57	2,72	2,45	328	5,3
PT-11	1,45	1,61	529	-5,3	PT-63	2,35	2,01	267	7,8
PT-12	2,12	2,32	590	-4,5	PT-64	2,17	1,75	235	10,6
PT-13	3,11	2,57	355	9,5	PT-66	2,96	2,64	317	5,7
PT-14	3,01	2,71	542	5,2	PT-69	2,63	2,22	-	8,6
PT-15	3,72	3,72	546	0,0	PT-71	2,42	2,73	271	-5,9
PT-18	3,87	3,69	489	2,4	PT-73	1,35	1,55	188	-6,7
PT-19	3,23	2,97	473	4,1	PT-74	1,26	1,36	249	-4,1
PT-22	4,29	3,92	449	4,5	PT-75	1,51	1,80	252	-8,7
PT-24	3,81	3,30	464	7,1	PT-77	1,69	1,44	205	8,0
PT-25	3,81	3,25	-	8,0	PT-78	1,50	1,84	178	-10,2
PT-28	7,57	7,28	319	2,0	PT-81	0,67	0,62	69	3,7
PT-29	2,02	1,81	313	5,5	PT-82	1,88	1,78	168	2,5
PT-30	1,28	1,55	315	-9,5	PT-84	2,52	2,89	245	-6,8
PT-34	1,52	1,48	180	1,1	PT-85	0,82	0,75	89	5,0
PT-36	3,26	3,59	372	-4,8	PT-86	0,81	0,67	355	9,5
PT-39	2,67	2,96	271	-5,2	PT-87	0,69	0,84	112	-10,0
PT-40	2,84	2,48	316	6,8	PT-89	1,22	1,40	114	-6,8
PT-41	3,24	2,63	274	10,3	PT-90	2,78	2,29	278	9,8
PT-43	2,17	2,29	360	-2,8	PT-99	2,72	2,24	354	9,7
PT-44	2,85	3,17	317	-5,2	PT - 105	2,79	2,25	290	10,8

CE: condutividade elétrica; - análises não efetuadas.



5.2.2 CORRELAÇÃO DE PEARSON

Com o objetivo de correlacionar alguns parâmetros e indicar até que ponto os valores de uma variável estão relacionados com os de outra, foi realizada a correlação de Pearson (r), também conhecido como coeficiente de correlação produto-momento, e que calcula o grau da correlação linear, além da direção dessa correlação (positiva ou negativa) entre duas variáveis quantitativas. Este coeficiente é dado pela seguinte fórmula:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2)(\sum (y_i - \bar{y})^2)}}$$

Sendo x_i e y_i os valores das variáveis X e Y. E \bar{x} e \bar{y} representam, respectivamente, as médias dos valores x_i e y_i .

O coeficiente (r) apresenta valores situados entre -1 e 1, que reflete a intensidade de uma relação linear entre dois conjuntos de dados. O sinal representa a direção, isto é, se a correlação é positiva ou negativa. Quando o resultado é $r = 1$, a correlação entre duas variáveis é perfeita e positiva, ou seja, se uma variável aumenta a outra irá aumentar. No caso de $r = -1$, a correlação é perfeita e negativa, pois quando uma variável aumenta a outra diminui. E para o caso de $r = 0$, não há correlação, logo que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. A **Tabela 5.6** apresenta a os índices de correlações, enquanto que a **Tabela 5.7** apresenta as correlações dos parâmetros analisados nas amostras de água subterrânea.

Tabela 5.6 Índices das correlações de Pearson

$r = 0,00$	Não há correlação
$r = \pm 0,40$	Moderada correlação
$r = \pm 0,70$	Forte correlação
$r = \pm 1,00$	Perfeita correlação



Tabela 5.7 Correlações de Pearson para as amostras coletadas.

Parâmetros	Fluoretos (F ⁻)	Cloretos (Cl ⁻)	Nitritos (NO ₂ ⁻)	Nitratos (NO ₃ ⁻)	Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	Fosfatos (PO ₄ ⁻³)	Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	Sílica (SiO ₂ ⁻)	Cálcio (Ca ⁺²)	Ferro Total	Magnésio (Mg ⁺²)	Potássio (K ⁺)	Sódio (Na ⁺)
Fluoretos	1												
Cloretos	0,186792	1											
Nitritos	0,551784	0,308392	1										
Nitratos	-0,18598	0,394137	-0,14907	1									
Sulfatos	0,081924	0,388923	-0,48879	-0,14873	1								
Fosfatos	0,616804	0,329529	X	0,070482	-0,02	1							
Bicarbonatos	-0,07343	0,341702	-0,07047	0,259089	0,083266	-0,40375	1						
Sílica	0,114426	-0,09112	0,753948	-0,14983	0,047627	0,481177	-0,38428	1					
Cálcio	-0,27644	0,209469	0,38334	-0,21161	-0,25081	-0,28088	0,228425	-0,02794	1				
Ferro Total	0,02432	0,279631	-0,16933	-0,18886	0,603335	-0,12168	-0,03489	-0,0581	-0,13492	1			
Magnésio	-0,26852	-0,00342	-0,01098	-0,27429	-0,1665	-0,24298	-0,0041	0,085967	0,744152	-0,07363	1		
Potássio	0,197622	0,547399	0,178772	0,150849	-0,1312	0,119909	0,126071	0,066277	0,12075	0,151853	0,08924	1	
Sódio	0,247869	0,717383	0,652353	0,566488	-0,15921	0,108303	0,275737	0,061507	0,086347	-0,03792	0,00439	0,70939	1

X = sem correlação.



5.2.3 DIAGRAMA DE CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS (DIAGRAMA DE PIPER)

Segundo Back (1960, 1966), o fluxo através de um aquífero assume uma assinatura da composição química resultante da interação com o arcabouço litológico. O termo “fácies hidroquímica” é usado para descrever os corpos de água subterrânea que diferem de outras composições químicas. As fácies são em função da litologia, solução cinética e padrões de fluxos do aquífero. As fácies hidroquímicas podem ser classificadas com base nos íons dominantes nas fácies.

Para a utilização do método gráfico de Piper (CUSTODIO & LLAMAS, 2001), calculou-se, primeiramente, a percentagem (em miliequivalente por litro) de cada cátion ou ânion em relação ao total dos cátions [Ca^{2+} , Mg^{2+} , $(Na^{+}+K^{+})$] e ao total dos ânions [Cl^{-} , SO_4^{2-} , $(CO_3^{2-}+HCO_3^{-})$], respectivamente. Os valores encontrados foram projetados no triângulo de cátions e de ânions, e em seguida projetados no losango. O cruzamento do prolongamento desses dois pontos, na área do losango, determinou o tipo químico da amostra de água (Figura 5.2).

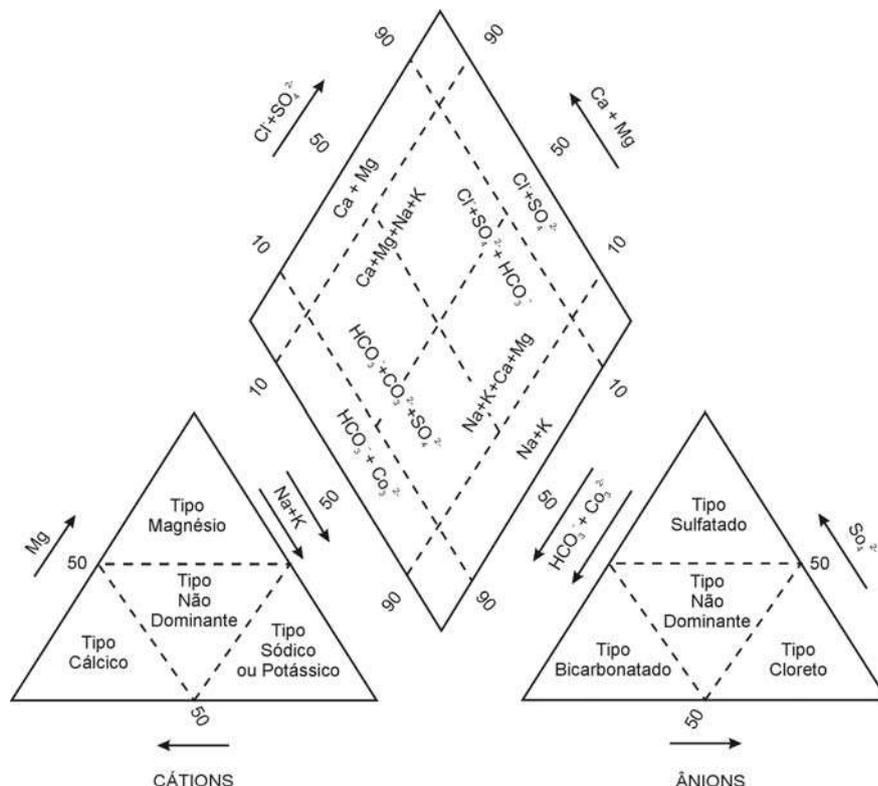


Figura 5.2 Sistema de classificação hidrogeológica para águas naturais usando o diagrama trilinear de Piper (modificado de FETTER, 2001).



5.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS ANALÍTICOS

Neste tópico serão apresentados e discutidos os resultados analíticos obtidos nas amostras com foco na caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas dos aquíferos estudados em Sete Lagoas.

5.3.1 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

A **Tabela 5.8** apresenta os valores de pH, temperatura (°C), oxigênio dissolvido (mg/L), ORP (mV) e condutividade (uS/cm), para uma população considerada de 56 amostras, bem como informações sobre os tipos de aquífero analisados.

Conforme as diferenças de potencial entre o material constituinte do sensor de captação de dados referentes ao índice ORP (potencial de oxirredução) e sua solução de calibração, adota-se somar 199 mV ao dado coletado.

Tabela 5.8 Resultados analíticos da água subterrânea - parâmetros físico-químicos.

Poços	Aquífero	Identificação da Amostra	Data Coleta	pH	CE	T	OD	ORP
					(μS/cm)	(°C)	(mg/L)	(mV)
PT-01	Cárstico	20697 CS001	23/04/2012	6,72	458	24,72	2,29	107
PT-02	Cárstico	20671 CS001V.2	13/04/2012	6,56	446	24,21	1,53	111
PT-03	Cárstico	20654CS001 V.2	11/04/2012	6,4	489	24,01	1,5	106
PT-06	Cárstico	20693CS001 V.2	21/04/2012	6,73	404	24,62	2,15	96
PT-07	Cárstico	20692CS001	22/04/2012	6,73	444	24,62	2,05	98
PT-08	Cárstico	20657CS001 V.2	14/04/2012	6,91	381	24,03	1,76	104
PT-09	Cárstico	20691CS001 V.2	20/04/2012	6,76	384	24,84	2,3	107
PT-10	Cárstico	20672CS001 V.2	14/04/2012	7,03	389	24,23	2,75	120
PT-11	Cárstico	20416CS001 V.2	02/02/2012	7,41	529	24,81	2,93	136
PT-12	Cárstico	AS 18585IN V2	07/10/2011	8,1	590	23	2,8	76
PT-13	Cárstico	AS 19322IN V.2	01/12/2011	7	355	23,68	1,51	132
PT-14	Cárstico	20655CS001	10/04/2012	7	542	24,01	0	114
PT-15	Cárstico	20568CS001	21/03/2012	7,41	546	24,31	0	91
PT-18	Cárstico	AS 19320IN	30/11/2011	6,45	489	29,61	0,21	147,2
PT-19	Cárstico	20589CS001 V.2	28/03/2012	7,54	473	23,92	0	73,9
PT-22	Cárstico	20410CS001 V.2	31/01/2012	7,05	449	23,76	2,83	148
PT-24	Cárstico	AS 202011 CS 001	20/12/2011	6,67	464	23,89	0,11	120
PT-25	Cárstico	20505CS001 V.2	02/03/2012	-	-	-	-	-
PT-28	Cárstico	AS 19350IN	02/12/2011	6,82	319	23,07	3,09	136
PT-29	Cárstico	20690CS001	19/04/2012	7,13	313	22,28	3,38	113
PT-30	Cárstico	20683 CS001	18/04/2012	6,92	315	22,68	2,77	106

CE: condutividade elétrica; T: temperatura da água coletada; OD: oxigênio dissolvido; ORP: potencial de oxirredução.
- análises não efetuadas.



Tabela 5.8 Resultados analíticos da água subterrânea - parâmetros físico-químicos (cont.).

Poços	Aquifero	Identificação da Amostra	Data Coleta	pH	CE	T	OD	ORP
					(μ S/cm)	($^{\circ}$ C)	(mg/L)	(mV)
PT-34	Cárstico	20608CS001V.2	29/03/2012	6,87	180	25,45	1,2	93
PT-36	Cárstico	AS 19186IN V.2	20/11/2011	6,5	372	24,1	2,25	157
PT-39	Cárstico	20416CS002 V.2	01/02/2012	7,45	271	23,79	3,9	155
PT-40	Cárstico	AS 19436IN	06/12/2011	6,71	316	23,06	1,73	129
PT-41	Cárstico	20165CS001 V2	13/12/2011	6,64	274	21,14	2,13	141
PT-43	Cárstico	20551CS001 V.2	16/03/2012	7,56	360	23,55	2,31	102
PT-44	Cárstico	AS 19202IN V.2	22/11/2011	6,44	317	22,84	39	337
PT-45	Cárstico	20486CS001 V.2	29/02/2012	-	-	-	-	
PT-46	Cárstico	AS 19203IN V.2	21/11/2011	6,73	302	23,67	2,41	151
PT-47	Cárstico	20708CS001 V.2	25/04/2012	6,67	315	24,62	4,74	109
PT-48	Cárstico	20632 CS001 V.2	04/03/2012	8,02	438	24,11	0,14	102
PT-51	Cárstico	20402CS001 V.2	26/01/2012	8	492	23,82	5,03	161
PT-52	Cárstico	19351IN V.2	03/12/2011	6,77	456	23,89	0,82	135
PT-56	Cárstico	20544CS001 V.2	15/03/2012	7,31	28	23,74	1,91	75
PT-57	Cárstico	20517CS001 V.2	07/10/2011	7,49	328	24,97	3,54	85
PT-63	Cárstico	AS 19455IN V.2	08/12/2011	6,8	267	24,22	2,42	130
PT-64	Cárstico	AS 20238 CS	21/12/2011	6,61	235	24,09	3,39	127
PT-66	Cárstico	AS 20204CS V.2	19/12/2011	6,86	317	22,89	1,87	133
PT-69	Cárstico	20494CS001 V.2	01/03/2012	-	-	-	-	
PT-71	Cárstico	20609 V.2	30/03/2012	7,28	271	23,97	3,55	132
PT-73	Cárstico	20437CS001 V.2	10/02/2012	7,77	188	25,38	2,68	111
PT-74	Cárstico	20436CS001V.2	09/02/2012	7,55	249	24,66	1,01	118
PT-75	Cárstico	20552CS001V.2	17/03/2012	7,88	252	23,85	2,29	88
PT-77	Cárstico	19424IN001	07/12/2011	6,98	205	25,33	3,07	124
PT-78	Cristalino	AS 18361IN	23/09/2011	6,34	178	24,93	1,24	153
PT-81	Cristalino	AS 19185IN	18/11/2011	6,33	69	23,25	2,79	112
PT-82	Cristalino	As 17914 V.2	18/08/2011	7,75	168	21,84	3,7	329
PT-84	Cristalino	AS 17922IN	25/01/2012	6,71	245	22,89	3,75	147
PT-85	Cristalino	20375CS001V.2	23/01/2012	6,74	89	23,48	4,52	170
PT-86	Cristalino	20386 CS001 V.2	24/01/2012	6,08	355	23,68	3,38	148
PT-87	Cristalino	AS 18612IN V2	12/10/2011	6,92	112	25,51	4,2	85
PT-89	Cristalino	AS 18143IN V2	09/09/2011	7,32	114	24,83	11	284
PT-90	Cárstico	AS 18298IN V2	16/09/2011	6,97	278	23,97	2,11	174
PT-99	Cárstico	AS 19187IN V.2	17/11/2011	7,74	354	22,9	2,74	125
PT-105	Cárstico	AS 19561IN	16/12/2011	6,98	290	23,08	3,25	134

CE: condutividade elétrica; T: temperatura da água coletada; OD: oxigênio dissolvido; ORP: potencial de oxirredução.
- análises não efetuadas.



De posse de todos os dados, foi realizada uma síntese dos resultados analíticos sob o ponto de vista estatístico para íons e das características físico-químicas. São apresentados os valores mínimos, máximos, médias e medianas de cada um dos parâmetros analisados, bem como, os respectivos desvios padrões, variância e o número de resultados interpretados (**Tabela 5.9**). Os resultados que indicaram concentrações abaixo do limite de detecção do método utilizado pelo laboratório foram incluídos nas estatísticas, atribuindo-se concentrações iguais aos limites de detecção para efeito dos cálculos.

Tabela 5.9 Estatística dos parâmetros hidroquímicos de todas as amostras analisadas.

Parâmetros	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão	Variância	Contagem
pH	6,08	8,10	7,02	6,92	0,48	0,23	53
CE (µS/cm)	27,90	590,00	329,51	317,00	130,55	16721,35	53
T (°C)	21,14	29,61	24,00	23,97	1,19	1,39	53
OD (mg/L)	0,00	11,00	2,52	2,36	1,72	2,91	52
ORP (mV)	73,90	337,40	132,01	123,80	52,12	2716,90	53
Nitritos - NO ₂ ⁻¹ (mg/L)	<0,002	1,85	0,06	<0,002	0,29	0,08	55
Nitratos - NO ₃ ⁻¹ (mg/L)	<0,1	40,28	4,98	1,41	8,29	67,47	56
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	<0,01	1,77	0,07	<0,01	0,28	0,08	56
Nitrogênio Orgânico (mg/L)	<0,4	3,41	0,11	<0,4	0,54	0,28	56
Nitrogênio Kjeldhal (mg/L)	<0,1	3,41	0,11	<0,1	0,54	0,29	56
Fluoretos - F ⁻¹ (mg/L)	<0,004	0,21	0,05	0,05	0,05	0,00	56
Cloretos - Cl ⁻¹ (mg/L)	<0,04	19,25	3,22	<0,04	5,49	29,63	56
Sulfatos - SO ₄ ⁻² (mg/L)	<0,03	29,00	3,36	2,49	4,63	21,02	56
Fosfatos - PO ₄ ⁻³ (mg/L)	<0,05	0,72	0,06	<0,05	0,15	0,02	55
Sílica (mg/L)	<0,01	53,70	14,48	10,61	13,34	174,88	56
Cálcio (mg/L)	2,35	131,52	40,47	38,57	23,01	520,22	56
Ferro Total (mg/L)	<0,01	3,85	0,19	0,07	0,54	0,29	56
Magnésio (mg/L)	<0,25	23,97	4,01	3,38	3,57	12,53	56
Potássio (mg/L)	<0,1	3,04	0,63	0,39	0,61	0,37	56
Sódio (mg/L)	<0,25	24,23	4,59	2,79	5,18	26,38	56
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	<10	390,00	177,68	178,00	82,34	6659,36	56
Sólidos Totais (mg/L)	<10	394,00	184,03	187,00	84,18	6960,41	56
Alcalinidade Bicarbonatos (mg CaCO ₃ /L)	39,80	228,60	142,83	159,00	60,72	3160,59	7
Alcalinidade Carbonatos (mg CaCO ₃ /L)	<5	<5	<5	<5	<5	-	7
Alcalinidade Hidróxidos (mg CaCO ₃ /L)	<5	<5	<5	<5	<5	-	7
Alcalinidade Total (mg CaCO ₃ /L)	49,00	441,10	172,44	158,00	75,69	5612,38	49
Alcalinidade a Fenolftaleína (mg CaCO ₃ /L)	<5	237,00	4,94	<5	34,21	1145,81	48
Bicarbonatos (mg/L)	29,90	269,10	108,21	103,18	45,53	2036,13	56
Carbonatos (mg/L)	<0,5	6,00	0,11	<0,5	0,81	0,64	55
Hidróxidos (mg/L)	<0,5	2,16	0,04	<0,5	0,29	0,08	56
Dureza Total (mg/L)	3,20	245,07	107,82	112,64	46,81	2152,37	56



De um universo de 56 resultados, o pH variou entre 6,08 a 8,10, com média e mediana de 7,02 e 6,92, respectivamente. Avaliando o histograma e o gráfico de frequência acumulada (**Figura 5.3**), verifica-se que em 68% dos resultados (36 amostras) o pH ocorre entre 6,50 e 7,50. Esses resultados indicam a predominância de águas com tendência neutra.

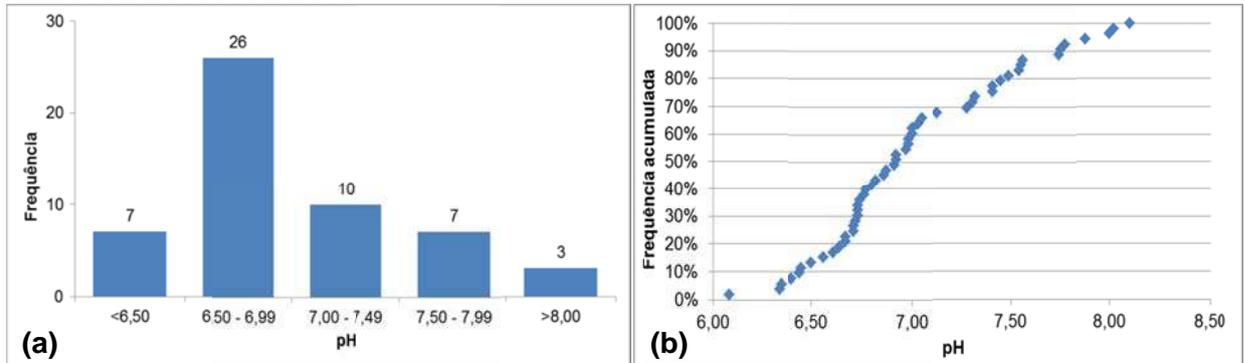


Figura 5.3 Gráficos dos resultados de pH: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.

Os sólidos totais dissolvidos representam o peso de todas as substâncias dissolvidas na água. Desconsiderando-se os resultados abaixo do limite de detecção do método analítico usado pelo laboratório, o menor valor detectado foi de 74 mg/L e o máximo foi de 390 mg/L. Avaliando-se a **Figura 5.4**, nota-se que 82% dos resultados ocorrem entre 100 e 250 mg/L, os quais permitem classificar as águas subterrâneas coletadas como de salinidade predominantemente baixa, conforme classificação proposta por McNeely *et al.* (1979) (**Tabela 5.10**). Apenas 08 resultados (16%) apresentaram concentrações acima de 250 mg/L, o que permite classificar essas águas como de salinidade baixa a média.

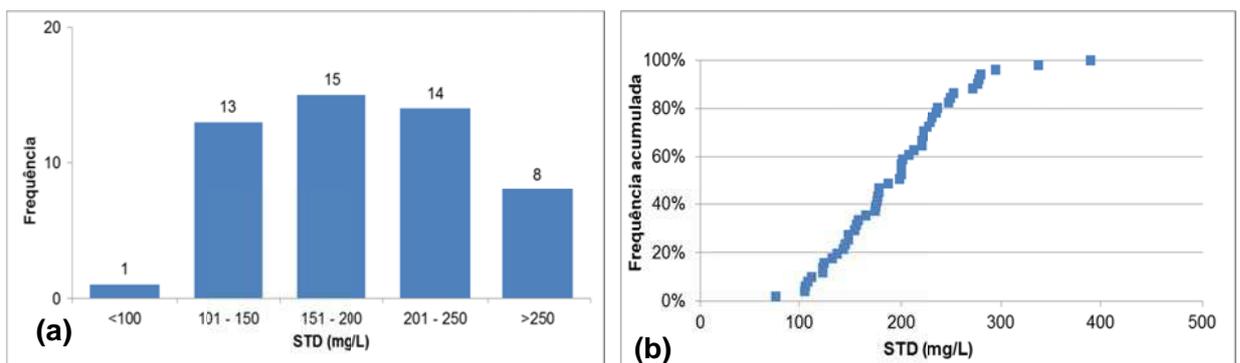


Figura 5.4 Gráficos dos resultados de sólidos totais dissolvidos: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.

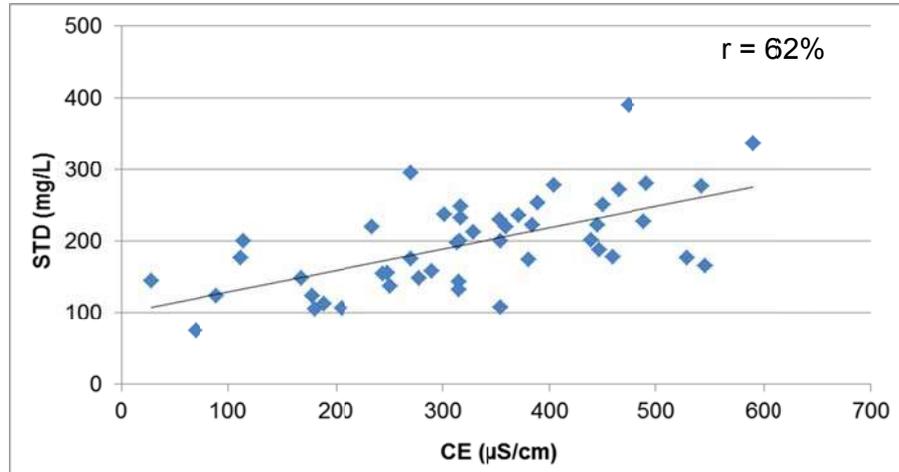


Tabela 5.10 Classificação das águas quanto à salinidade de acordo com o STD.

Classificação	Teor STD (mg/L)
Baixa	< 250
Baixa a média	250 – 500
Média	500 – 1000
Alta	1000 – 2000
Muito alta	2000 – 4000
Excepcionalmente alta	> 4000

Fonte: McNeely *et al.* (1979)

A condutividade elétrica é a capacidade de uma água em conduzir eletricidade e está intimamente associada à concentração de sais dissolvidos (CUSTODIO & LLAMAS, 2001). A temperatura também é um fator que influencia a condutividade elétrica da água. Nas análises avaliadas, a condutividade variou desde um mínimo de 27,90 $\mu\text{S}/\text{cm}$ até 590,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 329,51 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e apresentou uma forte correlação com os sólidos totais dissolvidos, de 62% (**Figura 5.5**). Dos 53 resultados obtidos, 37 (70%) apresentam condutividade elétrica entre 150 e 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (**Figura 5.6**).

**Figura 5.5** Correlação entre condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos.

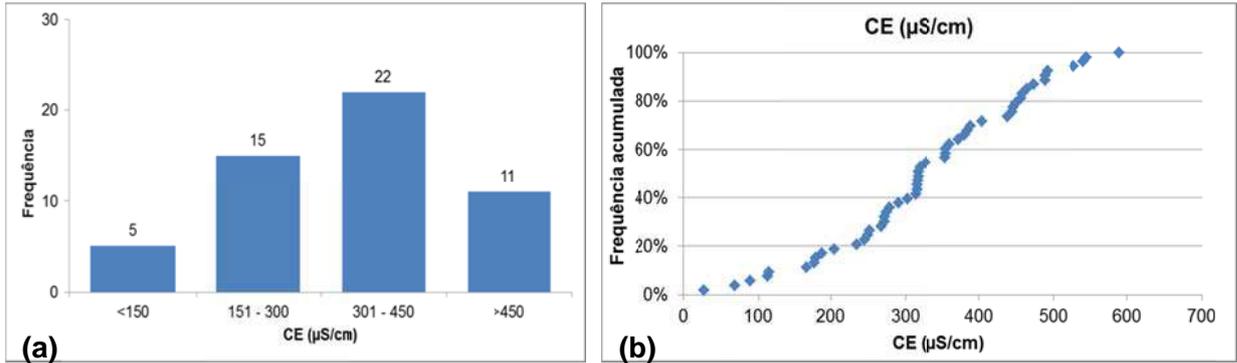


Figura 5.6 Gráficos dos resultados de condutividade elétrica: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.

O potencial de oxirredução mede a tendência de oxidação ou redução das substâncias em um determinado meio. Os principais oxidantes presentes na água subterrânea são o oxigênio, Fe^{+3} , SO_4^{-2} , NO_3^- e $Fe(OH)_3$, e os principais redutores são a matéria orgânica, Fe^{+2} , S^{-2} , NH_4^+ e $Fe(OH)_2$ (CUSTODIO & LLAMAS, 2001). Algumas reações redutoras são ainda favorecidas pela presença de bactérias. De maneira geral, admite-se que valores positivos do potencial de oxirredução representam ambientes oxidantes e valores negativos, ambientes redutores. Nas amostras coletadas, o potencial de oxirredução variou de 73,90 mV até 337,40 mV, com média de 132,01 mV e mediana 123,80 mV. No gráfico de frequência acumulada (**Figura 5.7**), é possível verificar que quase a totalidade das amostras apresentam valores positivos de potencial de oxirredução, demonstrando que predominam nos poços amostrados um ambiente que favorece a oxidação do estado de valência das substâncias presentes.

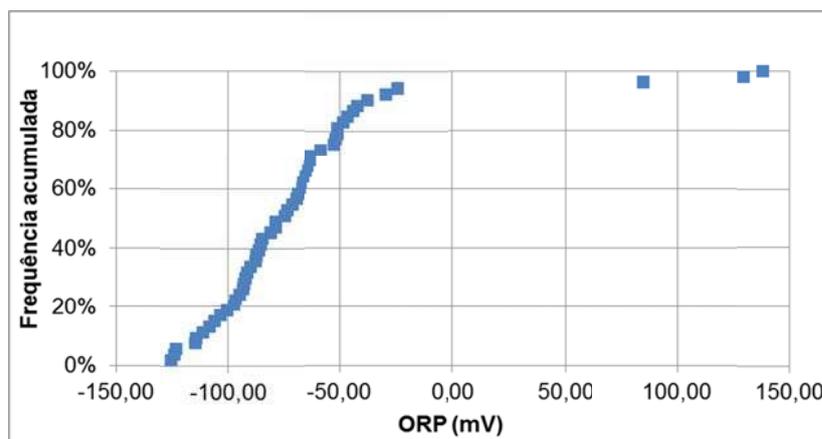


Figura 5.7 Gráfico de frequência acumulada do potencial de oxirredução.



A alcalinidade é a capacidade de neutralizar ácidos, portanto, leva em consideração a ocorrência dos íons CO_3H^- , CO_3^{-2} e hidróxidos principalmente, e também de OH^- , SiO_4H_3^- , PO_4^{-3} , BO_3H_2^- , F^- etc., entretanto, estes últimos exercem pouca ou nenhuma influência na alcalinidade. Em águas com pH menores que 8,3 a alcalinidade está atribuída predominantemente aos ânions bicarbonatos (TAC), e em meios com pH maior que 8,3, a alcalinidade está associada essencialmente ao conteúdo de CO_3^{-2} (TA) e aos hidróxidos (CUSTODIO & LLAMAS, 2001). Na área de estudo, o pH das águas é inferior a 8,3. Em um universo de 49 resultados, a alcalinidade total variou de um mínimo de 49,00 mg/L de CaCO_3 a um máximo de 441,10 mg/L de CaCO_3 , com média de 108,21 mg/L de CaCO_3 e mediana de 103,18 mg/L de CaCO_3 . O histograma de frequência e o gráfico de frequência acumulada (**Figura 5.8**) indicam que 53% das amostras ocorrem em intervalos entre 100 mg/L de CaCO_3 e 200 mg/L de CaCO_3 , e 96% abaixo de 300 mg/L de CaCO_3 .

A alcalinidade a carbonato e a hidróxidos, não apresentaram concentrações acima do limite de detecção, pois esses íons são praticamente insolúveis no pH das amostras analisadas, abaixo de 8,3.

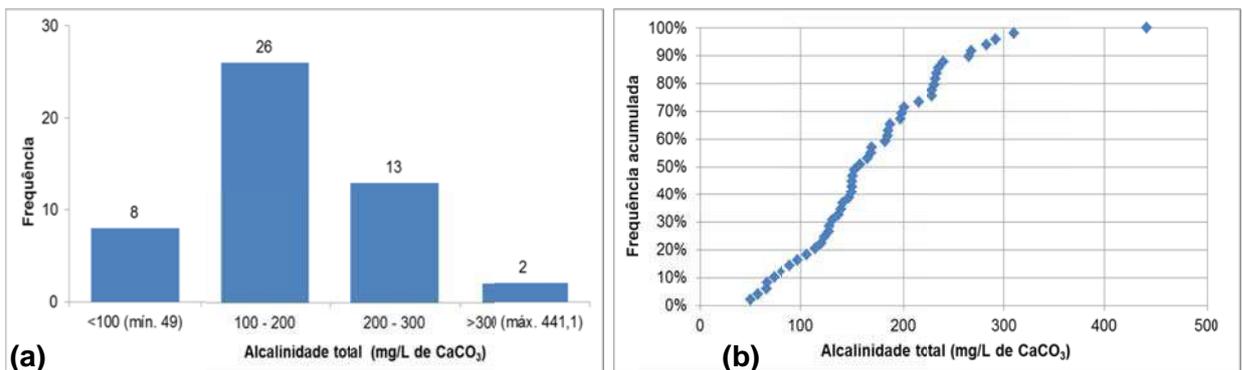


Figura 5.8 Gráficos dos resultados de alcalinidade total: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.

A dureza pode ser definida como a capacidade em neutralizar sabão ou produzir incrustações, ou ainda, como o teor de íons alcalinotérreos, essencialmente Ca^{+2} e Mg^{+2} (CUSTODIO & LLAMAS, 2001; FEITOSA & FILHO, 1997). Pode ser expressa como dureza temporária, permanente e total. A dureza temporária (ou de carbonatos) é causada pelos íons de cálcio e magnésio que se combinam com o bicarbonato e o carbonato. A dureza permanente (ou de não carbonatos) é produzida pelos íons de cálcio e magnésio que se combinam com os íons sulfato, cloreto, nitrato e outros. A dureza total é a soma da dureza temporária com a dureza permanente (FEITOSA, 2008).



A **Tabela 5.11** mostra a classificação da água quanto à dureza, segundo Custodio & Llamas (2001).

Tabela 5.11 Classificação das águas segundo a dureza.

Tipo	Teor de CaCO ₃ (mg/L)
Branda	< 50
Pouco dura	50 – 100
Dura	100 – 200
Muito dura	> 200

Em um universo de 56 amostras, a dureza total apresentou um mínimo de 3,20 mg/L de CaCO₃ e um máximo de 245,07 mg/L de CaCO₃, com média e mediana de 107,82 mg/L de CaCO₃ e 112,64 mg/L de CaCO₃, respectivamente. Observando a **Figura 5.9**, nota-se que 64% dos resultados apresentaram teor de dureza entre 100 e 200 mg/L de CaCO₃, o que permite classificar como águas duras; 21% com teor de 50 a 100 mg/L de CaCO₃, ou seja, águas pouco duras; 13% com teor abaixo de 50 mg/L de CaCO₃, águas brandas; e 2% são águas muito duras, com teor de dureza superior a 200 mg/L de CaCO₃.

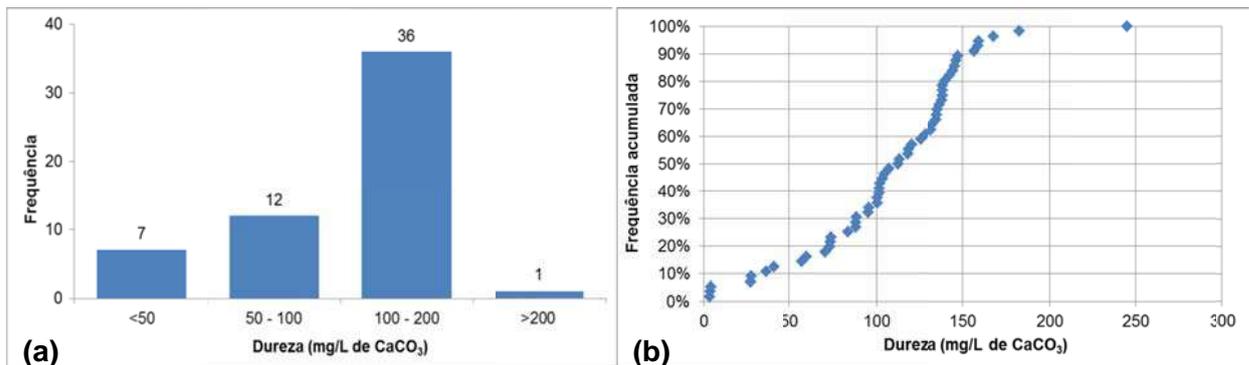


Figura 5.9 Gráficos dos resultados de dureza total: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.

As águas subterrâneas normalmente apresentam temperaturas compatíveis com as médias atmosféricas da área, em especial nos aquíferos freáticos, podendo aumentar em profundidade devido ao gradiente térmico, em média 01 °C a cada 33 m (CUSTODIO & LLAMAS, 2001). As temperaturas observadas variaram de 21,14 °C até 29,61°C.

A ocorrência de oxigênio dissolvido possui papel importante na definição de um ambiente oxidante, influenciando no potencial de oxirredução do meio. Nas amostras analisadas, variou desde 0,00 a 11,00 mg/L, com média de 2,52 mg/L, entretanto, a metodologia



utilizada não permite uma boa medição desse parâmetro, já que a captação por bombas de grandes vazões produzem a agitação da água bombeada o que influencia na oxigenação e, por isso, esses valores devem ser interpretados com ressalvas.

5.3.2 SÉRIE NITROGENADA

Com relação à série nitrogenada (**Anexo VI**– resultado das análises químicas), foram analisados o nitrito, nitrato, nitrogênio amoniacal, nitrogênio orgânico e o nitrogênio kjedhal.

O nitrato foi o composto da série nitrogenada de maior ocorrência nos resultados das análises químicas. Das 56 amostras analisadas, 36 (64%) apresentaram concentrações acima do limite de detecção do método utilizado pelo laboratório. O nitrato normalmente apresenta baixas concentrações naturais nas águas subterrâneas, no geral abaixo de 10 mg/L (CUSTODIO & LLAMAS, 2001), como o nitrato é um íon de grande mobilidade e persistência, principalmente em meios oxidantes, e sua origem natural está relacionada principalmente ao processo de nitrificação, correspondendo ao estágio final de oxidação da matéria orgânica (ciclo do nitrogênio). Também ocorre em pequena proporção na água da chuva e muito raramente da lixiviação de certos minerais nitrogenados e emanções vulcânicas. Concentrações superiores a 45 mg/L de NO_3^- classificam como uma amostra contaminada. Nas amostras analisadas, todas apresentaram concentrações de nitrato abaixo de 45 mg/L (**Figura 5.10**).

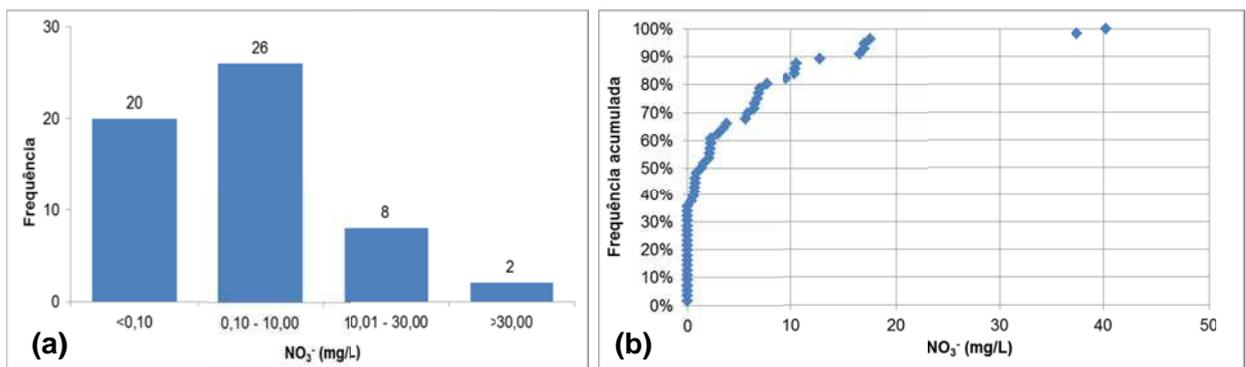


Figura 5.10 Gráficos dos resultados de nitrato: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.



O nitrito é um dos produtos intermediários da oxidação da matéria orgânica (denominado ciclo do nitrogênio), e sua transformação em nitrato ocorre de maneira muito rápida, motivo pelo qual dificilmente é encontrado nas águas subterrâneas e, quando detectado, é indicativo de contaminação recente e/ou próximo a fonte. Das 56 amostras analisadas para nitrito, 44 (78%) estão abaixo do limite de detecção do método utilizado pelo laboratório (<0,002 mg/L), 10 (18%) apresentaram valores entre 0,01 e 0,11 mg/L e 2 (4%) possuem concentrações acima de 1 mg/L (**Figura 5.11**).

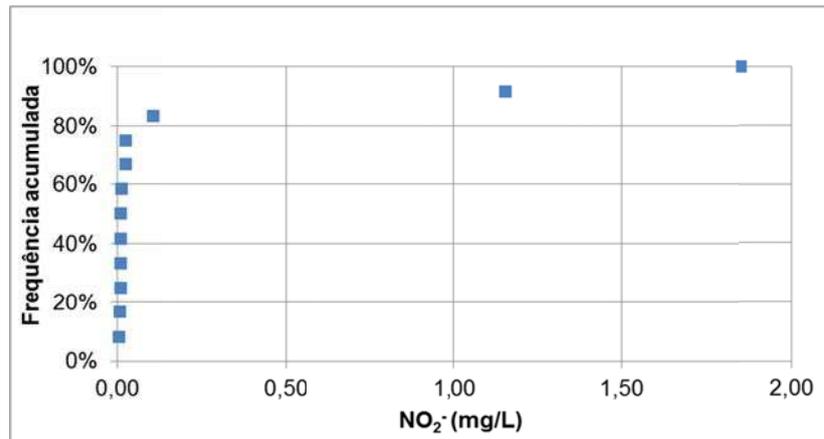


Figura 5.11 Gráfico de frequência acumulada do ânion nitrito.

Para os demais parâmetros da série nitrogenada, dos 56 resultados para nitrogênio amoniacal 48 (86%) estão abaixo do limite de detecção, a média foi de 0,07 mg/L e o valor máximo foi de 1,77 mg/L. Para o nitrogênio orgânico, 53 (95%) apresentaram concentrações abaixo do limite de detecção do laboratório, a concentração média foi de 0,11 mg/L e o valor máximo foi de 3,41 mg/L. A concentração média do nitrogênio Kjeldhal foi de 0,11 mg/L, o valor máximo 3,41 mg/L e 95% (53 análises) apresentaram concentrações abaixo do limite de detecção do laboratório.

5.3.3 ÍONS E SUBSTÂNCIAS DISSOLVIDAS

O cloreto (Cl⁻) é muito comum na água subterrânea, sendo muito solúvel, estável e que dificilmente precipita. Geralmente, ocorre associado ao íon Na⁺, conforme indica a **Figura 5.12**, cuja correlação entre os íons cloreto e sódio é forte (71%). Em águas doces, ocorrem normalmente entre 10 e 250 mg/L (CUSTÓDIO & LLAMAS, 2001) e concentrações superiores a 250 mg/L podem caracterizar sabor salgado à água potável. Sua origem é



proveniente da água de chuva e da lixiviação de minerais ferromagnesianos. Em áreas urbanas e industriais pode haver aportes importantes desse íon (FOSTER & HIRATA, 1987). Das 56 análises realizadas, 37 apresentaram concentrações de cloreto abaixo do limite de detecção do método utilizado pelo laboratório e o valor máximo verificado foi de 19,25 mg/L (Figura 5.13). Portanto, a ocorrência de cloreto é baixa.

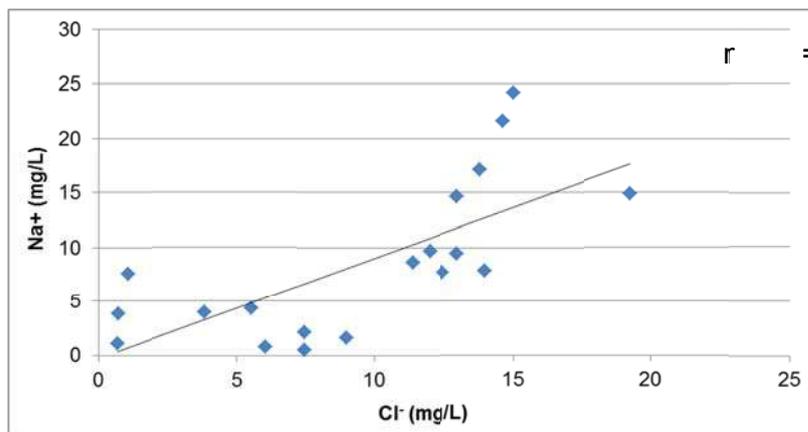


Figura 5.12 Gráfico de correlação do cloreto com o sódio.

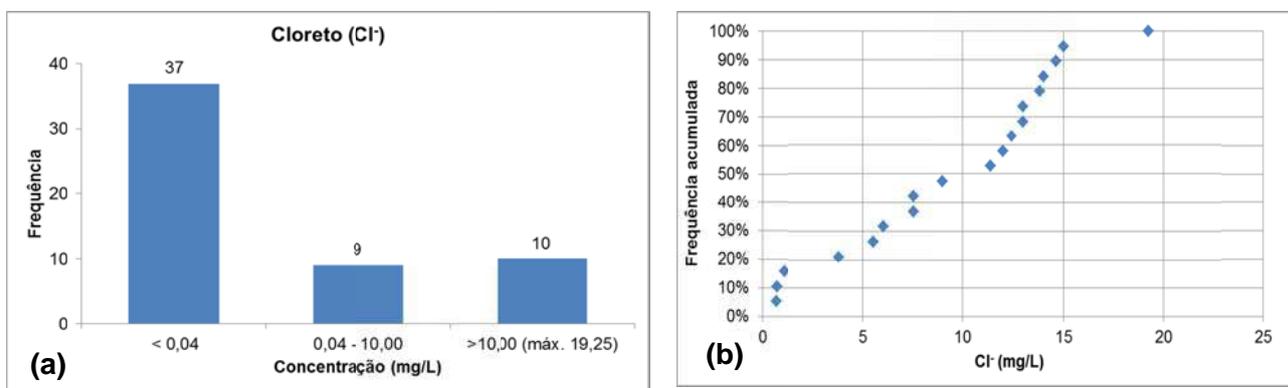


Figura 5.13 Gráficos dos resultados de cloreto: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada (não foram utilizados concentrações abaixo do limite de detecção).

O sulfato é um sal de moderada a alta solubilidade, com concentrações médias entre 02 e 150 mg/L em águas doces (CUSTÓDIO & LLAMAS, 2001). Normalmente, possui origem em áreas com condições de grande aridez ou em ambiente marinho, oxidação de sulfetos em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, dissolução de minerais ricos em sulfato, e



concentração no solo e água das chuvas. As atividades urbanas e industriais, e por vezes agrícolas, podem aportar quantidades significativas desse elemento. Pode precipitar-se como CaSO_4 e, mais raramente, em forma de SrSO_4 e BaSO_4 (CUSTÓDIO & LLAMAS, 2001). Os resultados obtidos indicaram ocorrência de no máximo 29 mg/L, com média de 3,36 mg/L, mediana de 2,49 mg/L e 22 amostras com concentrações abaixo do limite de detecção para o íon sulfato (**Figura 5.14**).

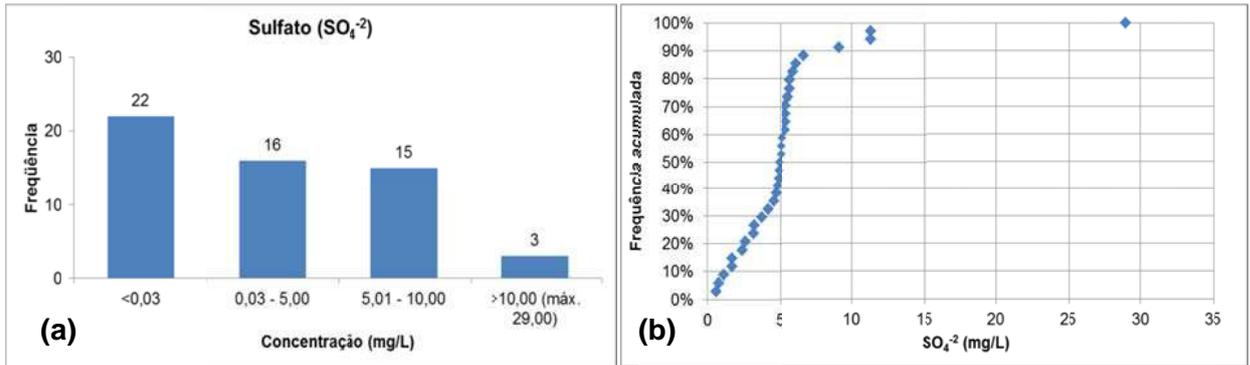


Figura 5.14 Gráficos dos resultados de sulfato: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.

O bicarbonato, normalmente, tem procedência da dissolução do CO_2 atmosférico ou do solo e da dissolução de rochas carbonáticas, podendo facilmente precipitar como bicarbonato de cálcio e sua ocorrência está fortemente associada ao pH do meio. Em águas com pH inferior a 8,3, como é o caso de todas as amostras analisadas, favorece a ocorrência de bicarbonatos em relação aos carbonatos e hidróxidos. O valor de bicarbonato nas 56 amostras variaram de 29,90 mg/L até 269,10 mg/L, com média e mediana muito próximas, de 108,21 mg/L e 103,18 mg/L, respectivamente. As análises do histograma de frequência e frequência acumulada (**Figura 5.15**) indicam que 54% dos resultados ocorrem com concentrações entre 100 mg/L e 200 mg/L de bicarbonatos sendo que em aproximadamente 90% dos resultados a concentração é inferior a 150 mg/L.



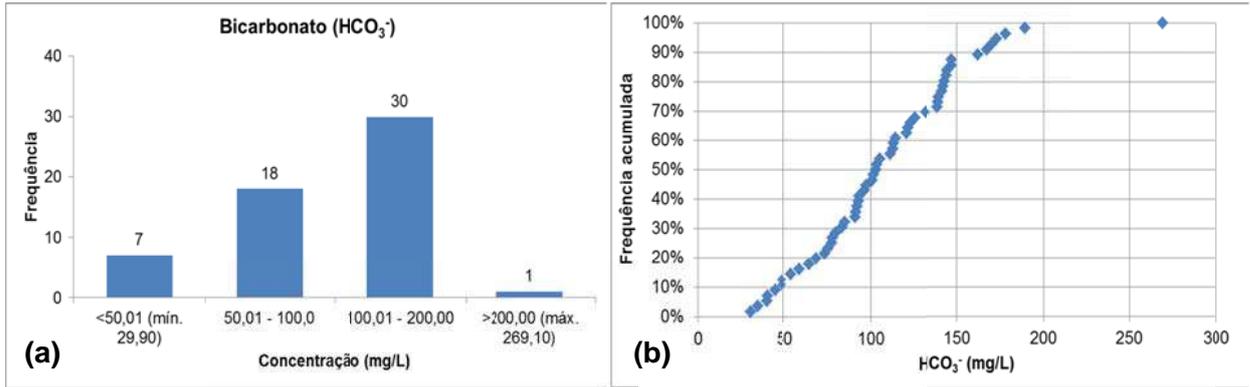


Figura 5.15 Gráficos dos resultados de bicarbonato: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.

Concentrações de carbonato e hidróxidos dissolvidos ocorrem apenas em águas subterrâneas com pH superior a 8,3. Como nas amostras analisadas, o pH é inferior a 8,3, praticamente não foram detectadas concentrações dessas substâncias nas análises realizadas (**Tabelas 5.8 e 5.9**).

A sílica normalmente não ocorre em quantidades significativas nas águas subterrâneas, devido à alta estabilidade química da maioria dos minerais compostos por silício (SiO_2). O intemperismo de minerais de argila e os feldspatos são as principais fontes de sílica para a água subterrânea (FEITOSA & FILHO, 1997). Das 56 amostras analisadas, duas apresentaram concentrações abaixo do limite de detecção para sílica. O valor máximo foi de 53,70 mg/L, a média de 14,48 mg/L e a mediana de 10,61 mg/L. Observando a **Figura 5.16**, verifica-se que 79% das amostras apresentam concentrações abaixo de 20 mg/L, valor bastante comum para as águas subterrâneas.

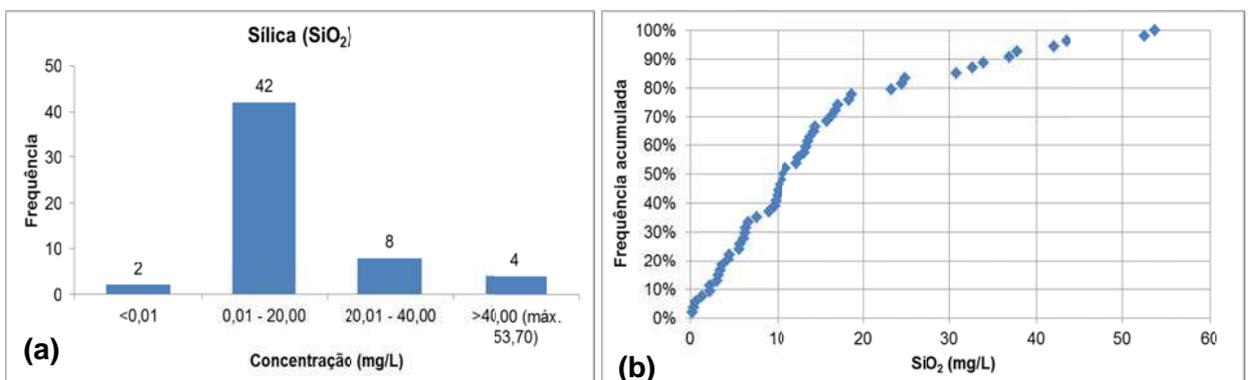


Figura 5.16 Gráficos dos resultados de sílica: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.



O sódio é um dos metais alcalinos mais abundantes nas águas subterrâneas, de solubilidade muito elevada, muito difícil de precipitar e ocorrendo principalmente na forma de cloretos. Nas águas subterrâneas doces a concentração varia, em geral, entre 0,1 mg/L até 100 mg/L. A concentração média de sódio nas amostras analisadas foi de 4,59 mg/L e a mediana de 2,79, com concentração máxima de 24,23 mg/L. Das 56 análises executadas, três apresentaram concentrações abaixo do limite de detecção utilizado e 90% dos resultados apresentaram valores inferiores a 10 mg/L (**Figura 5.17**).

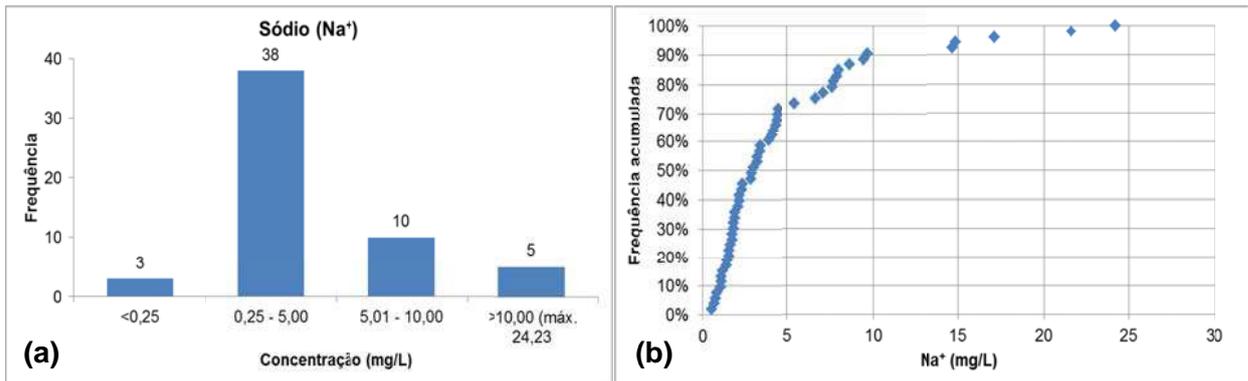


Figura 5.17 Gráficos dos resultados de sódio: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.

O potássio possui alta solubilidade e baixa tendência de precipitação, entretanto, ocorre em pequenas concentrações nas águas subterrâneas, devido à intensa participação em processos de troca iônica, por ser facilmente adsorvido pelos minerais de argilas e também por seus sais serem bastante utilizados pelos vegetais. Os teores de potássio nas águas subterrâneas são, no geral, inferiores a 10 mg/L, com maior frequência entre 1 e 5 mg/L. Do universo de 56 amostras, 8 apresentaram concentrações abaixo do limite de detecção para potássio. A concentração média foi de 0,63 mg/L, a mediana de 0,39 mg/L e a maior concentração detectada foi de 3,04 mg/L. O maior número de resultados (37) encontra-se na faixa entre 0,10 mg/L e 1,00 mg/L, conforme pode ser observado na **Figura 5.18**.



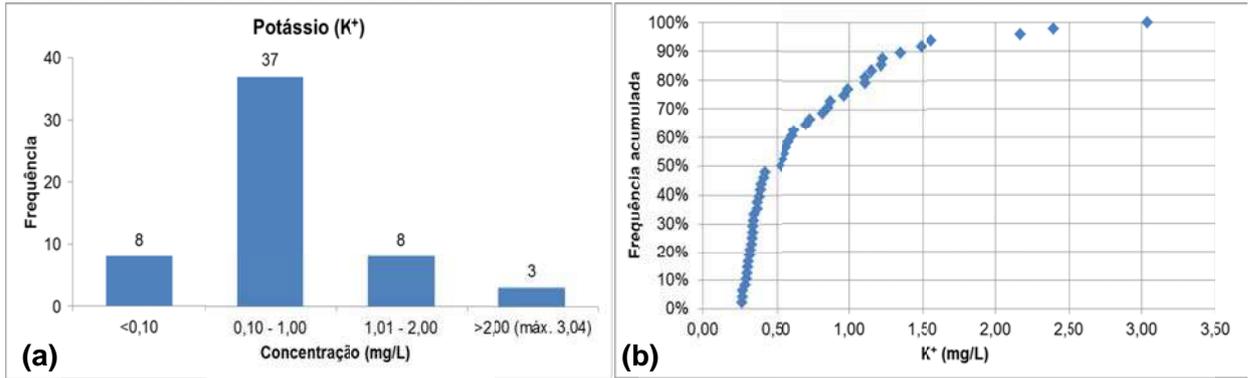


Figura 5.18 Gráficos dos resultados de potássio: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada (não foram utilizadas concentrações abaixo do limite de detecção).

O cálcio é um dos elementos mais abundantes na maioria das águas e rochas do planeta (FEITOSA & FILHO, 1997). Seus sais possuem moderada a elevada solubilidade e é muito comum precipitar na forma de carbonato de cálcio (CaCO_3). Nas rochas calcárias é muito comum nos minerais calcita, aragonita e dolomita e sua solubilidade aumenta na presença de sais de Na^+ e K^+ . O cálcio, junto com o magnésio, contribui para a dureza da água e torna-se incrustantes sob condições de pH elevado. A concentração mínima detectada no universo de 56 amostras analisadas foi de 2,35 mg/L, a máxima foi de 131,52 mg/L, a média 40,47 mg/L e a mediana de 38,57 mg/L. Analisando o histograma de frequência e o gráfico de frequência acumulada (**Figura 5.19**), observa-se que 95% dos teores detectados estão abaixo de 63 mg/L, sendo que o intervalo entre 25 mg/L e 50 mg/L representa 59% das amostras.

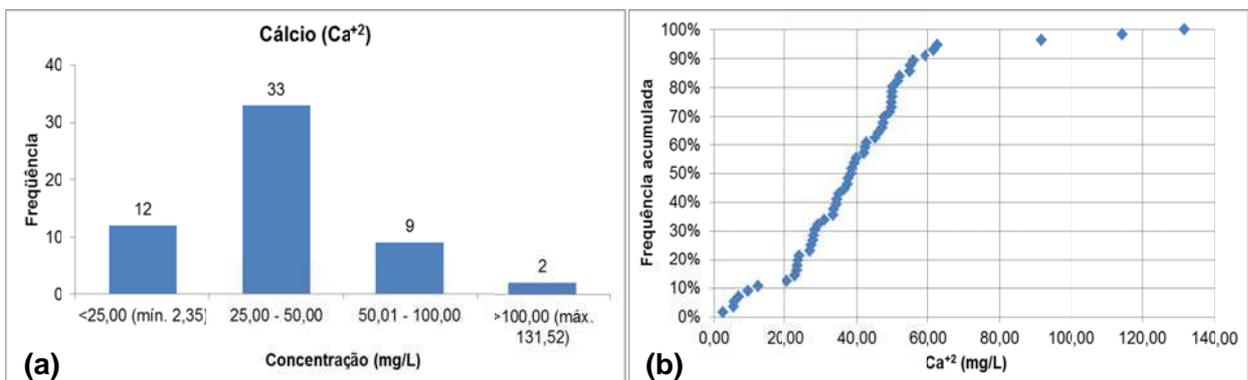


Figura 5.19 Gráficos dos resultados de cálcio: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.



O magnésio apresenta características bastante similares com o cálcio, entretanto, é mais solúvel e mais difícil de precipitar. É muito comum sua ocorrência em rochas carbonatadas e nas águas subterrâneas ocorre normalmente sob a forma de bicarbonatos (FEITOSA, 2008), em intervalo entre 1 e 40 mg/L. O teor de magnésio médio foi de 4,01 mg/L, a mediana de 3,38 mg/L, máximo de 23,97 e três resultados deram abaixo do limite de detecção do método utilizado. Na **Figura 5.20**, o histograma de frequência e o gráfico de frequência acumulada mostram que 95% das amostras coletadas apresentam concentrações abaixo de 10 mg/L de magnésio, e que os resultados concentram-se principalmente no intervalo entre 0,25 e 5,00 mg/L (79%).

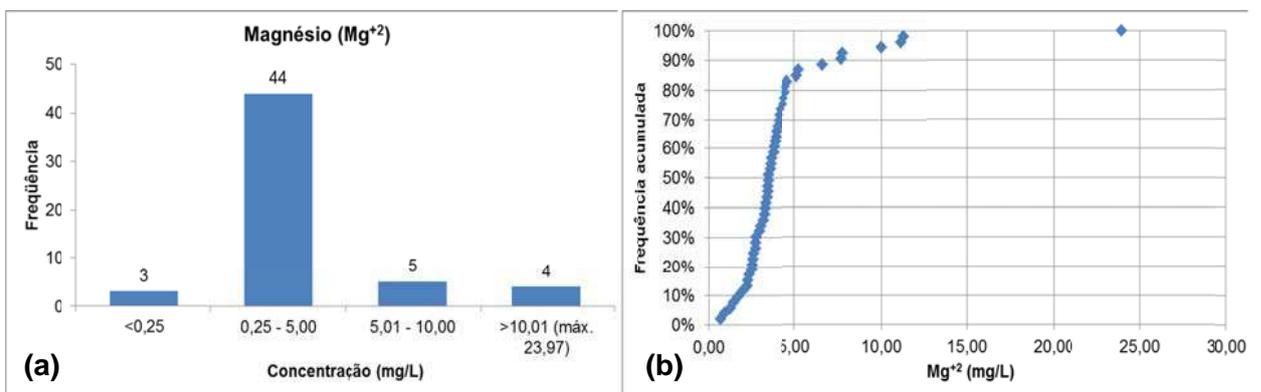


Figura 5.20 Gráficos dos resultados de magnésio: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.

A presença de ferro em baixos teores é muito comum nas águas subterrâneas. Pode existir em dois estados de valência +2 e +3 e sua estabilidade depende do pH, Eh e composição da solução. Altos teores de ferro podem estar associados à ocorrência de ferrobactérias. As concentrações variaram abaixo do limite de detecção do laboratório, até a máxima de 3,85 mg/L, com média de 0,19 mg/L e mediana de 0,07 mg/L. Conforme observa-se no histograma de frequência e no gráfico de frequência acumulada (**Figura 5.21**), 79% das amostras apresentaram resultados inferiores a 0,20 mg/L e os valores acima de 1 mg/L são bastante anômalos (notar que o eixo x do gráfico de frequência acumulada está em escala logarítmica).



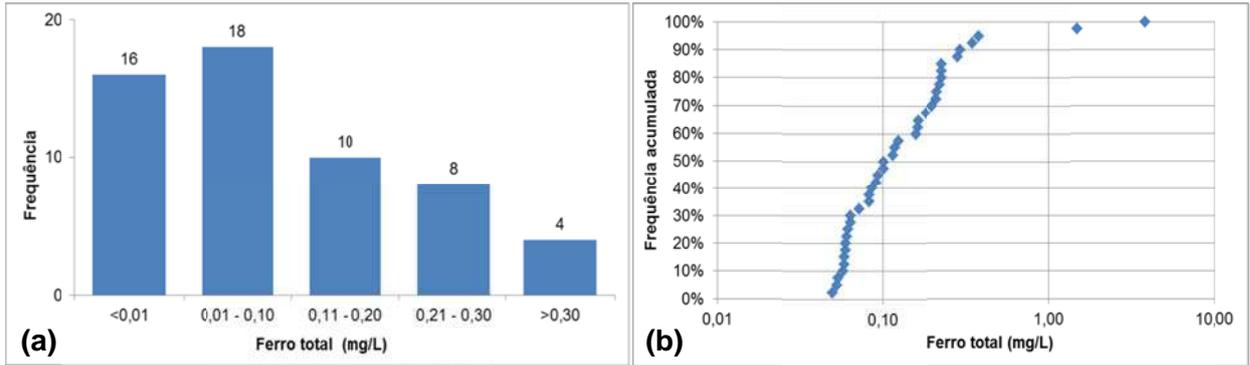


Figura 5.21 Gráficos dos resultados de ferro total: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.

Os fluoretos são frequentemente encontrados em concentrações baixas nas águas subterrâneas, possui solubilidade limitada e se hidrolizam rapidamente. A concentração de cálcio limita a ocorrência de fluoreto, que normalmente apresenta concentrações entre 0,1 e 1 nas águas naturais. Nas amostras coletadas, 43% (24) apresentaram concentrações abaixo do limite de detecção. Dentre as amostras que contém fluoreto, a menor concentração detectada foi de 0,03 mg/L e a maior de 0,21 mg/L. O maior número de amostras possui concentração abaixo de 0,10 mg/L (**Figura 5.22**).

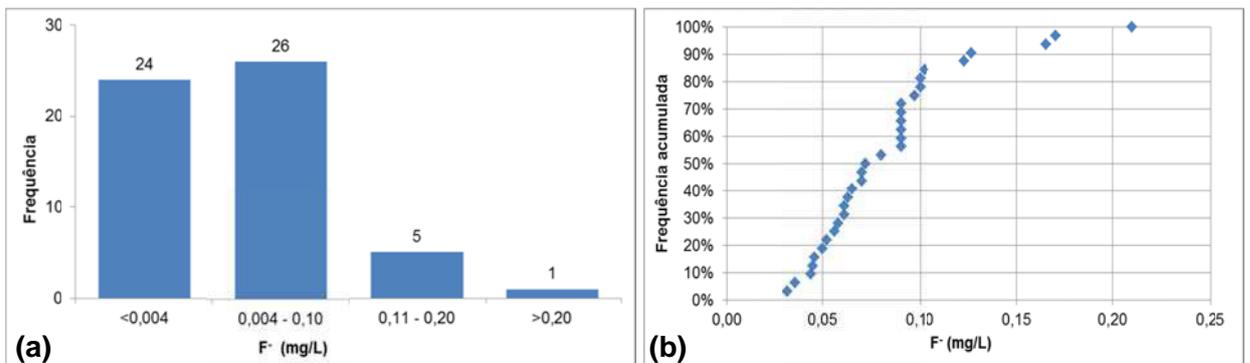


Figura 5.22 Gráficos dos resultados de ferro total: (a) histograma de frequência; (b) frequência acumulada.

Os sais de fosfato são normalmente muito pouco solúveis e se precipitam como $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. A presença de Ca^{+2} limita a concentração do fosfato, enquanto que a ocorrência de CO_2 a favorece. A concentração de fosfato nas águas subterrâneas são, no geral, muito baixas, e valores acima de 1mg/L, geralmente indicam contaminação das águas. Por via



antropogênica, o fósforo pode ser acrescido às águas subterrâneas por derivados de detergentes, efluentes domésticos, inseticidas e pesticidas. Nas análises realizadas, apenas 13 amostras apresentaram concentrações de fosfato, com mínimo de 0,04 mg/L e máximo de 0,72 mg/L e nas demais 43 a concentração foi abaixo do limite de detecção do laboratório.

5.4 INTERPRETAÇÃO E AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Os métodos de classificação das águas subterrâneas, as análises acerca das correlações de íons dissolvidos e a caracterização hidroquímica das águas levaram a interpretações sobre o comportamento das águas subterrâneas e permitiram a compreensão sobre a relação qualitativa da água e o arcabouço geológico, o modelo de circulação das águas, bem como avaliações sobre possíveis alterações da qualidade natural das águas por influência de processos antrópicos.

5.4.1 CLASSIFICAÇÃO GEOQUÍMICA DAS ÁGUAS

Com base nos resultados obtidos nas análises, foi possível diagnosticar a composição química das águas subterrâneas e propor possíveis origens dessas águas. Para isso, foram adotados os principais conceitos propostos por Custodio & Llamas (2001) e Fetter (2001).

A classificação geral das águas subterrâneas é apresentada na **Figura 5.23**. Segundo o diagrama de Piper, a composição química das águas é predominantemente bicarbonatada cálcica, associando-se aos calcisiltitos do Membro Pedro Leopoldo, da Formação Sete Lagoas (círculo vermelho). Essas classificações se enquadram também com as encontradas por Pessoa (1996). Entretanto, algumas águas, em especial as coletadas nos poços PT-78, 81, 85, 86 e 89 (círculo azul), indicaram um predomínio para águas bicarbonatadas enriquecidas em $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ e Mg^{+2} , o que pode ser indicativo de mistura de águas associadas às zonas de contato litológico entre formações pelito-carbonáticas (Sete Lagoas, Serra de Santa Helena e depósitos cenozoicos) e às rochas cristalinas do embasamento (Complexo Belo Horizonte), compostas por granitos, gnaisses, milonitos e migmatitos. Com relação ao PT-87 (círculo cinza escuro), esta é classificada como água bicarbonatada magnesiânica, podendo estar associada ao Complexo Belo Horizonte. Com relação à água



coletada no PT-73 (círculo amarelo), classificada como sulfatada cálcica, essa se encontra ao lado do pátio da antiga oficina de locomotivas da FCA (Ferrovia Centro-Atlântica), hoje utilizada como depósito de sucatas de vagões e carros de passageiros, o que pode explicar a concentração de SO_4^{-2} detectada na amostra.

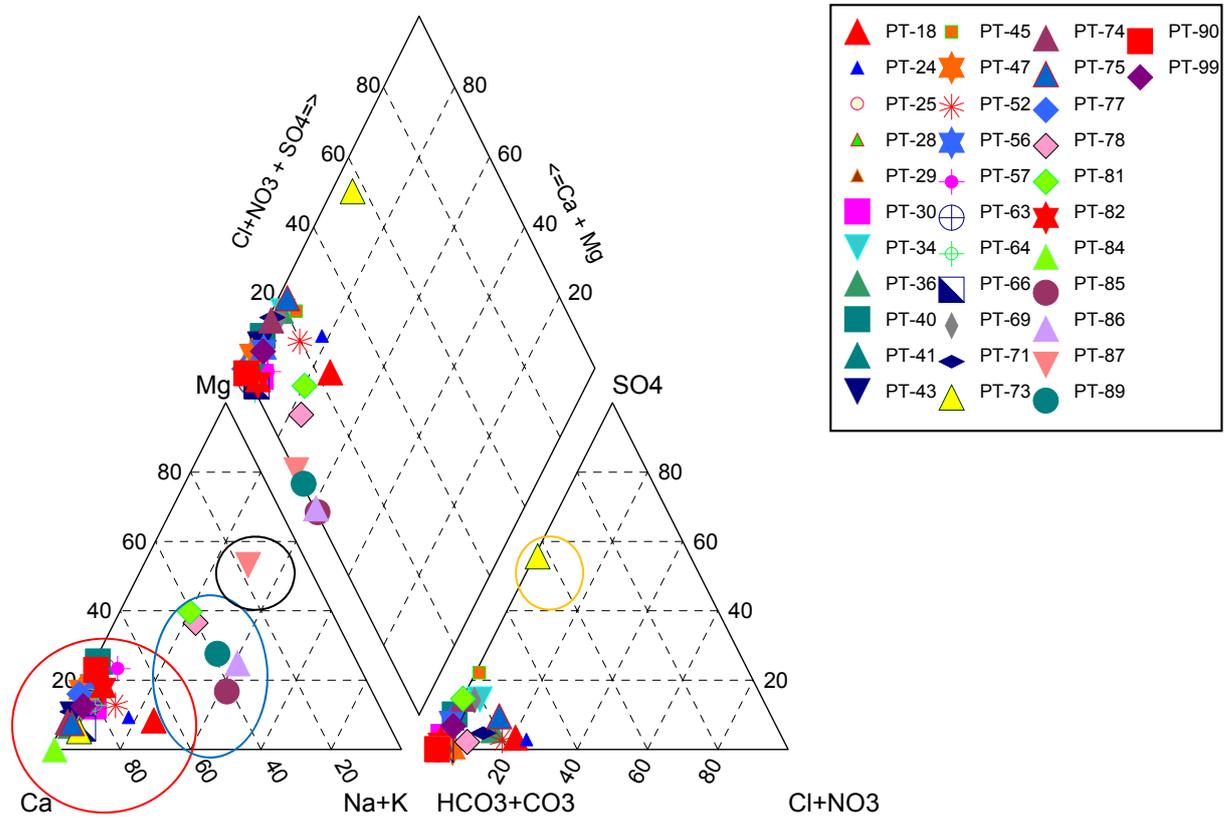


Figura 5.23 Diagrama de Piper representando os grupos identificados pelas análises químicas.

5.4.2 RELAÇÕES HIDROQUÍMICAS

Em aquíferos cársticos, normalmente ocorre grande aporte de bicarbonatos e do íon cálcio, que são, no geral, os elementos mais abundantes nas rochas carbonáticas, principalmente quando são compostas por calcários puros. O magnésio também pode aparecer em concentrações significativas, principalmente se ocorrerem dolomitas no local. Nos aquíferos fraturados, associados às rochas ígneas e metamórficas, os minerais carbonatados são



menos frequentes, e suas águas apresentam, normalmente, maiores concentrações de sílica em relação aos bicarbonatos ou carbonatos.

Para avaliar o íon predominante nas amostras analisadas, o tipo da água e o provável tipo de rocha a qual está associada à respectiva amostra, foi elaborado um gráfico da correlação da razão $\text{SiO}_2/\text{HCO}_3^-$ (**Figura 5.24**). A relação entre sílica e bicarbonato indica uma predominância de águas bicarbonatadas em relação às águas silicatadas nas amostras analisadas.

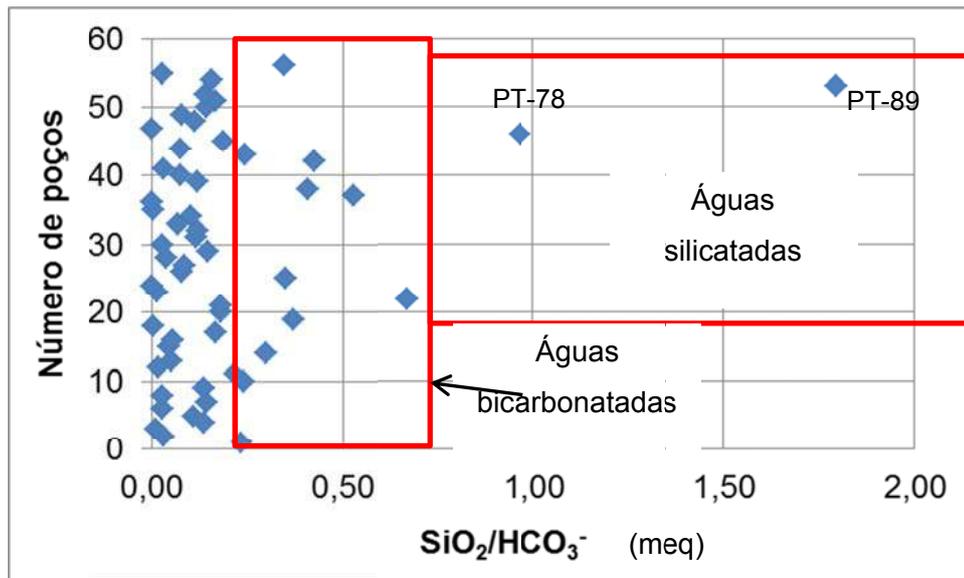


Figura 5.24 Razão sílica/bicarbonato nas amostras analisadas.

As amostras com valores mais elevados da razão sílica e bicarbonato pertencem aos poços PT-63, PT-78 e PT-89. Os mesmos não possuem perfil lito-construtivo, porém ambos se localizam em áreas dominadas por rochas da Formação Serra de Santa Helena (PT-63 e 89) e do Complexo Belo Horizonte (PT-78).

Esses resultados demonstram que as concentrações de bicarbonato e sílica, nas águas subterrâneas, podem ser associadas aos litotipos que estas atravessam, predominando na área águas bicarbonatadas, associadas ao aquífero cárstico.



5.4.3 QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

As águas subterrâneas no município de Sete Lagoas são predominantemente utilizadas para o consumo humano, conforme discutido no capítulo sobre o cadastro dos poços. Em função de este corresponder ao uso preponderante na área de estudo, a avaliação da qualidade das águas será efetuada, sobretudo, com base nos padrões de qualidade para a potabilidade.

Aquíferos cársticos são considerados especialmente vulneráveis à poluição. Sua capacidade em transportar cargas contaminantes é elevada. Sendo assim, a atenuação de contaminantes não ocorre de forma tão eficaz como em aquíferos porosos (DOERFLIGER & ZWAHLEN, 1999). Boa parte da zona urbana do município se desenvolve sobre depósitos cenozoicos, e possibilita a infiltração das águas para aquíferos cársticos mais profundos, e por isso, mais susceptíveis à contaminação.

Dado este contexto de susceptibilidade, considerou-se a necessidade de uma avaliação da qualidade das águas subterrâneas frente a possíveis indicações de alteração da qualidade natural do aquífero vinculadas às atividades antropogênicas.

De um modo geral, uma água é considerada potável quando pode ser consumida pelo homem sem oferecer perigo à saúde. Os guias atuais para determinar a potabilidade das águas baseiam-se em dois critérios distintos: 1) quanto aos seus efeitos negativos à saúde, no que diz respeito aos efeitos tóxicos, carcinogênicos e mutagênicos; e 2) quanto aos aspectos organolépticos ou estéticos. Os padrões de qualidade são embasados por um suporte legal, e especificam as condições e concentrações limites dos parâmetros para um determinado uso. No presente estudo, será utilizado o padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria MS N° 2.914, de 12 de dezembro de 2011, do Ministério da Saúde, para a avaliação da qualidade das águas subterrâneas.

A **Tabela 5.12** apresenta os resultados analíticos das amostras de água subterrânea, destacando as amostras e parâmetros com concentrações superiores aos padrões de potabilidade da Portaria MS 2.914/2011.



Tabela 5.12 Qualidade da água para consumo humano – Portaria MS 2.914, de 2011.

Poços	STD	Fluoretos (F ⁻¹)	Cloretos (Cl ⁻¹)	Nitritos (NO ₂ ⁻¹)	Nitratos (NO ₃ ⁻¹)	Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	Ferro Total	Sódio (Na ⁺)	Dureza Total	Classificação
Unidades	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L CaCO ₃)	
PT-01	178	0,05	0,00	0,00	10,34	0,00	0,00	4,35	112,94	Sem restrição
PT-02	187	0,00	0,00	0,00	6,28	0,00	0,05	2,04	87,95	Sem restrição
PT-03	227	0,00	5,52	-	12,79	0,00	0,06	4,33	118,04	Sem restrição
PT-06	278	0,06	0,00	0,00	6,69	0,00	0,00	3,30	100,41	Sem restrição
PT-07	222	0,07	0,00	0,00	9,56	0,00	0,05	4,31	103,34	Sem restrição
PT-08	174	0,00	0,00	0,00	6,83	0,00	0,09	2,79	100,27	Sem restrição
PT-09	222	0,00	0,00	0,00	6,37	0,00	0,06	3,13	101,29	Sem restrição
PT-10	253	0,07	0,00	0,00	10,45	0,00	0,05	3,13	104,40	Sem restrição
PT-11	176	0,00	0,00	0,00	2,06	5,50	0,00	1,36	70,61	Sem restrição
PT-12	337	0,00	13,82	0,00	37,50	0,00	0,21	17,12	95,54	Sem restrição
PT-13	200	0,00	3,83	0,00	10,54	0,58	0,00	3,98	146,41	Sem restrição
PT-14	277	0,00	12,45	0,00	16,53	2,39	0,10	7,72	132,43	Sem restrição
PT-15	165	0,00	14,00	0,01	17,55	5,12	0,12	7,89	167,87	Sem restrição
PT-18	0	0,21	14,62	1,85	3,41	3,70	0,18	21,65	144,39	Restritiva
PT-19	390	0,00	12,00	0,00	7,54	5,67	0,23	9,67	138,47	Sem restrição
PT-22	250	0,05	15,00	0,11	17,00	6,20	0,29	24,23	117,90	Sem restrição
PT-24	272	0,03	19,25	1,15	0,00	3,14	0,00	14,86	156,64	Restritiva
PT-25	207	0,06	0,00	0,00	2,16	4,90	0,06	3,33	182,70	Sem restrição
PT-28	0	0,05	0,00	0,00	0,71	0,00	0,08	1,75	142,64	Sem restrição
PT-29	198	0,12	0,00	0,00	0,00	1,69	0,12	2,29	95,05	Sem restrição
PT-30	132	0,07	0,00	0,00	0,00	1,66	0,06	1,51	59,87	Sem restrição
PT-34	105	0,00	0,00	0,01	2,18	4,96	0,06	1,07	73,33	Sem restrição
PT-36	236	0,09	9,00	0,00	2,00	5,78	0,06	1,59	158,88	Sem restrição
PT-39	295	0,00	13,00	0,00	40,28	5,42	0,00	14,66	101,64	Sem restrição
PT-40	200	0,00	0,00	0,00	0,00	6,73	0,20	1,41	138,42	Sem restrição
PT-41	0	0,00	0,68	0,00	0,00	3,17	0,00	1,05	159,40	Sem restrição
PT-43	220	0,09	0,00	0,01	0,85	5,47	0,00	0,66	106,99	Sem restrição
PT-44	232	0,09	0,00	0,00	6,60	5,50	0,23	1,69	138,32	Sem restrição
PT-45	124	0,10	0,00	0,03	0,69	11,30	3,85	1,85	74,04	Restritiva
PT-46	237	0,09	7,50	0,00	5,70	5,01	0,00	2,09	140,06	Sem restrição
PT-47	143	0,06	0,00	0,03	2,87	0,00	1,52	0,00	88,50	Restritiva
PT-48	201	0,10	0,00	0,01	17,00	9,16	0,12	5,45	135,53	Sem restrição
PT-51	280	0,08	13,00	0,00	5,50	0,00	0,00	9,44	245,07	Sem restrição
PT-52	0	0,00	11,39	0,00	2,21	2,58	0,09	8,63	145,59	Sem restrição
PT-56	145	0,00	0,00	0,01	0,00	4,79	0,22	1,14	134,99	Sem restrição
PT-57	212	0,09	0,00	0,01	0,65	5,13	0,38	4,07	125,27	Restritiva
PT-63	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	2,12	112,33	Sem restrição
PT-64	220	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	2,91	101,47	Sem restrição
PT-66	248	0,05	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	3,81	138,36	Sem restrição
PT-69	178	0,00	0,00	0,00	3,72	11,32	0,00	1,70	127,63	Sem restrição
PT-71	175	0,00	7,5	0,01	0,37	4,54	0,101	0,50	119,87	Sem restrição
PT-73	112	0,10	0,00	0,00	0,54	29,00	0,00	1,51	3,49	Sem restrição
PT-74	156	0,13	0,00	0,00	0,00	5,78	0,00	0,00	3,20	Sem restrição
PT-75	137	0,07	6,00	0,00	0,00	6,00	0,06	0,80	73,65	Sem restrição
PT-77	106	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	83,49	Restritiva
PT-78	123	0,06	1,07	0,00	1,52	0,75	0,23	7,62	57,38	Sem restrição
PT-81	74	0,00	0,00	0,00	0,00	4,71	0,16	2,80	26,53	Sem restrição
PT-82	148	0,00	0,00	0,00	0,00	1,13	0,00	2,26	88,05	Sem restrição
PT-84	154	0,00	0,00	0,00	0,70	0,00	0,09	0,73	147,42	Sem restrição
PT-85	123	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	7,12	35,60	Sem restrição
PT-86	108	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,66	3,86	Sem restrição
PT-87	177	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	4,20	26,97	Sem restrição
PT-89	200	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	7,99	39,87	Restritiva
PT-90	148	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	1,02	136,78	Sem restrição
PT-99	230	0,09	0,00	0,00	1,30	5,19	0,06	1,79	131,83	Sem restrição
PT-105	158	0,00	0,00	0,00	0,00	4,14	0,21	1,83	134,76	Sem restrição
Portaria 2914/	1000	1,50	250,00	1,00	45,00 ⁽¹⁾	250,00	0,30	200,00	500,00	

⁽¹⁾ portaria 2.914 define como 10 mg/L de N-NO₃ o VMP para nitrato o que corresponde a aproximadamente 45 mg/L de NO₃.



Os resultados das análises químicas (**Anexo VI**) indicaram que as águas subterrâneas no município são, no geral, de excelente qualidade natural, podendo ser utilizadas para os mais diversos usos, em particular, para o consumo humano. Considerando a Portaria MS 2914/11, apenas os compostos nitrito e ferro total ultrapassaram os valores máximos permissíveis previstos para consumo humano.

Em relação ao ferro deve-se considerar que se trata de um metal abundante na natureza, pouco persistente e móvel, quando em ambiente oxidante, possibilitando que as concentrações em água sejam amplas e oriundas de áreas fontes distintas (ocorrendo, respectivamente, por processos de percolação e lixiviação de minerais contendo esse elemento). Observações de campo corroboraram a hipótese para a origem do ferro como sendo a ocorrência em minerais da família dos sulfetos, como a pirita (FeS_2) e calcopirita (CuFeS_2), comumente encontradas nas formações Serra de Santa Helena e Sete Lagoas. A ocorrência de contatos de zonas de captação está associada a depósitos cenozoicos oriundos do intemperismo de minerais férricos do Complexo Belo Horizonte, em especial a alteração de biotitas ($\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{OH,F})_2(\text{Al,Fe})\text{Si}_3\text{O}_{10}$).

Concentrações acima dos valores máximos permissíveis (VMP) foram detectadas pontualmente nos poços PTs-45, 47, 57 e 89, bem como concentrações traços nos demais poços. Associado a isso, há a presença de ferrobactérias, caracterizada pela formação de flocos e a coloração avermelhada da água (**Foto 5.3**). Esse tipo de ocorrência tem efeitos quanto aos aspectos organolépticos e estéticos, como o gosto, odor ou aspectos visuais, além de causar problemas a poços de produção.

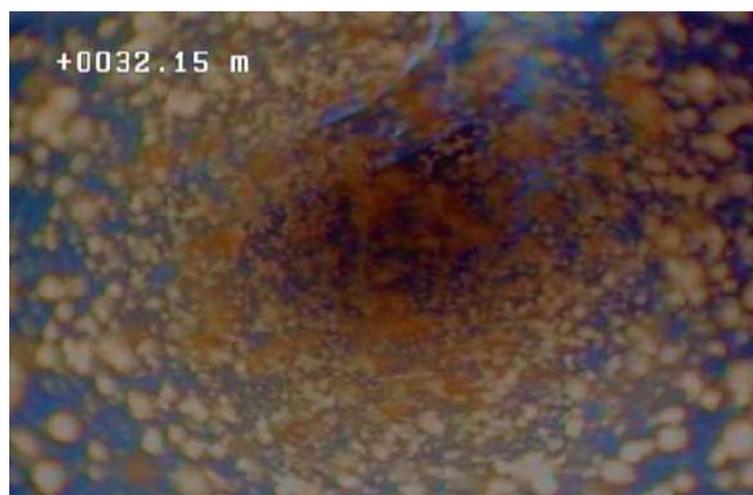


Foto 5.3 Ocorrência de ferrobactérias, no PT-77.



Desde 1983, a COPASA/MG vem estudando o problema das ferrobactérias em vários poços tubulares operados em seus sistemas de abastecimento no Estado. Segundo Carvalho (1995), os principais fatores de ocorrência de ferrobactérias estão associados à questões de operação dos poços e práticas de perfuração. Entre as medidas operacionais mais recomendadas, segundo o autor, as aplicações de soluções alcalinizantes mostraram-se as mais econômicas e operacionalmente eficazes.

Em relação às ocorrências de nitrito e nitrato, deve-se introduzir que o ciclo do nitrogênio é constituído por diversas etapas, conforme demonstrado pelo fluxograma esquemático da **Figura 5.25** a seguir.

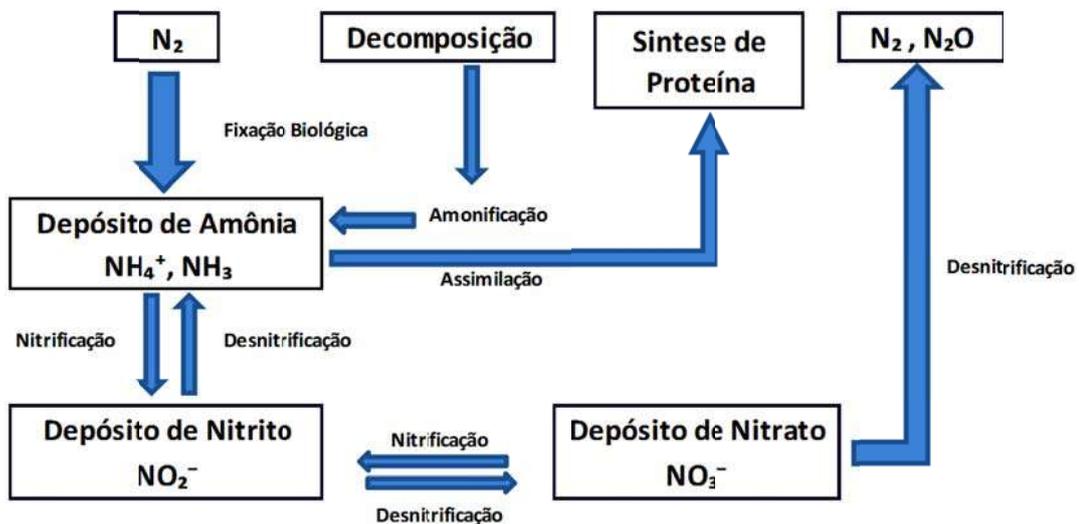


Figura 5.25 Esquema do ciclo do nitrogênio.

O nitrogênio sofre, por ações biogênicas e químicas (associadas à interação solo/água), o processo de amonificação, por meio da ação de bactérias e fungos, quando é liberado amônia (NH₄⁺) no meio. Em seguida, ocorre o processo de nitrificação da amônia, quando esta é oxidada e convertida em nitrito (NO₂⁻), e posteriormente convertida em nitrato (NO₃⁻). A ação de bactérias é fundamental em todo esse processo. O estágio final do ciclo do nitrogênio consiste na desnitrificação, quando na ausência de oxigênio, bactérias utilizam o nitrato como fonte de energia, liberando N₂ e N₂O no meio. No processo de desnitrificação o nitrato é reduzido a nitrito e, posteriormente em N₂O e N₂. Este processo é descrito pela equação: 2NO₃⁻ → 2NO₂⁻ → 2NO → N₂O → N₂



Desta forma, apesar de o nitrato ocorrer naturalmente no meio ambiente (em concentração que geralmente não excede 5 mg/L), em áreas urbanas e agrícolas, principalmente nos municípios com saneamento básico deficiente, pode ser indicativo de contaminação por esgoto, depósito de lixo, fossas sépticas e/ou atividades agrícolas. No caso da presença de nitrito, trata-se de um indicativo de poluição recente, com provável proximidade à fonte de contaminação. Assim, o nitrato tem alta mobilidade nos sistemas aeróbicos de águas subterrâneas. Nestes meios, o nitrato move-se sem retardamento, podendo atingir extensas áreas (FOSTER & CREASE 1972). A **Tabela 5.13** apresenta a relação entre a ocorrência do composto nitrogenado e a atividade humana.

Tabela 5.13 Relação entre a ocorrência do composto nitrogenado e a atividade humana

Espécie	Fonte
NO_3^-	Fertilizantes, efluentes domésticos e industriais
NO_2 (g)	Combustíveis fósseis
NO_2^-	Fase intermediária da nitrificação e desnitrificação
NO (g)	Combustíveis fósseis
N_2O (g)	Combustíveis fósseis
	Fase intermediária da nitrificação
N_2 (g)	Fertilizantes, atividades biológicas, atmosfera
NH_4^+ , NH_3 (g)	Fertilizantes, excrementos de animais, efluentes domésticos e industriais

O nitrato é um dos poluentes de ocorrência mais frequente nas águas subterrâneas. Em concentrações superiores a 45 mg/L- NO_3^- (10 mg/L-N- NO_3^-), pode causar metahemoglobinemia e câncer (WHO 1999; USEPA 1995; Portaria MS N° 1.469/2011). A gestão inadequada de efluentes domésticos, em sistemas de saneamento *in situ*, é a principal fonte de nitrato em áreas urbanas (FOSTER & HIRATA, 1987), particularmente em países em desenvolvimento. Em áreas sem sistemas de saneamento sanitário, o esgoto doméstico é descartado diretamente no solo por meio das chamadas “fossas negras” que não são outra coisa senão sistemas abertos de infiltração direta no subsolo.

Segundo Bertolo et al. (2007), o nitrato ocorre naturalmente apenas em pequenas concentrações, principalmente em áreas densamente florestadas. Na França, concentrações acima de 10 mg/L são consideradas indicativas de alteração da qualidade natural por influência antrópica, enquanto que a CETESB (1988) tem a concentração de 25 mg/L como indicador de alerta a contaminação. A Portaria MS N° 2.914/2011 estabelece 45 mg/L de nitrato como o limite nas águas subterrâneas para consumo humano. Com base na



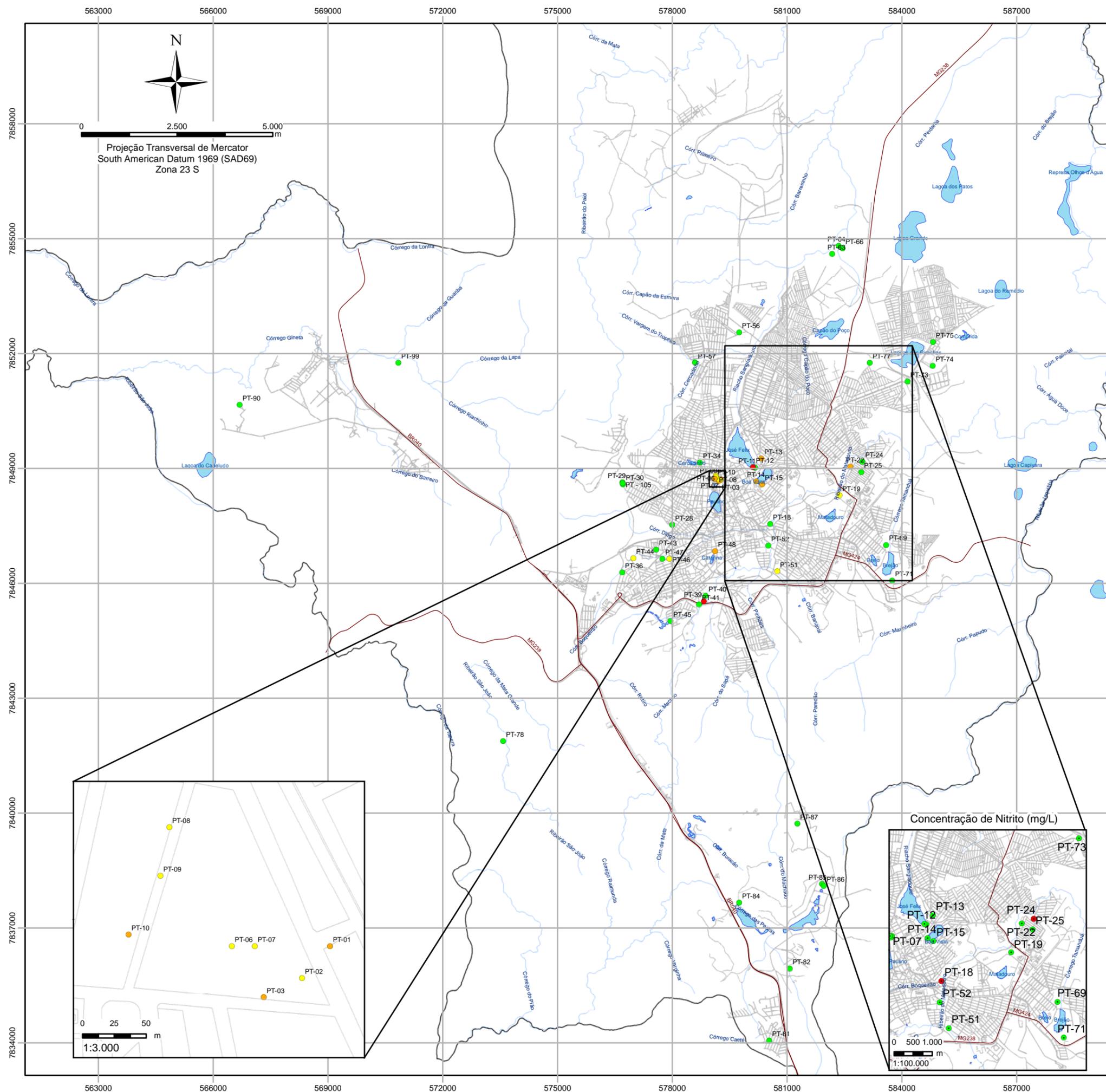
discussão acima cerca da compilação dos valores de referência para nitrato nas águas, neste estudo foram adotados os seguintes intervalos de concentração de nitrato para água subterrânea:

- 0-10 mg/L – qualidade natural;
- 10 – 25 mg/L – alteração da qualidade natural por influência antrópica em estágio incipiente;
- 25 mg/L – alteração da qualidade natural por influência antrópica com risco de contaminação; e
- >45 mg/L – contaminado.

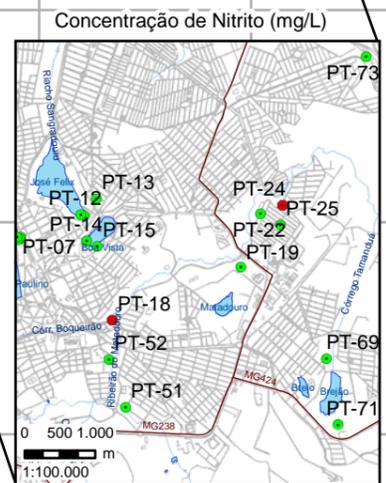
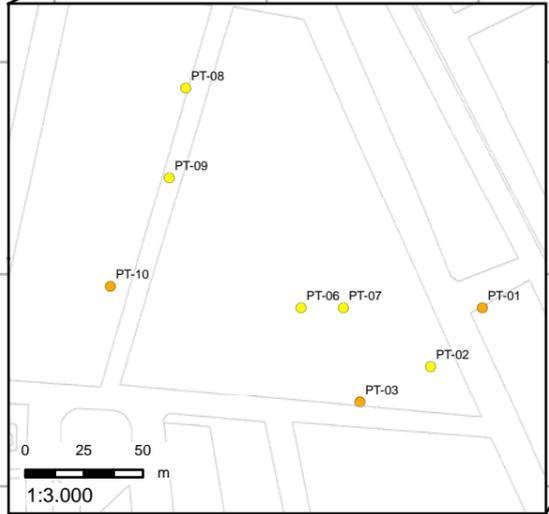
A partir desses valores, constatou-se que 82% das amostras apresentaram concentrações de nitrato abaixo de 10 mg/L, 14% delas entre 10 e 25 mg/L, e 2 amostras, ou 4% do total, apresentaram valores considerados com risco de contaminação (37,50 e 40,28 mg/L - PT-12 e PT-39, respectivamente) (**Figura 5.26**). Desse modo, avalia-se que as águas subterrâneas em Sete Lagoas apresentam, de modo geral, excelente qualidade, entretanto, já apresentando indícios de alteração da qualidade natural por influência antrópica, provavelmente associada a infiltrações de esgotos provenientes do uso de alternativas individuais (fossas) e de vazamentos da rede de coleta e afastamento do esgoto sanitário.

Ressalta-se que, embora as amostras coletadas não tenham apresentado contaminação por nitrato (> 45 mg/L), não se pode descartar que, localmente, ocorram porções dos aquíferos com concentrações fora dos padrões de potabilidade, assim como, possa existir poços particulares que estejam captando águas contaminadas.





- Legenda**
- Lagoas
 - Rodovias
 - Malha de Ruas
 - Drenagem
 - Limite Municipal
- Concentração de Nitrato nos poços do SAAE (mg/L)**
- 0,00 - 5,00
 - 5,01 - 10,00
 - 10,01 - 30,00
 - 30,01 - 45,00
- Concentração de Nitrito nos poços do SAAE (mg/L)**
- 0,00 - 0,99
 - 1,00 - 1,85



Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas

CONTRATANTE:			
PROJETO:		ESTUDO HIDROGEOLÓGICO	
TÍTULO:		Figura 5.26. Ocorrência de Nitrato e Nitrito nos poços do SAAE amostrados	
ELABORADO:		Daniela Barbati Osório	
CONTRATO:		3988	
ESCALA:		1:100.000	
DATA:		DEZ/2013	
		 AMBIENTAL & ENGENHARIA	

O aporte de matéria orgânica de efluentes domésticos, no geral, também resulta no aumento de outras substâncias além do nitrogênio, entre as quais: sódio, potássio, cloreto, sulfato e magnésio (HIRATA, 2000). Dessa maneira, procurou-se avaliar a correlação do nitrato com os íons citados, de forma a averiguar se há uma correlação entre os mesmos.

As Tabelas 5.14 e 5.15 e Figuras 5.27 a 5.31 mostram o resultado do cálculo de correlação de Pearson para as amostras acima do limite de detecção do laboratório. Essa correlação tem por objetivo reforçar a ideia de que a origem do nitrato possa estar associada ao aporte de esgotos domésticos nos solos e águas subterrâneas.

Tabela 5.14 Correlação de Pearson para o nitrato¹.

Correlação	Cloreto	Sulfato	Magnésio	Potássio	Sódio
Nitrato	0,50	-0,03	-0,23	0,15	0,55

¹ utilizando todos os resultados com concentração de nitrato acima do limite de detecção.

Tabela 5.15 Correlação de Pearson para o nitrato¹.

Correlação	Cloreto	Sulfato	Magnésio	Potássio	Sódio
Nitrato	0,58	0,15	-0,59	-0,14	0,57

¹ utilizando os resultados com concentrações de nitrato superiores a 10 mg/L.

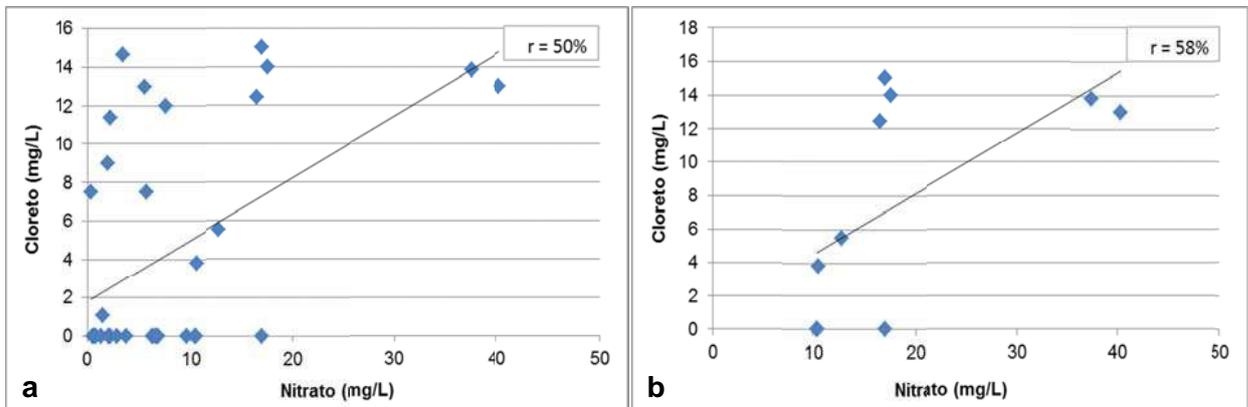


Figura 5.27 Correlação entre nitrato e cloreto: a) todos os resultados com nitrato acima do limite de detecção do método utilizado pelo laboratório; b) resultados com concentração de nitrato acima de 10 mg/L.



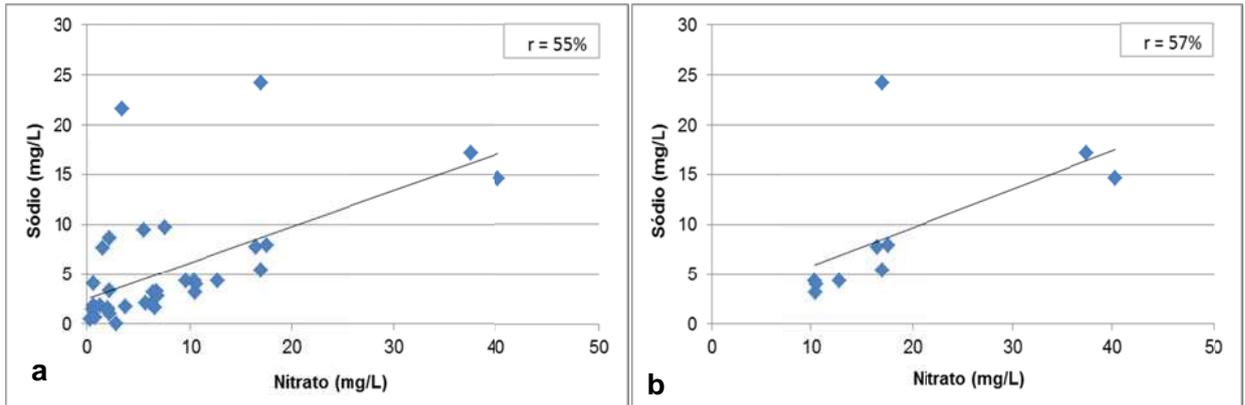


Figura 5.28 Correlação entre nitrato e sódio: a) todos os resultados com nitrato acima do limite de detecção do método utilizado pelo laboratório; b) resultados com concentração de nitrato acima de 10 mg/L.

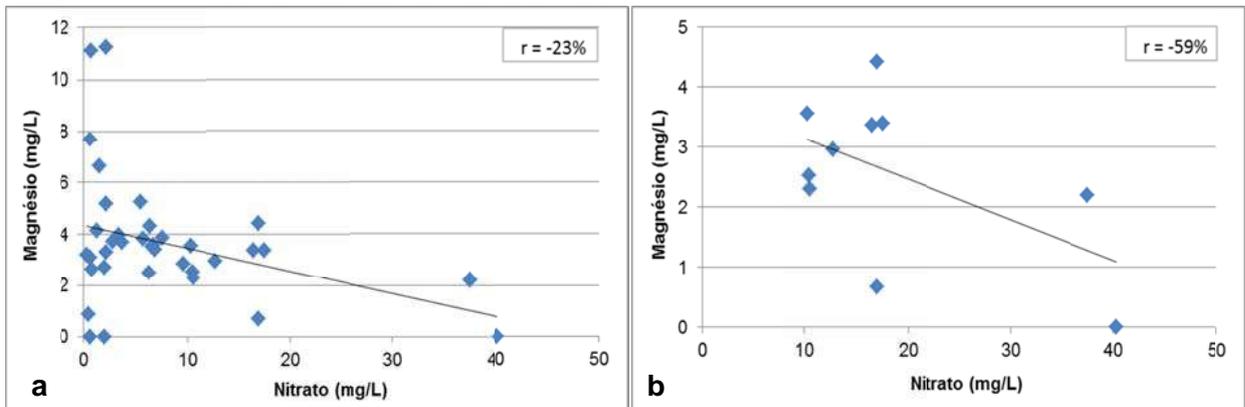


Figura 5.29 Correlação entre nitrato e magnésio: a) todos os resultados com nitrato acima do limite de detecção do método utilizado pelo laboratório; b) resultados com concentração de nitrato acima de 10 mg/L.



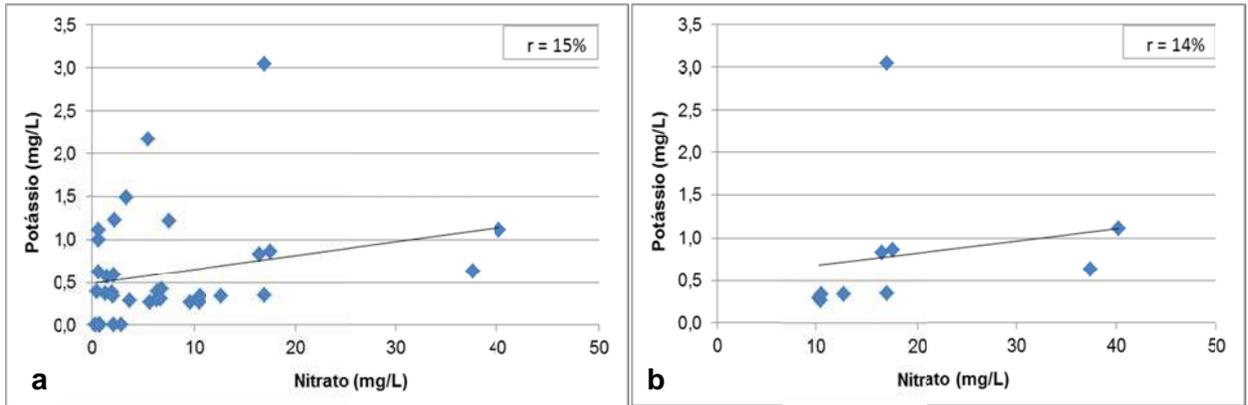


Figura 5.30 Correlação entre nitrato e potássio: a) todos os resultados com nitrato acima do limite de detecção do método utilizado pelo laboratório; b) resultados com concentração de nitrato acima de 10 mg/L.

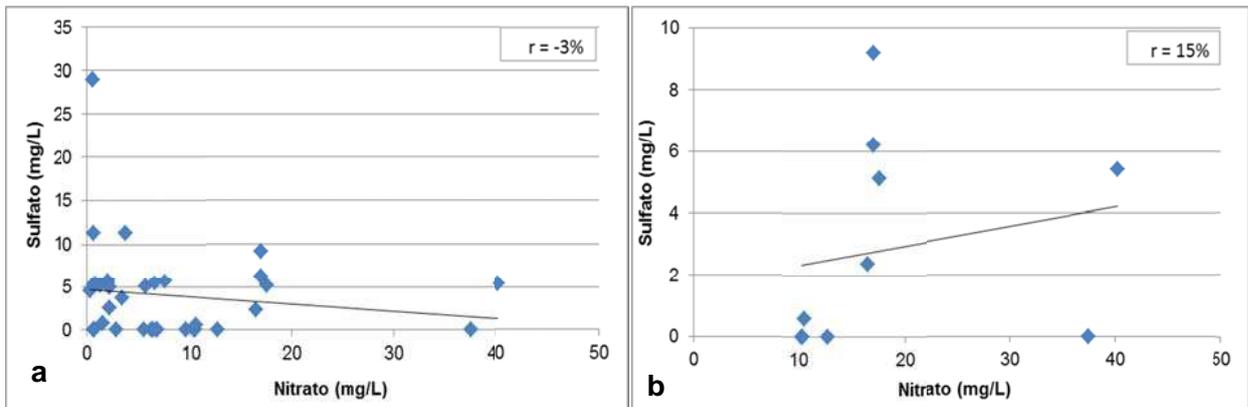


Figura 5.31 Correlação entre nitrato e sulfato: a) todos os resultados com nitrato acima do limite de detecção do método utilizado pelo laboratório; b) resultados com concentração de nitrato acima de 10 mg/L.

O cloreto e o sódio foram os íons que apresentaram forte correlação com o ânion nitrato. Considerando todas as amostras com concentração de nitrato acima do limite de detecção, o cloreto apresentou correlação de 50% com o nitrato (Tabela 5.13 e Figura 5.27a), e avaliando apenas as concentrações de nitrato superiores a 5mg/L, ou seja, aquelas que apresentam indícios de contaminação, a correlação sobe para 58% (Tabela 5.14 e Figura 5.27b). O sódio apresentou uma correlação de 55% para todas as amostras com concentrações de nitrato acima do limite de detecção (Tabela 5.13 e Figura 5.28a) e 57% para concentrações acima de 5mg/L (Tabela 5.14 e Figura 5.28b). O magnésio apresentou forte correlação com o nitrato apenas para os resultados com indícios de contaminação



(Figura 5.29b). O sulfato e o potássio apresentaram uma fraca correlação com o nitrato. (Tabelas 5.14 e 5.15 e Figuras 5.30e 5.31).

Discussões sobre a origem do nitrato nas águas subterrâneas

Estudos conduzidos por Cagnon (2003) indicam que, de forma geral, os bairros mais antigos de municípios apresentam maiores concentrações de nitrato em relação a bairros mais recentes. Isso ocorre porque, normalmente, os bairros antigos desenvolveram-se, inicialmente, sem a cobertura da rede de esgoto, a qual pode ter sido instalada posteriormente. Dessa maneira, os efluentes domésticos seriam descartados *in situ*, que se configuram nas principais fontes de contaminação da água subterrânea por nitrato (VARNIER & HIRATA, 2002). Bairros instalados mais recentemente tendem a ser atendidos pela rede de esgotamento com mais frequência, eliminando a necessidade do uso de fossas pelos moradores. Como a origem possivelmente está associada à ocupação urbana, um fator importante para a geração desse contaminante é o volume de esgoto produzido pela população. Estudos conduzidos por Foster & Hirata (1987) indicam que uma pessoa produz anualmente 4 kg de nitrogênio. Já Bertolo (2001), calculou qual seria a densidade populacional máxima necessária para que as concentrações de nitrato como nitrogênio no aquífero fossem no máximo 10 mg/L, levando-se em consideração as taxas de infiltração e a recarga por chuvas. O resultado obtido foi de 48 hab./hectare (ou 4.800 hab./km²), para que o aquífero freático não seja impactado com concentrações de NO₃⁻-N acima de 10 mg/L. Portanto, as áreas com maior densidade demográfica podem produzir um maior volume de nitrogênio que pode vir a se tornar nitrato.

Dessa forma, como a área urbana de Sete Lagoas localiza-se geologicamente, em sua grande parte, sobre depósitos cenozoicos (facilitando a infiltração das águas para aquíferos mais profundos) é possível, com ressalvas, fazer comparações entre o índice calculado por Bertolo (2001), de 4.800 hab/km², com as regiões administrativas (RA) e suas respectivas densidades populacionais (IBGE, 2010) (ver **Tabela 5.16**), bem como com as zonas de expansão urbana (anos de 1949, 1965, 1972, 1989 e 2000) e os poços de abastecimento analisados quimicamente.



Tabela 5.16 Comparação da densidade populacional máxima por área administrativa com o valor máximo de 4.800 hab./km² necessária para que as concentrações sejam no máximo 10 mg/L.

Regiões Administrativas	Área (km ²)	População	Densidade Demográfica por Área Administrativa (hab./km ²)
1	3,00	13.528	4.509
2	2,00	9.887	4.943
3	4,00	13.549	3.387
4	2,00	13.318	6.659
5	10,00	17.484	1.748
6	2,00	20.552	10.276
7	14,00	2.496	178
8	5,00	17.942	3.588
9	3,00	16.908	5.636
10	2,00	13.286	6.643
11	6,00	10.052	1.675
12	4,00	13.399	3.350
13	4,00	1.906	476
14	2,00	5.009	2.505
15	5,00	13.354	2.671
16	6,00	12.261	2.043
17	7,00	12.741	1.820

A **Figura 5.32** ilustra a densidade demográfica em Sete Lagoas, por região administrativa, a ocorrência de nitrato e as expansões urbanas. Para uma melhor visualização das RAs, estas foram divididas em 3 sub-zonas: 1) baixa densidade populacional, até 3.500 hab./km²; 2) moderada densidade ocupacional, entre 3.500 e 4.800 hab./km²; e alta densidade demográfica, acima de 4.800 hab./km².

Com esses intervalos em mente, as RAs 02, 04, 06, 09 e 10 apresentaram valores acima de 4.800 hab./km², enquanto que as zonas 01 e 08 foram estimadas como áreas de moderada densidade demográfica. Com isso, foi possível analisar quais possíveis RAs apresentariam concentrações de nitrato próximas ou acima do máximo de 5mg/L (que são valores adotados aqui como indícios de contaminação das águas subterrâneas) e comparar com os resultados obtidos nas análises químicas. A partir disso, observou-se que as maiores concentrações de nitrato ocorrem nas áreas com maiores densidades demográficas e em regiões com densidades moderadas. Fica estabelecida uma provável causa-efeito onde o aporte de efluentes domésticos estaria associado à densidade ocupacional. Com exceção da região administrativa 14, todas as áreas restantes de menor densidade não apresentaram resultados de concentrações acima de 5mg/L.



Analisando sob a ótica da expansão urbana no tempo, observou-se que (com exceção do PT-22 e PT-39, localizados na área de expansão de 1989, e considerados como contaminações pontuais) todos os poços com valores anômalos de nitrato encontram-se na região mais antiga do município (ano 1949), enquanto que em bairros mais recentes, tais concentrações apresentaram valores abaixo do limite de 5mg/L.

Com base na análise de densidade ocupacional acima, considerando que as zonas administrativas 01, 02 e 14 são os bairros mais antigos do município (particularmente as RAs 01 e 02) se justifica a presença das maiores concentrações de nitrato nas zonas mencionadas.

Vale ressaltar que quatro regiões de alta densidade demográfica (RAs 04, 06, 09, e 10) não tiveram suas águas analisadas quimicamente. Entretanto, devido às considerações e análise feitas, bem como as premissas defendidas por Bertolo (2001) e Cagnon (2003), é possível sugerir que, das quatro RAs, as regiões 04 e 10 tem as maiores chances de apresentar na água extraída de seus poços concentrações de nitrato acima de 5mg/L.

Portanto, com base nos resultados e discussões apresentados, a hipótese admitida para origem do nitrato com concentrações acima de 5mg/L é a de que ocorre a partir da infiltração de efluentes domésticos, na região urbana do município, principalmente na região central mais antiga e mais populosa. O efluente doméstico também é a provável fonte de cloreto e sódio nos poços que apresentaram maiores concentrações dessas substâncias. Apesar do indício de contaminação do aquífero por esses íons citados, não houve amostras com concentrações acima do VMP para esses parâmetros. Entretanto, como o nitrato já apresenta fortes indícios de contaminação e é um contaminante muito persistente e móvel, é importante o seu monitoramento, principalmente nos poços localizados na zona urbana central do município, onde os riscos por contaminação são mais elevados.

Um fato importante observado, é que poços próximos apresentaram concentrações de nitrato muito diferentes, independente da área em que ocorrem. Muitas vezes, poços localizados muito próximos e que possuem características construtivas e geológicas semelhantes, apresentam resultados de nitrato com diferenças de concentração superiores a 10 vezes. O poço PT-12, que apresentou 37,5 mg/L, enquanto que no PT-11, localizado cerca de 50 m, a concentração foi de apenas 2 mg/L, Outro exemplo é o PT-39 com 40 mg/L, enquanto que os PTs 40 e 41, a escassos 150 metros, não apresentaram concentrações mensuráveis.



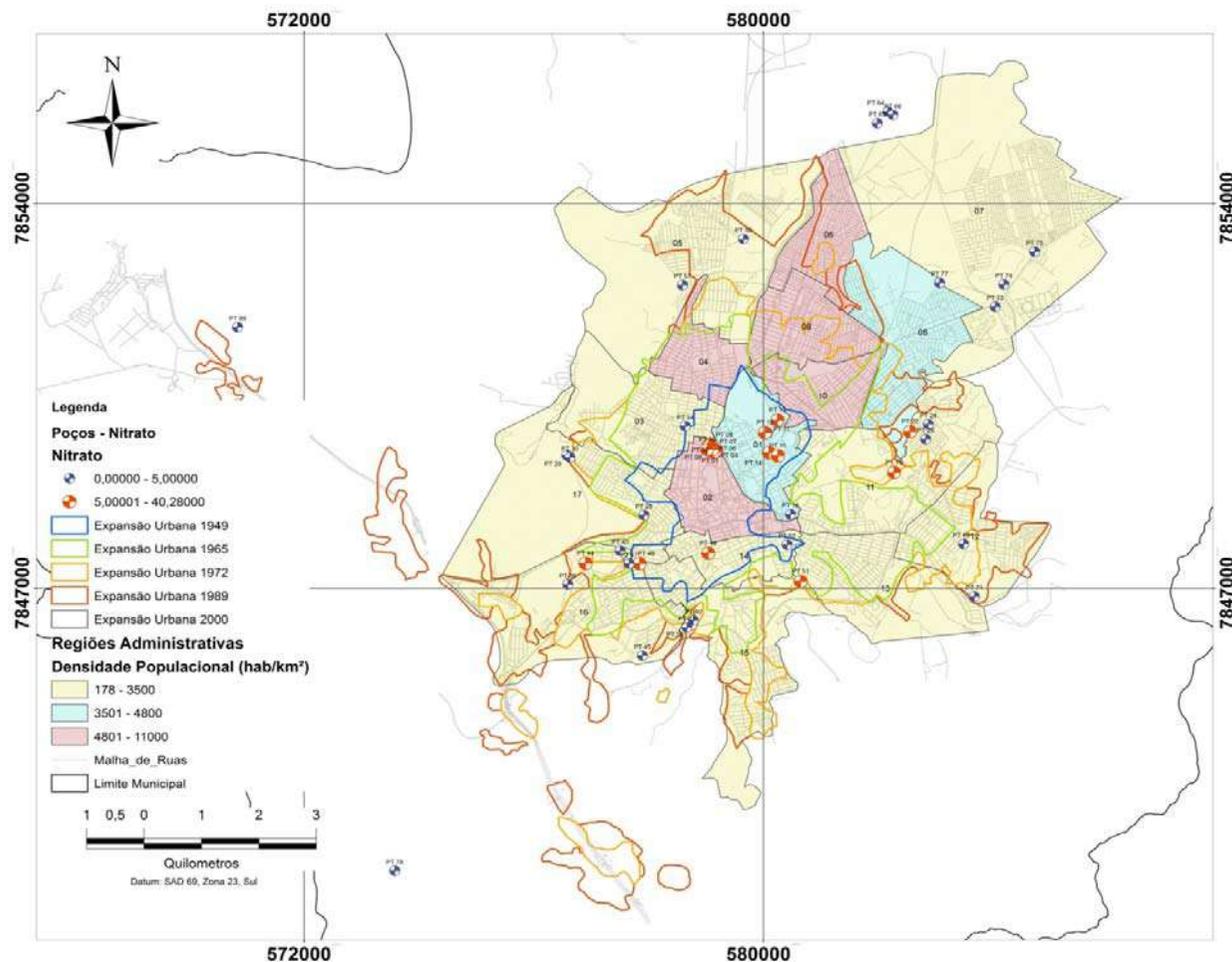


Figura 5.32 Densidade demográfica, por região administrativa, zonas de expansão urbana (anos 1949, 1965, 1972, 1989 e 2000) e ocorrência de nitrato.



Situação semelhante à descrita acima envolve os PTs 11 e 12, já que se localizam a 45 metros de distância e apresentam concentrações distintas para o parâmetro nitrato. Pela observação de seus perfis litoconstrutivos, nota-se que suas características são semelhantes, porém, nota-se que a única variação associada dentre os mesmos é a vazão de bombeamento (33 m³/h e 65,2 m³/h, respectivamente). Uma possível explicação para que o PT-12 apresente concentrações muito superiores que as do PT-11, pode estar ligada à vazão de bombeamento dos testes. Presume-se que, com o aumento da vazão, o raio de influência do cone de rebaixamento pode alcançar possíveis fraturas ou condutos que não seriam interceptados com vazões menores. Com isso, águas não contaminadas seriam bombeadas.

Problemas associados à qualidade natural das águas

As tubulações e conexões instaladas em áreas que possuem aporte de água do aquífero cárstico tendem a apresentar elevados índices de corrosão ou incrustação de minerais dolomíticos [CaMg(CO₃)₂]. Outro problema associado à geoquímica dessas águas é o índice de dureza (acúmulo, principalmente, de Ca²⁺ e Mg²⁺), principalmente as atividades industriais. Devido a isso, problemas como alto consumo de sabões, depósitos de sais em membranas e incrustações em caldeiras e tubulações são comuns.

De acordo com Custodio & Llamas (1983), a concentração total de íons alcalino terrosos na água, particularmente de cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺), são superiores às dos demais íons alcalino terrosos encontrados em águas naturais. De acordo com Von Sperling (1996), se atribui efeito laxativo, sabor e odor desagradável ao consumo humano quando ocorrem elevadas concentrações de CaCO₃ em água.

As águas carbonatadas podem apresentar a seguinte classificação (**Tabela 5.17**):

- Dureza temporária: chamada de dureza de carbonatos, é causada pela presença de bicarbonatos de cálcio e magnésio. Esta resiste aos sabões e provoca incrustações. A designação temporária é porque os bicarbonatos, pela ação do calor, se decompõem em gás carbônico, água e carbonatos insolúveis, os quais precipitam;
- Dureza permanente: chamada de dureza de não carbonatos, é devida à presença de sulfatos, cloretos e nitratos de cálcio e magnésio. Esta também resiste à ação dos sabões, mas não produz incrustações por serem seus sais muito solúveis na água, não se decompondo sob ação do calor; e



- Dureza total é a soma da dureza temporária e permanente, sendo expressa em miligrama por litro (mg/L) ou miliequivalente por litro (meq/L) de CaCO_3 (carbonato de cálcio).

Tabela 5.17 Classificação de durezas (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1983).

Tipo	Concentrações de CaCO_3 (mg/L)
Branda	< 50
Pouco dura	50 a 100
Dura	100 a 200
Muito dura	> 200

O valor máximo permitido pelo Ministério da Saúde determina, de acordo com a Portaria nº 2.914 de dezembro de 2011, que para o composto de CaCO_3 , a concentração não deve ultrapassar 500 mg/L.

Quando classificada como água dura, esta apresenta restrições de uso industrial (abastecimento de geradores de vapor, por exemplo), sendo então necessário o seu tratamento para a retirada de Ca^{2+} e Mg^{2+} , técnica esta conhecida por abrandamento, o qual pode ser realizado de duas maneiras: abrandamento por precipitação química e abrandamento por troca iônica (SILVA & CARVALHO, 2007).

A partir das concentrações obtidas por meio das alíquotas coletadas, o valor máximo registrado foi de 245,05 mg/L, (PT-51), enquanto que a menor concentração foi no PT-74, de 3,4 mg/L. A média geral foi de 107,8 mg/L, enquanto que a mediana foi de 112,6 mg/L. .

Dessa forma, tem-se (**Figura 5.33**):

- 01 poço (PT-51) classificado como “água muito dura”;
- 37 poços dentro do intervalo de “água dura”;
- 12 poços no intervalo de “água pouco dura”; e
- 06 poços inseridos no intervalo de “água branda”.

Conforme os resultados acima, foi possível correlacionar as classes de águas e as litologias encontradas na área de estudo. As “águas brandas” estão relacionadas a poços que estão instalados em rochas do aquífero cristalino, localizadas predominantemente no sudeste e sudoeste de Sete Lagoas.



As águas classificações como “pouco dura” e “dura”, representam poços que possuem sua zona de captação associada ao aquífero cárstico, nas porções central (urbana), oeste e norte do município.

Por fim, o único poço classificado como produtor de água “muito dura” (PT-51) possui algumas características particulares que podem sugerir uma dissolução direta e efetiva dos níveis calcários superiores à zona de captação, localizado próximo ao afloramento da Formação Sete Lagoas – Membro Pedro Leopoldo (detalhado no Capítulo 6), na porção SW da área urbanizada do município. Essa dureza da água pode estar relacionada à maior dissolução dos planos de acamamento da rocha carbonática aflorante.



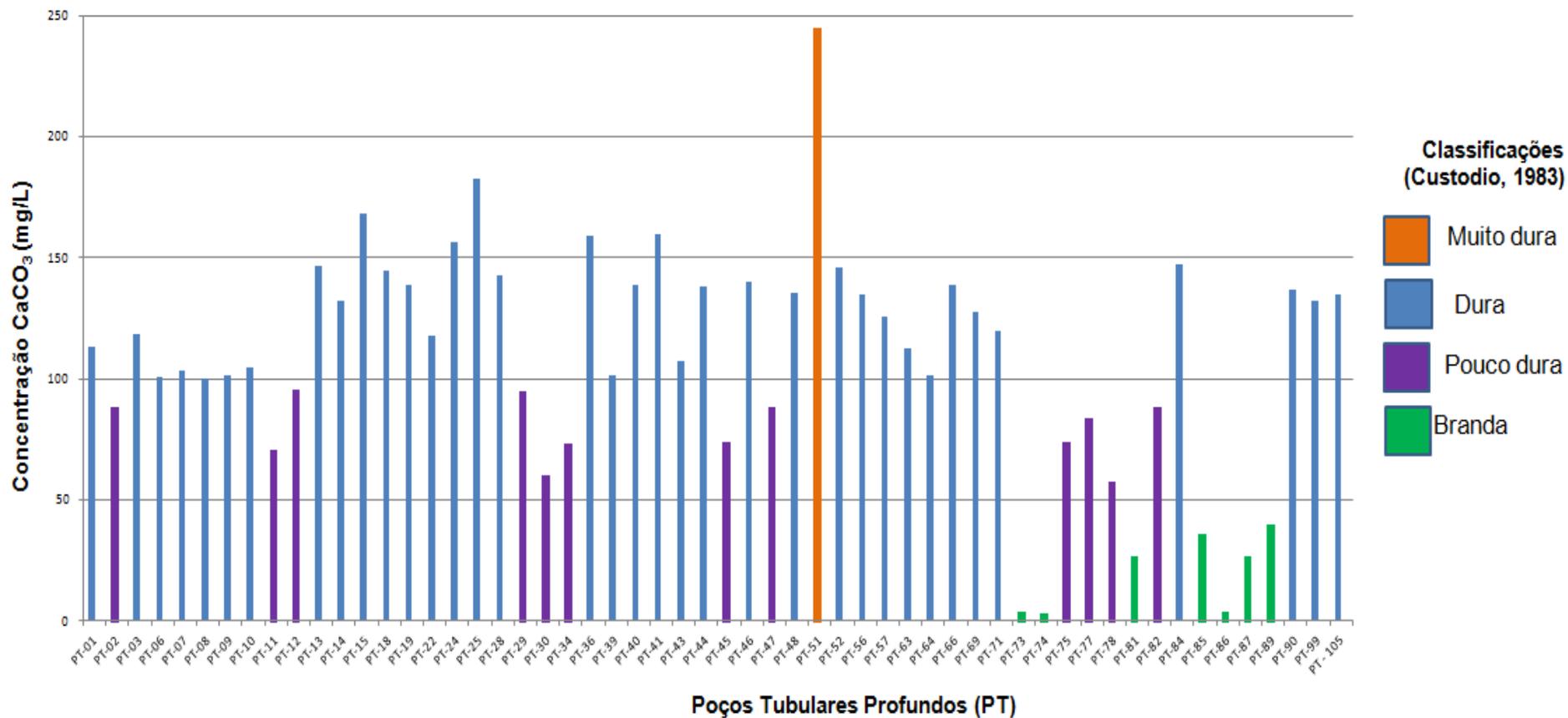


Figura 5.33 Gráfico de classificações de acordo com a relação das concentrações de CaCO₃ (mg/L) e poços tubulares profundos.



6 GEOLOGIA

O vínculo entre o mapa geológico com o modelo de circulação da água, os riscos à qualidade e quantidade e a compreensão de uso e ocupação do solo e do desenvolvimento geral do município compõem os critérios que são pretendidos para a Gestão de Recursos Hídricos de Sete Lagoas.

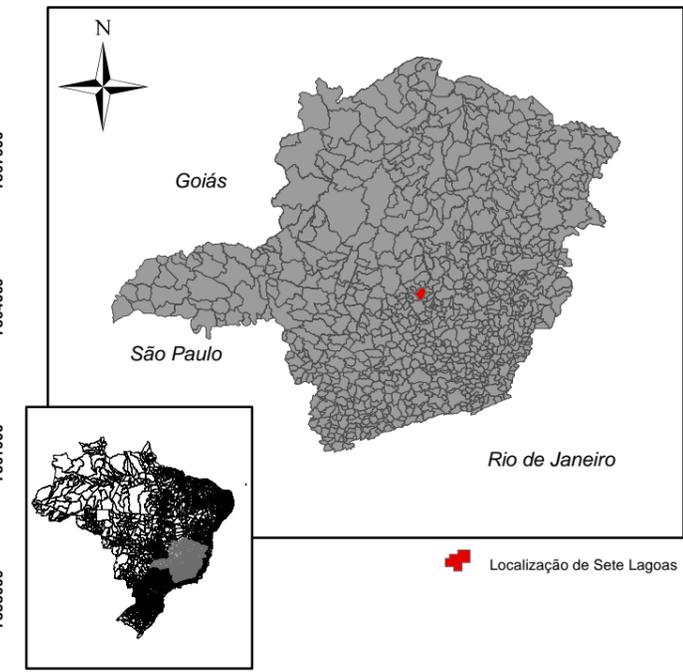
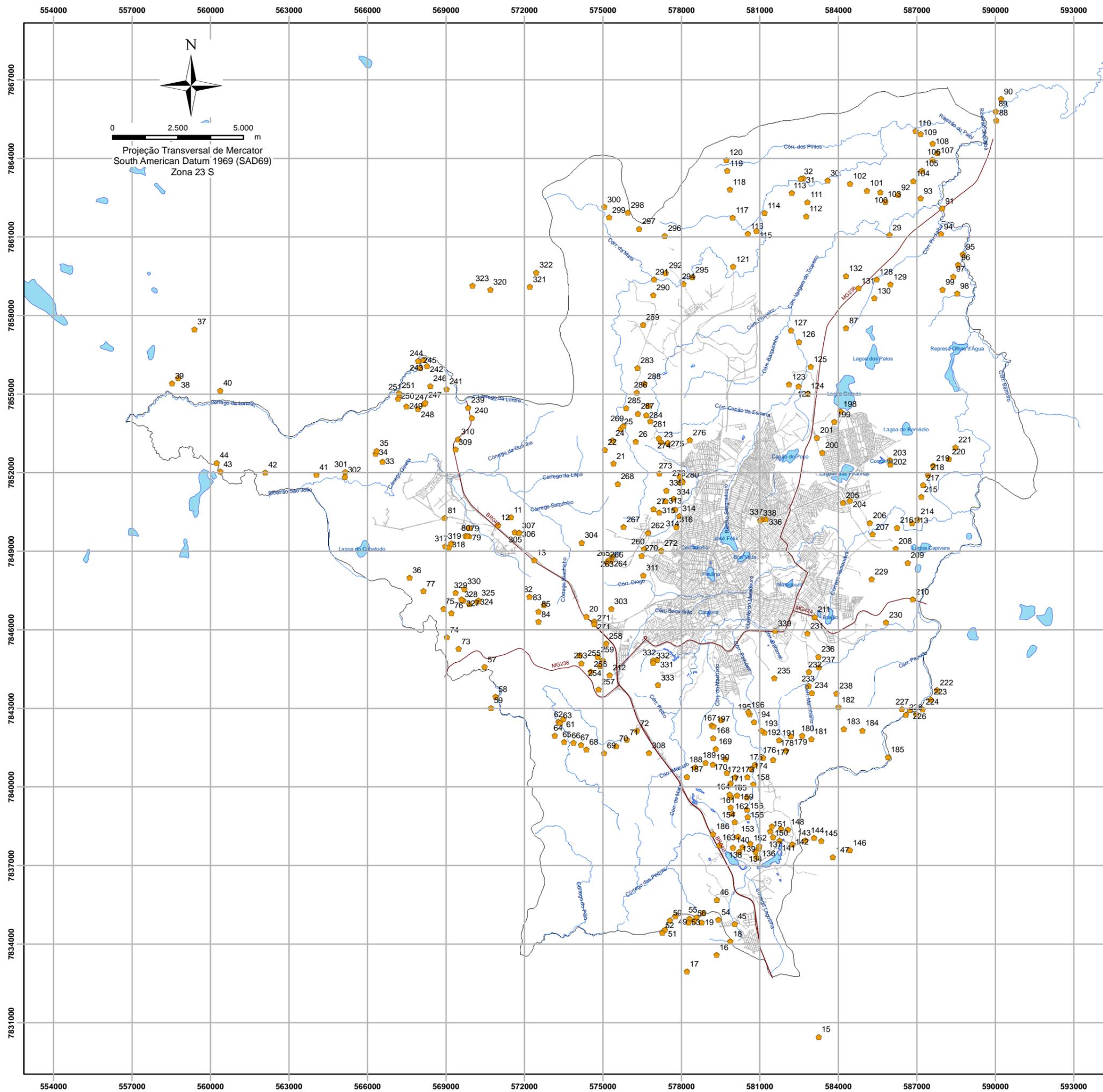
Para a confecção de mapas geológicos, são considerados todos os dados de mapeamentos anteriores como complemento ao mapeamento de campo feito no presente, e implica na avaliação crítica de todos os dados, para sua integração em um mapa final. Nessa etapa de mapeamento, deu-se ênfase aos aspectos geológicos relacionados à recarga do sistema aquífero cárstico, responsável pelo abastecimento do município.

A etapa prévia ao mapeamento de campo busca organizar um banco de dados com informações pertinentes às feições geológicas que serão observadas nessa etapa, a fim de se determinar a melhor metodologia para a compilação de um maior número de dados que contemplem o escopo inicial do trabalho. A partir disso, se busca a distribuição de pontos mapeáveis dentro da área. A sequência de atividades prévias a etapa de mapeamento foram:

- Interpretação de fotos aéreas na escala 1:40.000, distribuídas em 20 pares conjugados, confeccionadas originalmente pela CEMIG (Companhia Elétrica de Minas Gerais), no final dos anos 1970;
- Definição da malha de mapeamento – totalizou 339 pontos, cujas fichas de campo estão apresentadas no **Anexo VII**, denominados neste relatório como “wp” (abreviação a “*way point*”). A partir de cada ponto mapeado (wp), foi gerada uma ficha característica do afloramento, essas georreferenciadas em ambiente SIG (**Figura 6.1**).

As escalas de mapeamento definidas no escopo foram 1:25.000 e 1:10.000, o que implicaria teoricamente em malhas quadráticas de 250 x 250 metros e 100 x 100 metros, respectivamente. O mapeamento foi alcançado com a compreensão esperada sobre o modelo geológico da área, no entanto, sem a densidade de pontos desejada devido à falta ou descontinuidade de afloramentos disponíveis; urbanização dos terrenos; e restrições de acesso a determinadas regiões por fatores diversos.





- Legenda**
- WP - Pontos Mapeados
 - Lagoas
 - Rodovias
 - Malha de Ruas
 - Drenagem
 - Limite Municipal

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas, SIAGAS e IGAM

CONTRATANTE:		
PROJETO:		
TÍTULO:		ESTUDO HIDROGEOLÓGICO
ELABORADO:		Daniela Barbatl Osório
CONTRATO:	3988	
ESCALA:	1:145.000	
DATA:	DEZ/2013	

6.1 CARACTERIZAÇÃO LITOLÓGICA – UNIDADES MAPEADAS

As litologias mapeadas na área de estudo estão agrupadas em três unidades geológicas que serão descritas a seguir, a saber, os depósitos cenozoicos, as rochas das formações que localmente constituem o Grupo Bambuí e o embasamento cristalino caracterizado pelo Complexo Gnáissico-Migmatítico Belo Horizonte.

6.1.1 DEPÓSITOS CENOZOICOS

São os sedimentos de deposição recente, podendo ser originados *in-situ* ou *ex-situ*, por: sedimentação fluvial, arrasto por escoamento da água de chuva e por erosão gravitacional (“tálus”). Possuem composição quartzosa, podendo ocorrer oxidação de núcleos minerais, e concentração de matéria orgânica, bem como óxidos e hidróxidos.

As observações de campo permitiram relacionar as diferenças de granulometria e as características pedogênicas:

- Nitossolo: solos de granulometria argilo-arenosa, coloração marrom-avermelhada e se caracterizam por apresentar hábito “blocoso”. Seu plano de rompimento apresenta feição conhecida como “cerosidade”, resultado da concentração de grãos argilosos, dando a ele um brilho característico;
- Coberturas Detrito-Lateríticas: ricas em fragmentos e seixos quartzosos maduros, cimentados por matriz siltico-argilosa de coloração branco-amareladas;
- Argissolos: possuem horizontes bem desenvolvidos, com grãos bem selecionados de granulometria argila na base, gradando para grãos arenosos, também em caráter bem selecionado no topo;
- Latossolos: granulometria areia fina a areia grossa, com grãos bem cimentados por ocorrência de óxidos e argila agregados, além de possuir coloração vermelho-amareladas;
- Neossolo: solo incoeso, pequeno grau diagenético, matriz argilosa suportando granulometria variando entre areia, calhau e matacões; e
- Solos Aluvionares: constituídos por grãos areno-argilosos aluvionares, carregados por corpo fluvial, podendo variar a argilo-siltosa. Localmente, podem conter seixos e matacões (CPRM, 2003).



Por conta de processos de lixiviação, em especial de minerais feldspáticos e também ferromagnesianos, é comum encontrar núcleos de gibsita $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ e goetita $[\text{FeO}(\text{OH})]$, como resposta a processos de lixiviação e alteração de estrutura de tais minerais.

Também foi observado ocorrência de processo de “plintização”, ocorrendo a precipitação de íons de ferro sobre grão “nucleador”, com substituição química do grão envolvido pela precipitação ferrosa (**Foto 6.1**).

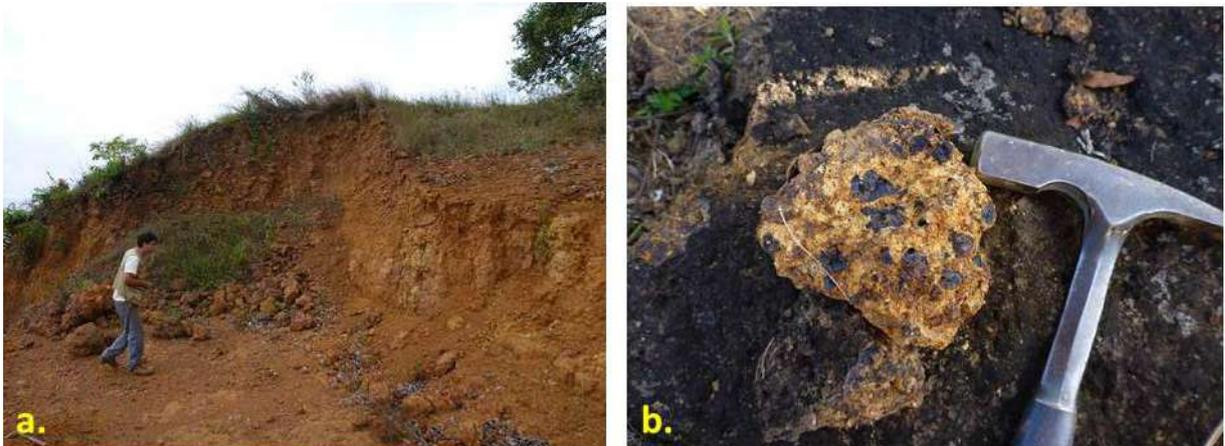


Foto 6.1 Observação de camada constituída de neossolo, rico em matacões e calhaus inconsolidados em matriz areno-argilosa em coloração marrom-amarelado (a). Demonstração de nitossolo, com destaque para substituição de grãos originalmente distintos por massas de gibsita e goetita (coloração negra) (b).

6.1.2 GRUPO BAMBUÍ

Na área de estudo o Grupo Bambuí encontra-se constituídos pelas formações Serra de Santa Helena e Sete Lagoas, sendo esta última subdividida nos membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo.

Formação Serra de Santa Helena

Estratigraficamente, é a porção superior de toda a sequência Neoproterozóica do Grupo Bambuí mapeada no município de Sete Lagoas. Apresenta litologia diversificada, onde



predominam litotipos de origem siliciclástica, com predomínio de sedimentos finos incluindo dos siltitos, argilitos e arenitos.

Os siltitos e argilitos apresentam-se em grande parte intemperizados, entretanto, é possível a visualização de níveis intercalados de rochas ardosianas com planos de clivagem bem desenvolvidos, em camadas delgadas, apresentando face sericítica de coloração cinza-esverdeada. Podem ocorrer grãos cúbicos de pirita, pouco desenvolvidos, associados aos planos de acamamento (clivagem) da mesma (**Foto 6.2**).



Foto 6.2.– Afloramento de rocha ardosiana representando leito de corpo de água, com evidência dos planos de clivagem paralelos ao acamamento (S0), além de sistemas de fraturas, apresentando-se em atitudes subverticais.

Na base, intercalados às rochas ardosianas, encontram-se siltitos e argilitos, apresentando-se muito friáveis, de acordo com seu plano de acamamento (S0), em intervalos variando entre 2 e 20 centímetros. Estas rochas estão intensamente influenciadas pelo tectonismo com destaque a duas feições:

- Fraturas verticalizadas, em caráter regional preenchidas por veios de quartzo. Seus cristais podem alcançar hábitos hexagonais bem desenvolvidos. Localmente, ocorrem veios pegmatíticos ricos em grãos feldspáticos e calcíticos, também associados a tais planos de fraturamento (**Foto 6.3**);
- Sistema de dobras bem desenvolvidos, visíveis planos de acamamento (S0) e foliação (Sn). A sua correlação no espaço indica sistemas de anticlinais, com flancos longos com mergulhos regionais para oeste (**Foto 6.4**).





Foto 6.3 Filito em nível sílto-argiloso com intenso grau de litificação (BR-040 – Sentido Bairro Lontrinha) (a); Intersecção de veios de quartzo em sistemas de fratura de atitude sub-vertical (Topo da Serra de Santa Helena) (b).



Foto 6.4 Exemplos de sistemas de dobras em distintos pontos da Formação Santa Helena, localizadas internamente na área da EMBRAPA: Dobra Recumbente (plano axial horizontal), em “a”. Em “b”, observa-se dobra simétrica com plano axial verticalizado, além dobra em “chevron”, destacada no item “c”.



Ao observar em microscópio amostra representativa da formação, nota-se o bandamento e a orientação dos grãos arenosos finos superiores (menores que 0,25 mm) e grãos arenosos muito finos inferiores (menores que 0,062 mm) da matriz, além de microfraturas preenchidas por quartzo. A composição modal é:

Em “a”: 40 % de quartzo na granulometria areia fina superior (Qz – Afs)

60 % de quartzo na granulometria areia muito fina inferior (Qz – Amfi)

Em “b”: 95 % de quartzo na granulometria areia fina inferior (Qz – Afi)

5 % de clorita (Cl)

Rocha argilo – arenosa (SHEPARD, 1954), apresentando acentuada clivagem ardosiana, como observado em **Foto 6.5**.

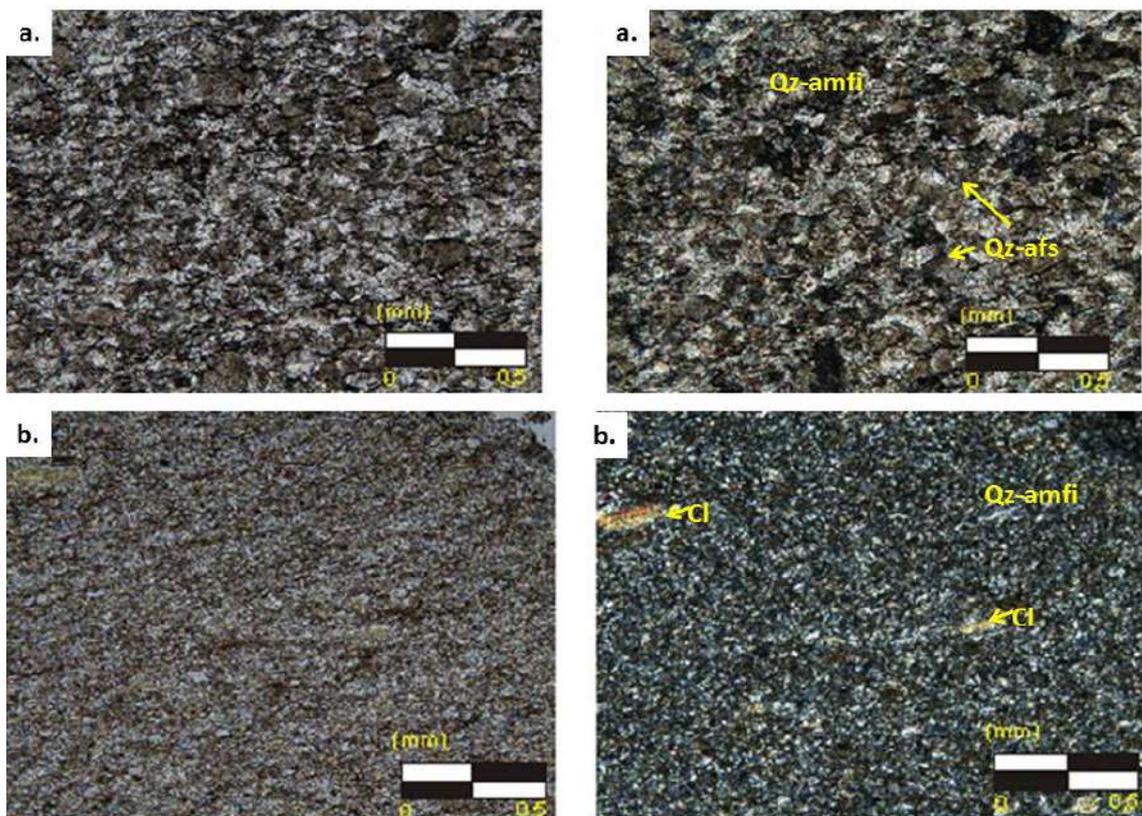


Foto 6.5 Lâmina oriunda de amostra coletada no ponto mapeado “270 (wp 270), em “a”, e 309, em “b” (wp 309).



Formação Sete Lagoas

A Formação Sete Lagoas é subdividida em dois membros, sendo: Membro Lagoa Santa, sotoposto estratigraficamente, ao Membro Pedro Leopoldo.

Membro Lagoa Santa

O Membro Lagoa Santa é inferior à Formação Serra de Santa Helena e é estratigraficamente superior ao Membro Pedro Leopoldo. Aflora na área central e oeste do município como resultado da combinação de direção de mergulho do acamamento (S0), mergulho do flanco curto do sistema anticlinal principal e a quebra topográfica, especialmente evidenciado nos sopés dos taludes íngremes da serra de Santa Helena (exemplo Gruta “Rei do Mato”)

De acordo com o projeto VIDA (CPRM, 2003), o Membro Lagoa Santa, é formado por calcário calcítico de coloração cinza-escuro, com textura homogênea, compacta, cristalinidade média e com veios de calcita recristalizados descontínuos. Os litotipos que a compõem são, basicamente, calcarenito, calcissiltito, esparito/microesparito, brechas e estromatólitos.

Observa-se uma subdivisão de fácies sedimentares, compostas em sua base por rocha de caráter variável, dentre microesparitos e calcarenitos de coloração cinza escuro, até evolução para níveis de ooesparitos (FOLK, 1959), *grainstones* (DUNHAM, 1962; EMBRY&KLOVAN, 1971) até ocorrências de níveis estromatolíticos do tipo *gymnosolens* (MARCHESE, 1974) (**Foto 6.6**).



Foto 6.6 Membro Lagoa Santa, com nível rico em oóides, caracterizando bioesparitos/*grainstone* em “a”; sobreposto por nível estromatolítico, rico em bioestruturas do tipo *gymnosolens*, sendo a rocha, também classificado como bioesparitos/*grainstone* (b).



As observações de campo indicam uma maior potencialidade de dissolução e criação de geomorfologia cárstica em fácies compostas por oobioesparitos. Tal característica se associa a composição química, uma vez que os teores de CaO variam entre 53 e 54% (CPRM, 2003). A dissolução diferencial é determinante para o desenvolvimento de discontinuidades que aceleram os processos de percolação de água, como pode ser observado na **Foto 6.7**.

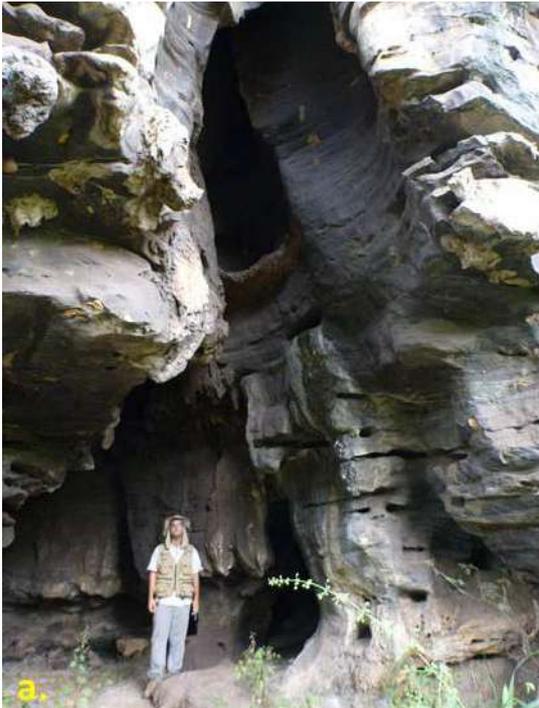


Foto 6.7 Formação Sete Lagoas – Membro Lagoa Santa: calcarenito de coloração cinza escura com desenvolvimento de galerias por dissolução da rocha (a), evidenciado preenchimento terrígeno em galeria de dissolução, evidenciando fluxo prévio de massas de água e sedimento (b).

As observações de campo permitiram sugerir que a feição determinante para o desenvolvimento de “galerias” é favorecido pelos planos de acamamento (S0) (**Foto 6.8**).





Foto 6.8 Porção centro-oeste da área: estruturas principais para determinação de vias de dissolução da rocha carbonática (Membro Lagoa Santa), pelos planos de acamamento (S0) em escala mesoscópia (a) e escala macroscópia (b).

Do ponto de vista geomorfológico, o Membro Lagoa Santa está vinculado à ocorrência local de surgências e sumidouros, (**Foto 6.9**).



Foto 6.9 Afloramento da Formação Sete Lagoas – Membro Lagoa Santa: localizado na continuidade de riacho no “Parque da Cascata”, evidenciando feição característica de sumidouro (a). No bairro “Portal da Serra”, há a ocorrência de feição caracterizada como surgência de água (b).

As feições de carstificação observadas indicam que o Membro Lagoa Santa não é saturado, não há fluxo permanente de água em seus dutos, porém, ainda possuem importante papel na comunicação da água superficial oriunda da infiltração para o aquífero inferior, conforme observado na etapa de perfilagem óptica (**Foto 6.10**).



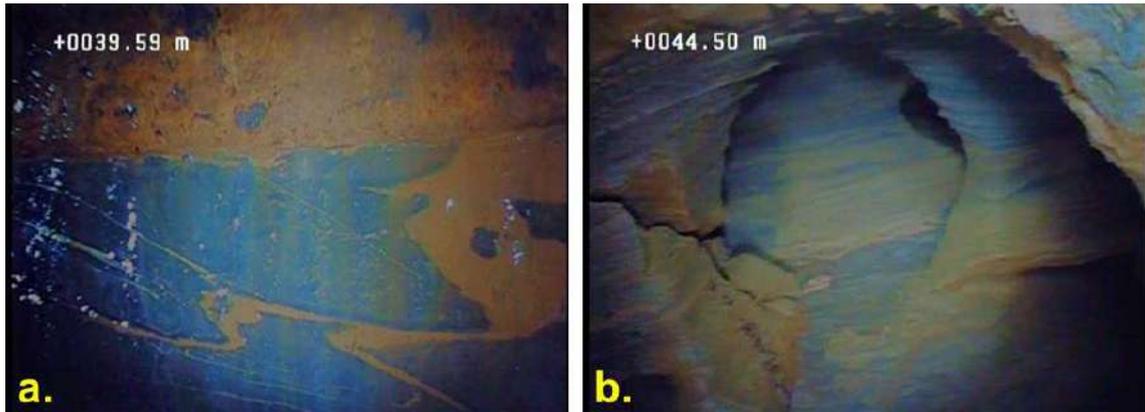


Foto 6.10 Fotos de níveis profundos no PT-105: destaque para caracterização de rocha carbonática cinza escura da Formação Sete Lagoas – Membro Pedro Lagoa Santa, contendo ducto de dissolução não saturado (inativo) preenchido por sedimentos terrígenos (a), e ductos circulares bem desenvolvidos e não saturados, demonstrado em b. o nível estático foi observado em 60,38 metros.

A composição modal encontrada nas rochas do Membro Lagoa Santa é de 55 % de Esparita – (Ep); 30 % de Oóides (Oo); e 15 % de Micrita – (Mc). Classificação da rocha: oobioesparito (FOLK, 1959); grainstone (DUNHAM, 1962; EMBRY & KLOVAN, (1971)), de acordo com a sequência de **Fotos 6.11**.



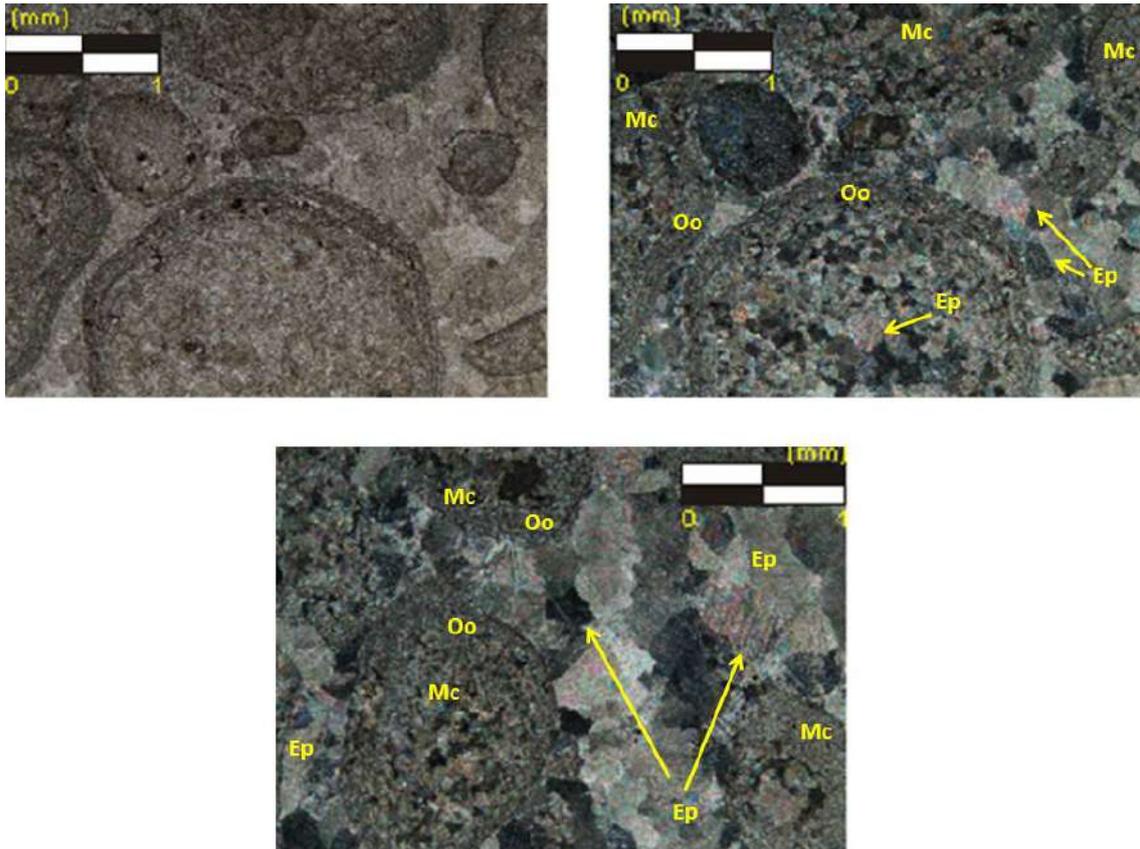


Foto 6.11 Lâmina oriunda de amostra coletada no ponto mapeado “270C” (wp 270C).

Membro Pedro Leopoldo

O Membro Pedro Leopoldo é inferior ao Membro Lagoa Santa e é disposto sobre rochas cristalinas do Complexo Belo Horizonte.

Os trabalhos de mapeamento pela equipe da Servmar permitiram confirmar as fácies litológicas consagradas na literatura CPRM (2003), e são:

Fácies A (Pedreira Canaã): localmente, apresenta-se em espessura decamétrica, com aproximadamente 40 metros de espessura. Trata-se de calcário micrítico com recristalização de grãos espáriticos, de maneira esparsa. Sua coloração é variável, entre tons cinza médio a escuro, com destaque para feições tectônicas como, com a geração de dobras recumbentes bem formadas, assumindo escala métrica. Destaca-se a recristalização e intercrescimento de minerais de calcita de forma paralela a S₀, em especial sob a linha de charneira (**Fotos 6.12. e 6.13**).



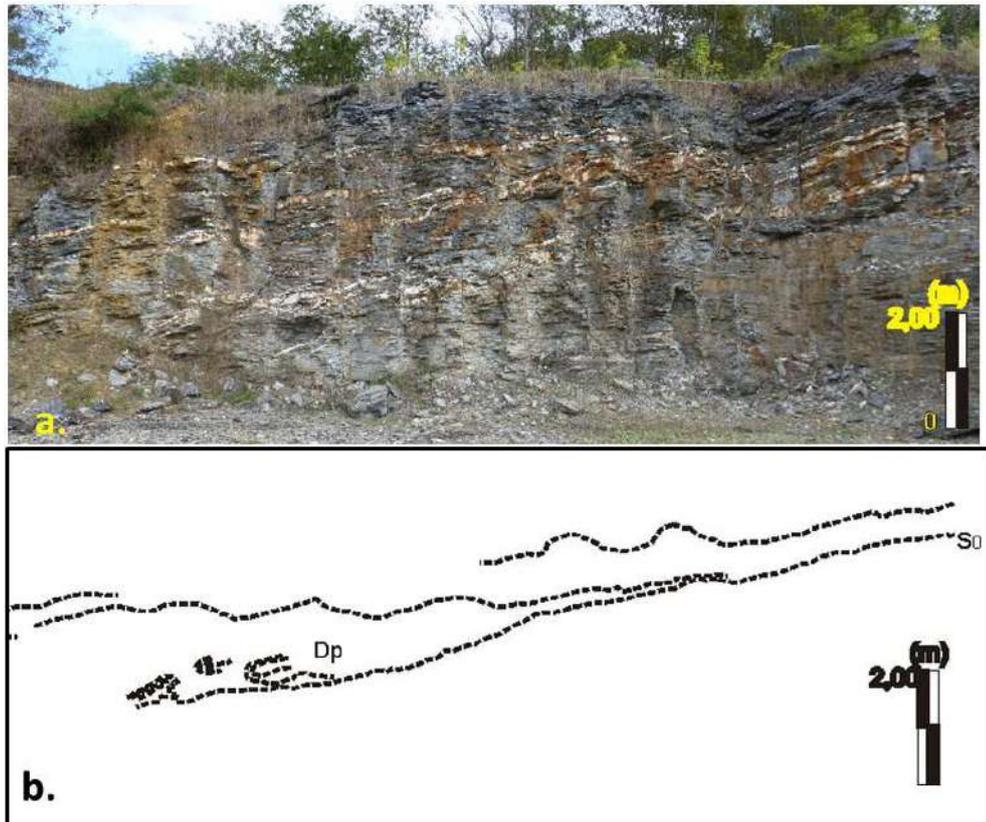


Foto 6.12 Padronização por intercrescimento de calcita a partir de plano de acamamento (S0), em “a”, com projeção dos planos correspondentes, na imagem “b”. Observa-se, também, sistemas de microdobras parasíticas (Dp) associadas à esforços de arraste.



Foto 6.13 Charneira de dobra recumbente, com destaque para o veios de calcita nos planos de acamamento (S0) e no plano axial da dobra.

Fácies B (Pedreira Ilcon): de maneira complementar aos principais afloramentos descritos junto ao Projeto Vida (CPRM, 2003), nota-se correlação da fácies classificada como “Riacho do Campo”, nas pedreiras localizadas na poção centro-norte do município de Sete Lagoas, em especial na “Pedreira da Palhada”, na BR-040 (próximo a “Resort JN”). Nela, observou-



se a intercalação de estratos micríticos de maneira regular e homogênea, com espessuras entre 15 e 20 centímetros, evidenciados pelos sistemas de acamamentos, e também destacável intercalação de níveis de margas de coloração marrom-roseadas com níveis de menor concentração de grãos terrígenos (**Foto 6.13**). Nota-se, também, a ocorrência de grãos milimétricos euédrais de pirita, com hábito cúbico bem desenvolvido (**Foto 6.14**).



Foto 6.13 Intercalação de níveis de marga (coloração marrom-amarelada) a níveis micríticos (coloração acinzentada), com destaque para as camadas rítmicas, com aproximadamente 20 centímetros de espessura – localizado em “wp 307”.

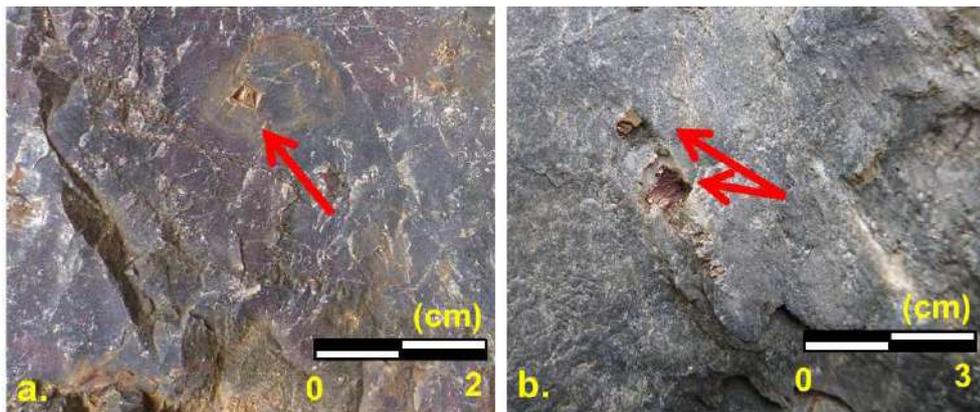


Foto 6.14 Destaque para grão euédrico de pirita associado a matriz micrítica (wp 75 em “a” e wp 235 em “b”).

Fácies C (Riacho do Campo): estão distribuídas nas porções central e oeste do município. São classificadas como rocha micrítica com ocorrência de minerais placóides de clorita,



dispostas em intervalos plano-paralelos de intervalos variáveis dentre 20 e 30 centímetros, sendo esses, evidenciados pelos planos de acamamento (S0), bem desenvolvidos e marcantes. Considerando-se as observações realizadas na Pedreira Sombra (MG-424), detalhou-se a ocorrência de cristais de aragonita em matriz micrítica, apresentando-se em destacáveis formas de “labareda” (ou “chamas”) sobre marcas de carga sedimentar, aparentemente de sedimento silto-arenoso, de coloração cinza claro, sobre matriz micrítica, de coloração cinza escura (**Foto 6.15**).



Foto 6.15 Face da Pedreira Sombra, com pseudomorfos arborecentes de aragonita em coloração avermelhada recobertos por micrito, de cor creme.

Vale destacar as macrofeições de dissolução assumindo planos verticais (atitude N037/72 – planos de fraturamento) (**Foto 6.16a.**). A mesma feição é observável na Pedreira Paraíso, sendo que sua correlação pode ser observada na **Foto 6.16b.**

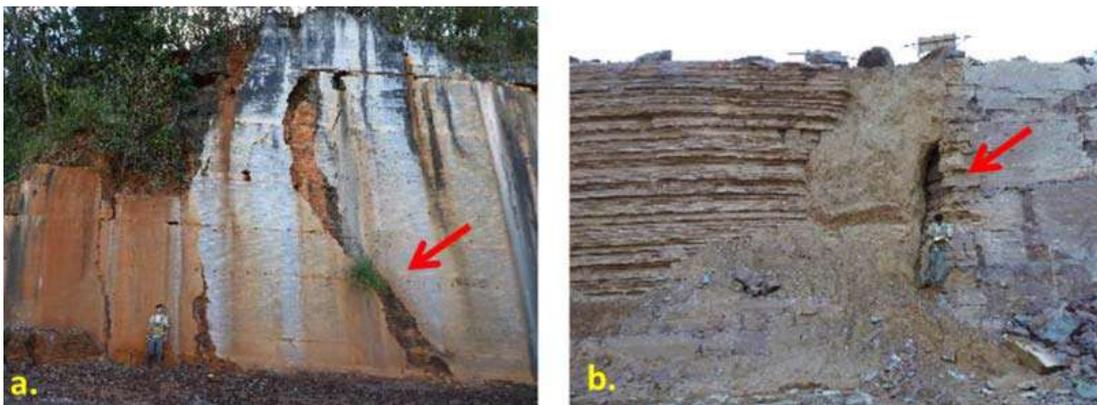


Foto 6.16 Destaque para planos de fraturamento verticalizados, evidenciados pela seta de coloração vermelha, tanto na Pedreira Sombra (a), quanto na Pedreira Paraíso (b), ambos preenchidos por sedimentos terrígenos.



Entre os municípios de Sete Lagoas e Paraopeba, há a ocorrência de afloramentos do Membro Pedro Leopoldo, onde se vêem planos de acamamento em intervalos de aproximadamente 30 a 40 centímetros, apresentando intercalações de planos milimétricos preenchidos por de metapelitos e cloritas.

À luz das observações de campo, o processo de dissolução de calcário acontece preferencialmente nos planos de acamamento (S0). Secundariamente, pela dissolução nos planos de fraturamento (F), em caráter vertical e sub-horizontal (conectados, geralmente pelo S0).

Observou-se, pontualmente, que alguns dutos estavam preenchidos por material terrígeno mal selecionado, sugerindo que houve fluxo pretérito de água meteórica que o transportou. Estes espaços hoje tem o potencial de serem caminhos preferenciais para a recarga, sendo visível a presença de umidade (**Foto 6.17**). Embora estas feições ocorram pontualmente, as mesmas, representam características gerais da formação.

O desenvolvimento do carste acontece de forma mais proeminente em superfície (afloramentos) ou em profundidades rasas (aproximadamente 50 metros de profundidade), como foi observado nas filmagens e perfis litoconstrutivos dos poços no centro do município (porção sul da área urbanizada).

Estruturalmente, os planos de acamamento respeitam orientações de flanco do sistema anticlinal principal, com flanco curto orientado a W/SW e flanco longo orientado a N/NE, evidenciando tendências de mergulho a N/NE. Consequentemente, pode ser deduzido que há o aprofundamento e espessamento do Membro Pedro Leopoldo em direção N/NE.





Foto 6.17 Destaque para planos de dissolução de rocha micrítica de forma paralela ao plano de acamamento (S0), com destaque para crescimento vegetal, indicando percolação recente de água superficial (a); e preenchimento de plano de dissolução por sedimentos terrígenos (b). Em “c”, evidencia-se a percolação de sedimentos terrígenos em plano de dissolução paralelo aos planos de acamamento, já em “d”, observa-se um “duto” de dissolução sem preenchimento (ambas localizadas na pedra do Sr. Aulus, próximo à pedra “Paraíso”).

A partir da descrição da lâmina da rocha tipo ao Membro Pedro Leopoldo, definiu-se sua composição modal por: 85 % Micrita – (Mc); 8% Esparita – (Ep); e 7% Quartzito (Qz).

Classificou-se a rocha como micrita espática (FOLK, 1959); micrita (DUNHAM, 1962; EMBRY & KLOVAN, 1971) (**Foto 6.18**).



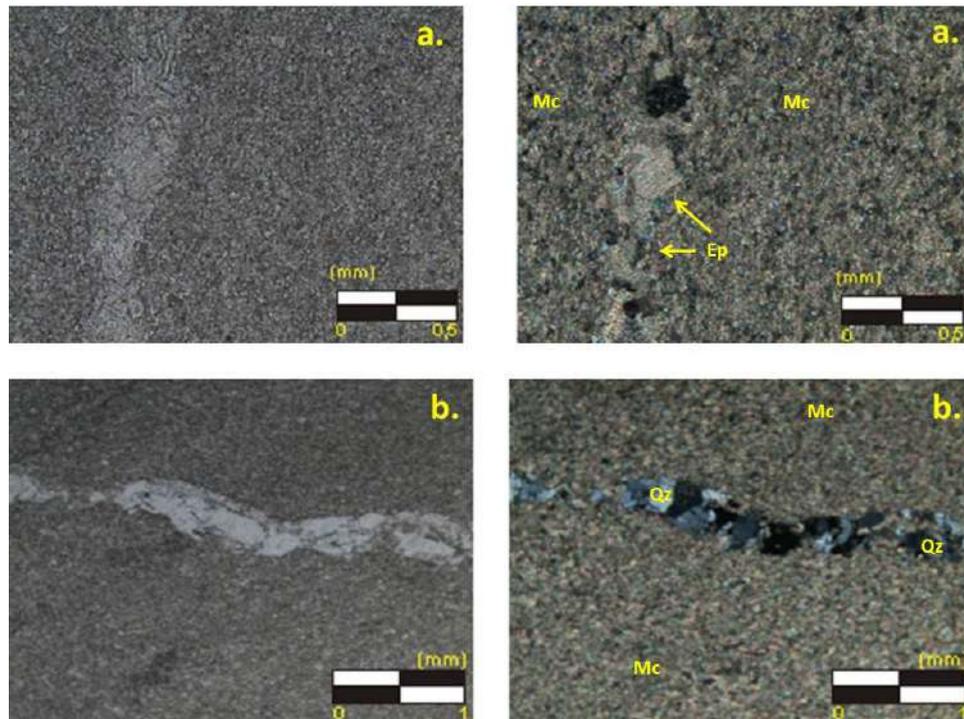


Foto 6.18 Lâmina de amostra coletada no ponto mapeado “235” (wp 235).

6.1.3 COMPLEXO GNÁISSICO-MIGMATÍTICO BELO HORIZONTE

É genericamente composta por rochas metamórficas epidogênicas e ígneas de caráter plutônico, podendo ocorrer, também intrusões efusivas de rochas máficas que preenchem, preferencialmente, planos de fraturamento. As rochas gnáissico-milonito-migmatíticas e granitos ocorrem nas porções SW e SE do município (**Foto 6.19**).

Foram observadas clivagens de xistosidade e de transposição bem desenvolvidas nas foliações primária e secundária (plano S/C) desenvolvendo-se segundo as fraturas de cisalhamento como resposta ao tectonismo.





Foto 6.19 Afloramento de rocha gnáissico-migmatítica do Complexo Belo Horizonte, em “a” (wp 059); além de destaque mesoscópico a feição migmatítica, em “b” (wp 197); para foliação S/C, em “c” (wp 66); e intrusão de corpo basáltico, em “d” (wp 51).

A lâmina analisada em microscópio apresenta a seguinte composição modal: 50% de quartzo – Qz; 25 % de plagioclásio (ortoclásio) – Fd; 5% biotita - Bt; e 20% de minerais acessórios (em especial biotita em intenso estágio de cloritização e sericita associadas, além de minerais opacos) – Ac. A partir disso a rocha foi classificada como um biotita monzogranito (**Foto 6.20**).



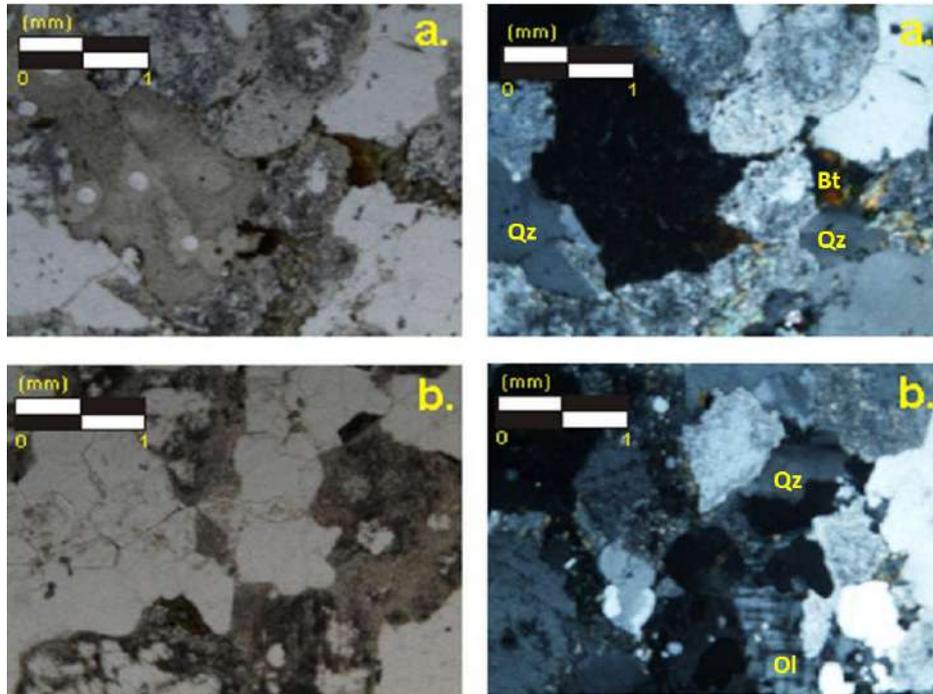


Foto 6.20 Lâmina oriunda de amostra coletada no ponto mapeado “196” (wp 196).

Vale a ressalva que a amostra analisada petrograficamente, representa uma determinada fácies inserida em um Complexo Indiferenciado. Desta forma, a mesma representa uma feição pontual, e não toda a sequência de rochas típicas dessa litoestratigrafia.

6.2 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL

O mapeamento geológico levou à caracterização estrutural da área de estudo, sendo abordada neste estudo a partir dos aspectos sobre a natureza dos contatos entre as litologias, bem como sobre o posicionamento e descrição das estruturas tectônicas encontradas.

6.2.1 NATUREZA DOS CONTATOS

Trabalhos anteriores sempre relacionaram os contatos litológicos da área a sistemas de empurrões. Entretanto, ao se avaliar as relações de contato, concluiu-se que as feições de empurrão não são tão evidentes, e sim por contatos litodepositacionais, controlados por



sistemas de dobras e mergulhos que se expressam localmente, com extensão e representatividade regional, do sistema de dobramentos principais.

Notou-se que a relação de contatos superior entre as formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena assumem vertente (ou tendência) geral para oeste, condicionando as ocorrências de afloramentos de rochas da Formação Sete Lagoas à intersecção das camadas subjacentes à rocha filítica e ardosiana, condicionadas a quebras da topografia local. Ao se observar a Formação Serra de Santa Helena, destaca-se a vertente de mergulho geral suave para norte, além de complexos sistemas de dobramentos.

Observando-se a Formação Sete Lagoas, notou-se que o contato entre os membros Pedro Leopoldo (basal) e Lagoa Santa (superior) ocorre de maneira abrupta, horizontalizada e bem definida.

O Membro Lagoa Santa possui sigmóides deformacionais, evidenciando etapa em que a rocha possuiu caráter de natureza dúctil, conforme observado na **Foto 6.21**.

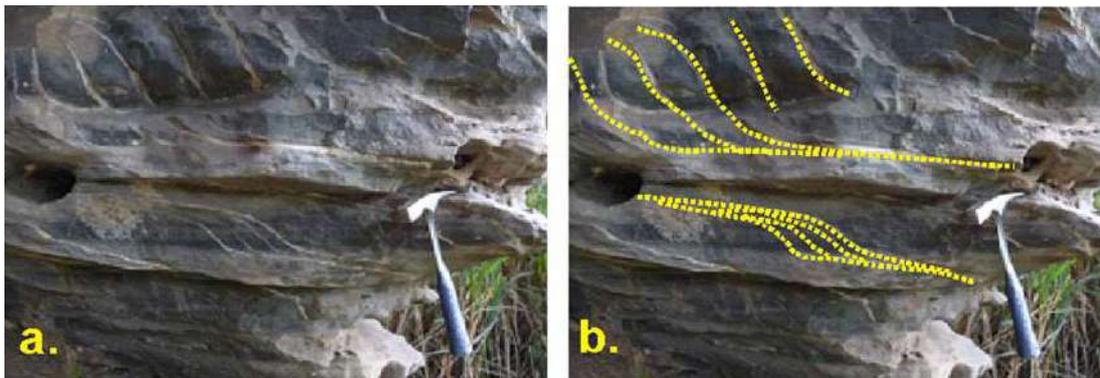


Foto 6.21 Destaque para sigmoide deformacional em afloramento da Formação Sete Lagoas – Membro Pedro Leopoldo, em “a”; e seu destaque, em “b” (wp 82).

Na relação de contato entre a Formação Sete Lagoas e Formação Serra de Santa Helena, na forma de dobramentos suaves, de baixo ângulo, e bem definidos. Tal feição normalmente se desenvolve preferencialmente em rochas de acamamento proeminente, sendo essa uma característica associada a rochas de natureza ardosiana e filítica da Formação Serra de Santa Helena, e também a fases de comportamento dúctil das rochas calcárias da Formação Sete Lagoas.



A geometria resultante do processo de dobramento é do tipo “*kink bands*”, com sistema visível e destacado na **Foto 6.22**, indicando de “a” para “b” e “c” para “d”).

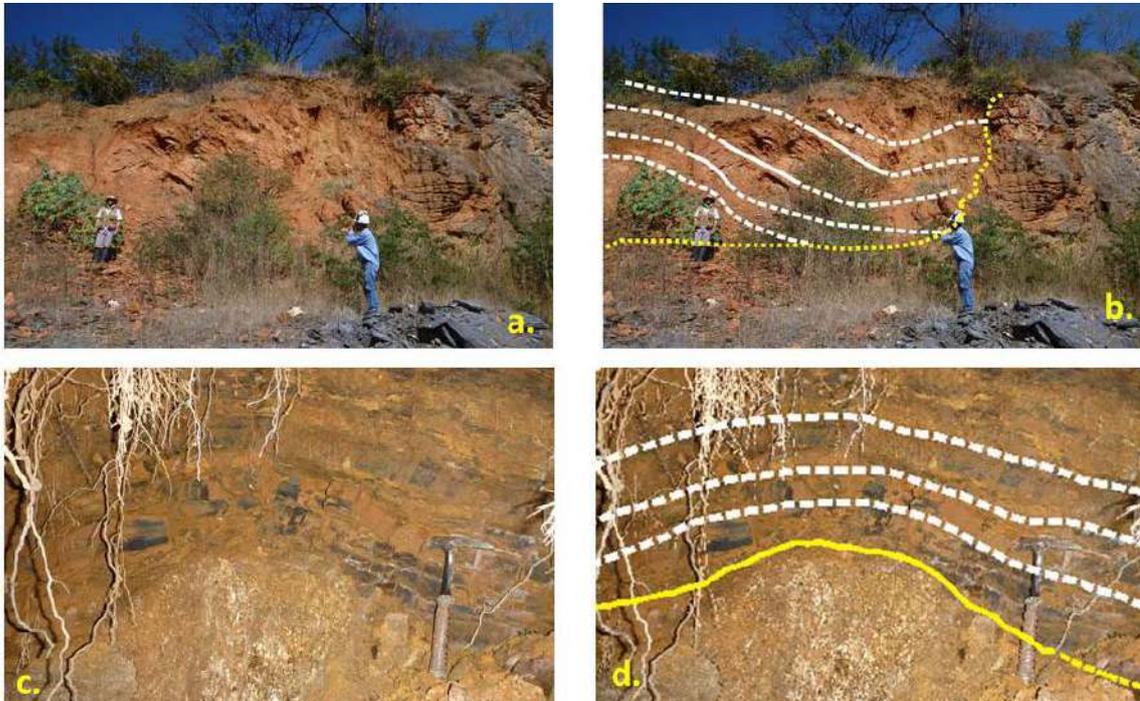


Foto 6.22 Contato deposicional abrupto entre a Formação Serra de Santa Helena (topo) e Formação Sete Lagoas (base), em “a”; com evidências de natureza dobrada em sistema de “*kink bands*”, em “b”. A mesma feição também é apresentada na relação de fotos “c” e “d”, na relação Complexo Belo Horizonte (base) e Formação Serra de Santa Helena (topo).

6.2.2 PROJEÇÕES ESFEREOGRÁFICAS E GEOLOGIA ESTRUTURAL

Foi adotada a rede de *Wulff* como ferramenta de representação gráfica numa esfera equatorial das medidas de campo da estrutura de interesse (acamamento e/ou foliação).

Para tentar explicar a percolação da água de recarga dos aquíferos cársticos, partiu-se de uma premissa relativamente simples: compreender a estrutura geológica das formações mapeadas. Os critérios de análise esfereográfica foram:

- Lançamento na rede esfereográfica de todas as medidas estruturais de campo segregadas em plano, eixo e fratura;



- Distinção de cada medida por unidade litológica; e
- Análise das projeções, tomando como premissa, o julgamento de campo quanto à importância relativa das diferentes estruturas na percolação da água de infiltração.

Formação Serra de Santa Helena

As feições estruturais mostram um comportamento dúctil e rúptil, como consequência da evolução tectônica regional. As estruturas observáveis podem ser subdivididas em:

Planos de acamamento (S0) que predominam frente aos planos de fraturamento. Foram medidas 185 atitudes. A atitude de maior frequência foi N060/03 (15% das medidas). Cabe destacar a importância de 6 medidas relacionadas ao que se interpreta como eixos de dobras com atitudes principais N009/13. Destaca-se o eixo de atitude N118/10 como representativo ao modelo estrutural proposto neste relatório, com tendência principal do flanco longo da dobra com planos de mergulho orientados a norte e baixo ângulo de caimento (**Figura 6.2**).

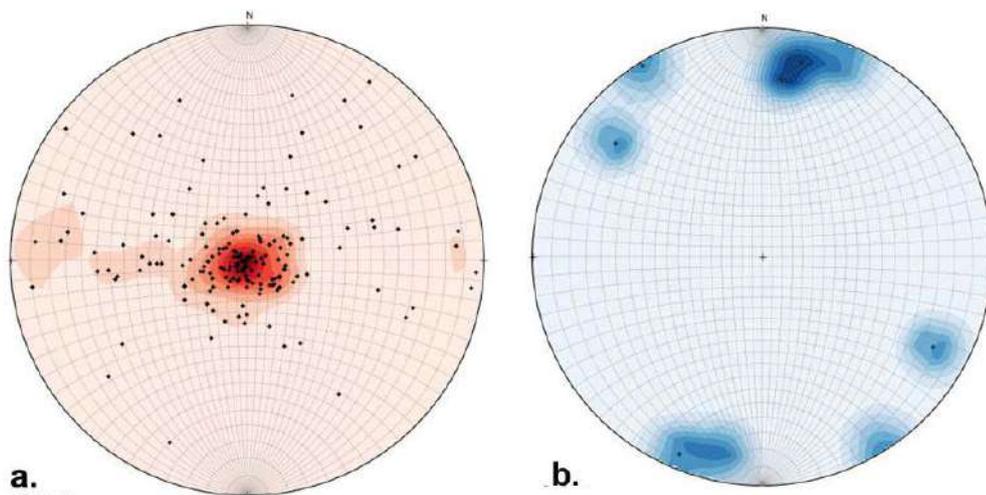


Figura 6.2 Relação dentre planos de acamamento (S0), em “a”; e eixos de dobra, em “b”, mapeados em afloramentos da Formação Serra de Santa Helena.

Planos de Fraturamento (F) que possuem importância secundária na hierarquização de estruturas geológicas associadas à Formação Serra de Santa Helena. Foram realizadas 64 medidas, mostrando que os planos de fraturamento possuem caráter vertical. A atitude



característica foi N013/77 (cerca de 13% das medidas), seguindo orientação ESE – WSW, de acordo com a **Figura 6.3**.

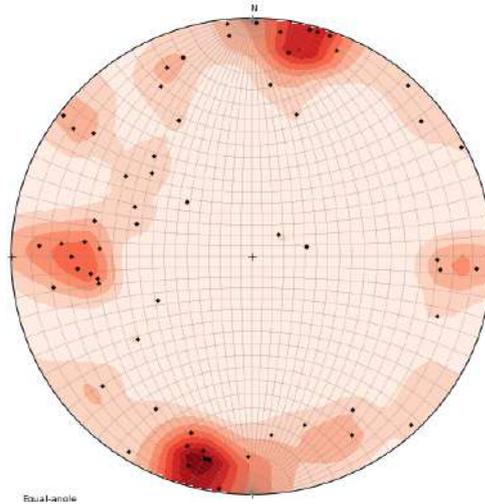


Figura 6.3 Relação dentre planos de fraturamento mapeados em afloramentos da Formação Serra de Santa Helena.

A interpretação dos planos S0 de acamamento leva a crer que estes poderiam funcionar como condicionantes ao possível escoamento subterrâneo de água. Entretanto, ao se considerar as granulometrias associadas às rochas típicas, e também a existência de grãos de quartzo tanto em planos de acamamento, e o a ocorrência de veios pegmatíticos em fraturas, considera-se que a percolação da água é baixa. Tal ocorrência é característica da área de estudo, podendo ou não ocorrer em escala regional.

Formação Sete Lagoas - Membro Lagoa Santa

Devido à evolução geológica, as rochas calcárias escuras constituintes da porção superior da Formação Sete Lagoas desenvolveram-se planos de acamamento bem marcantes. Foram realizadas 07 medidas referentes aos planos de acamamento (S0), a atitude característica é N060/24. Foram coletadas 03 medidas representativas aos eixos de dobra. A maior frequência de medidas se associa a atitude N360/13, conforme observado na **Figura 6.4**.



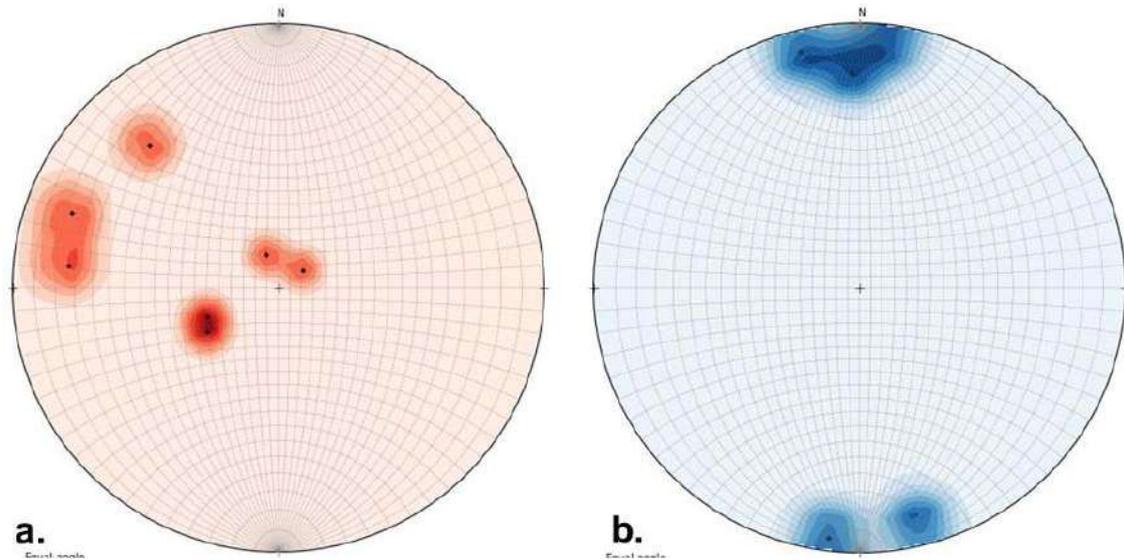


Figura 6.4 Relação entre planos de acamamento (S0), em “a”; e eixos de dobra, em “b” medidos em afloramentos da Formação Sete Lagoas – Membro Lagoa Santa.

A projeção das atitudes de planos de acamamento principais junto aos eixos medidos indicou a tendência de mergulhos dos planos de acamamento rumo W com vertente projetada a NE. Tais características explicariam a ocorrência dos afloramentos do Membro Lagoa Santa, aos baixos topográficos e também ao fato de se concentrarem na porção centro-oeste do município.

Formação Sete Lagoas - Membro Pedro Leopoldo

Foram realizadas 54 medidas referentes aos planos de acamamento, com tendências principais a N180/04 (27% das medidas). Associadas aos planos de acamamento foram medidas 03 atitudes referentes a eixos de dobra, sendo que a principal atitude foi N052/00, **Figura 6.5.**



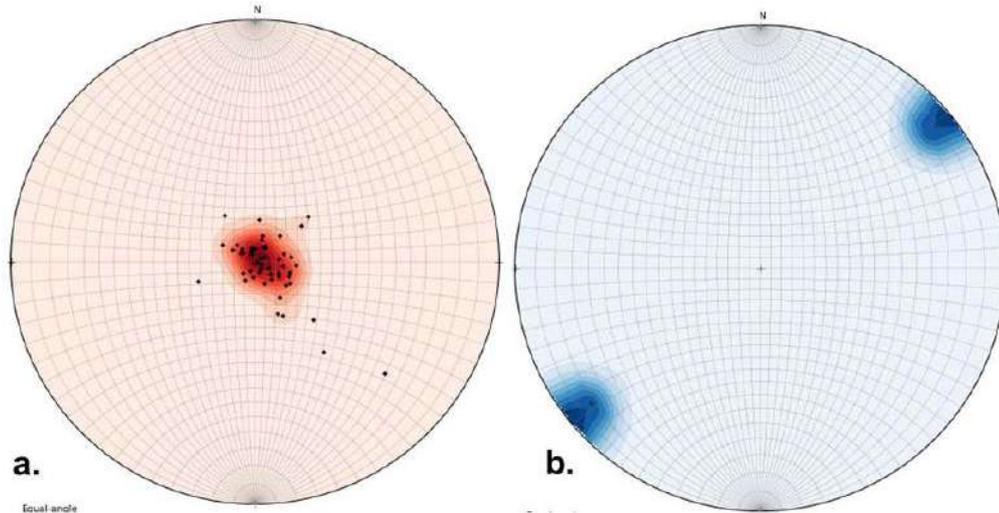


Figura 6.5 Relação entre planos de acamamento (S0), em “a”; e eixos de dobra, em “b”; medidos em afloramentos da Formação Sete Lagoas – Membro Pedro Leopoldo.

A partir da atitude N180/04, associada ao eixo com orientação NE (N052) e mergulho horizontal, pode ser inferida a ocorrência de um sistema anticlinal principal. Entretanto, ao se projetar planos de acamamento orientados em direção norte, variando de N338/05 a N028/10, se interpreta um mergulho sutil a N, com tendências de prolongamento a NW.

Planos de Fraturamento (F): foram coletadas 03 medidas, com atitude vertical média de N092/67 (**Figura 6.6**).

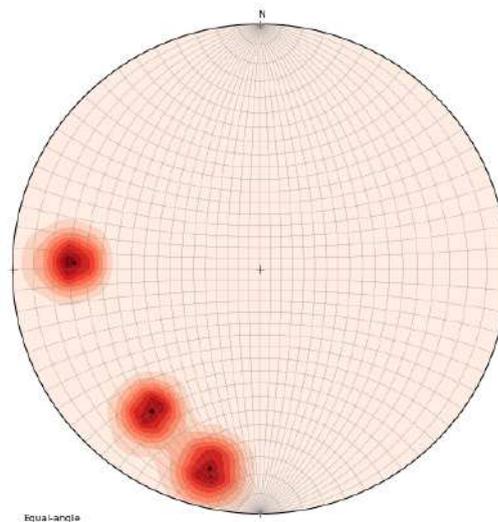


Figura 6.6 Distribuição estereográfica de tendência de planos de fraturamento na Formação Sete Lagoas- Membro Pedro Leopoldo.



Complexo Gnassico-Migmatítico Belo Horizonte

As principais estruturas relacionadas à possível percolação e fluxo de água no Complexo Belo Horizonte são as desenvolvidas no sistema de fraturamento, ocorrendo essencialmente de forma conjugada.

Foram obtidas 10 medidas relacionadas ao sistema de fraturamento. Predominam planos de caráter verticalizado, orientados a NNW/SSE, de atitude principal N347/83, e também planos ortogonais ao plano principal, de orientação ENE/WSW (atitudes principais de N170/84 e N260/89), conforme observado na **Figura 6.7**.

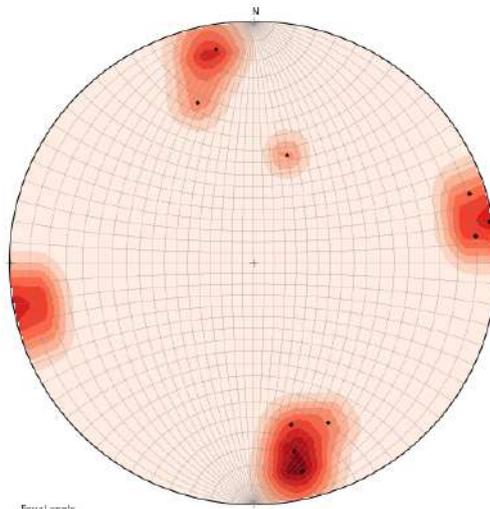


Figura 6.7 Relação entre planos de fraturamento principais observados junto a rochas do Complexo Belo Horizonte, com destaque para planos verticalizados de orientações conjugadas ortogonalmente em NNW/SSE e ENE/WSW.

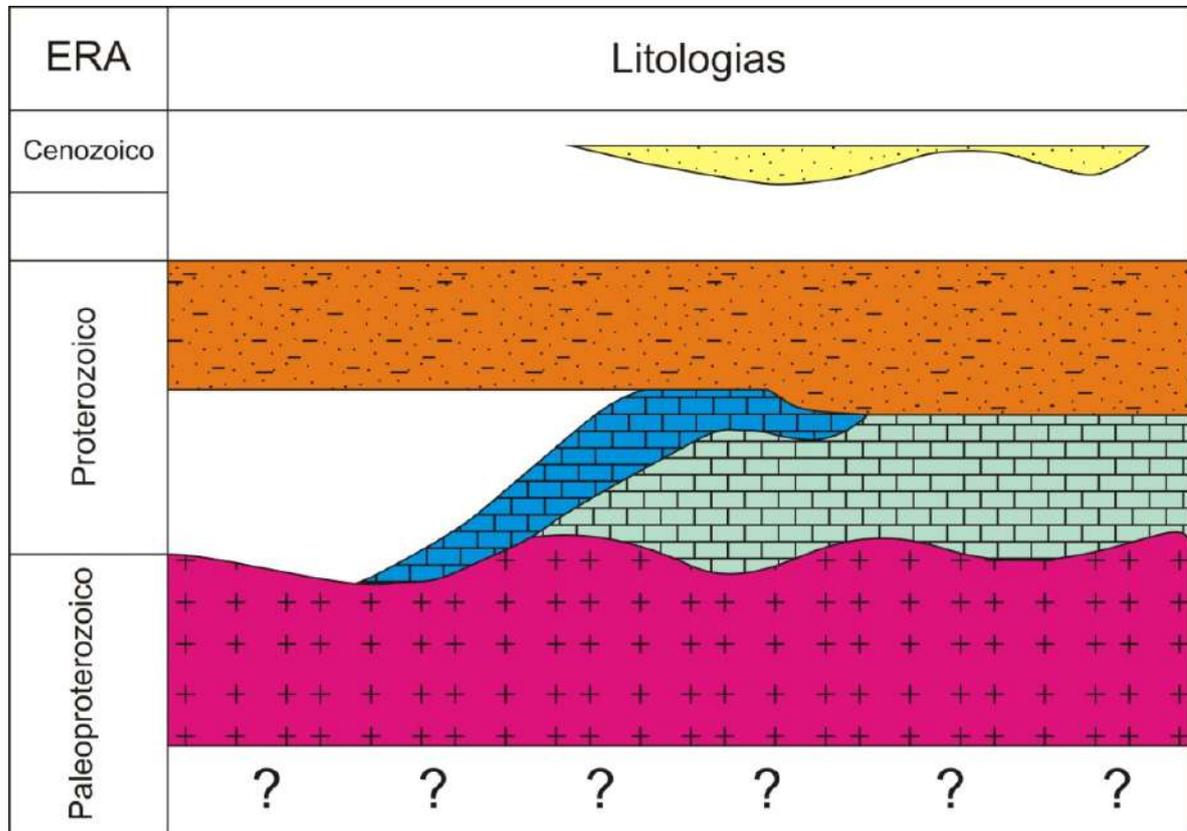
6.3 INTERPRETAÇÃO ESTRATIGRÁFICA E MAPA GEOLÓGICO

A interpretação dos dados acima, em especial sobre a relação de contatos topo/base das distintas litologias associadas às tendências estruturais, proporcionaram uma nova compreensão em relação lito-estratigrafia geral da área (**Figura 6.8**), sendo proposta a seguinte sequência estratigráfica:

- Contato deposicional em caráter suavizado entre rochas do Grupo Bambuí junto ao Complexo Belo Horizonte;
- Existência de hiato deposicional de rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas na área sul do Município e por consequência deposição direta de rochas da Formação Serra de Santa Helena sobre o Complexo Belo Horizonte;



- A distribuição do Membro Lagoa Santa é pequena e condicionada à sua situação estrutural: sua ocorrência é representada somente por seu flanco W (flanco curto);
- Distribuição de rochas da Formação Serra de Santa Helena de maneira proeminente e ampla por toda a área de estudo, com destacável espessamento a N da área.



Legenda

-  Depósitos cenozoicos
-  Formação Serra de Santa Helena
-  Formação Sete Lagoas - Membro Lagoa Santa
-  Formação Sete Lagoas - Membro Pedro Leopoldo
-  Complexo Gnáissico-Migmatítico Indiferenciado Belo Horizonte

Figura 6.8 Sequência estratigráfica clássica proposta na sequência Norte – Sul do Município de Sete Lagoas



O mapeamento geológico somado às compreensões da geologia de subsuperfície advindas dos dados de poços do cadastro do SIAM, dos relatórios de poços do SAAE e das atividades de perfilagem ótica executadas neste estudo que contribuíram com as interpretações acerca da geologia estrutural e das relações estratigráficas, embasaram a confecção das seções geológicas apresentadas na **Figura 6.9**. Essas seções subsidiaram a elaboração do mapa geológico (**Figura 6.10**), bem como a compreensão do modelo geológico e hidrogeológico da área de estudo.

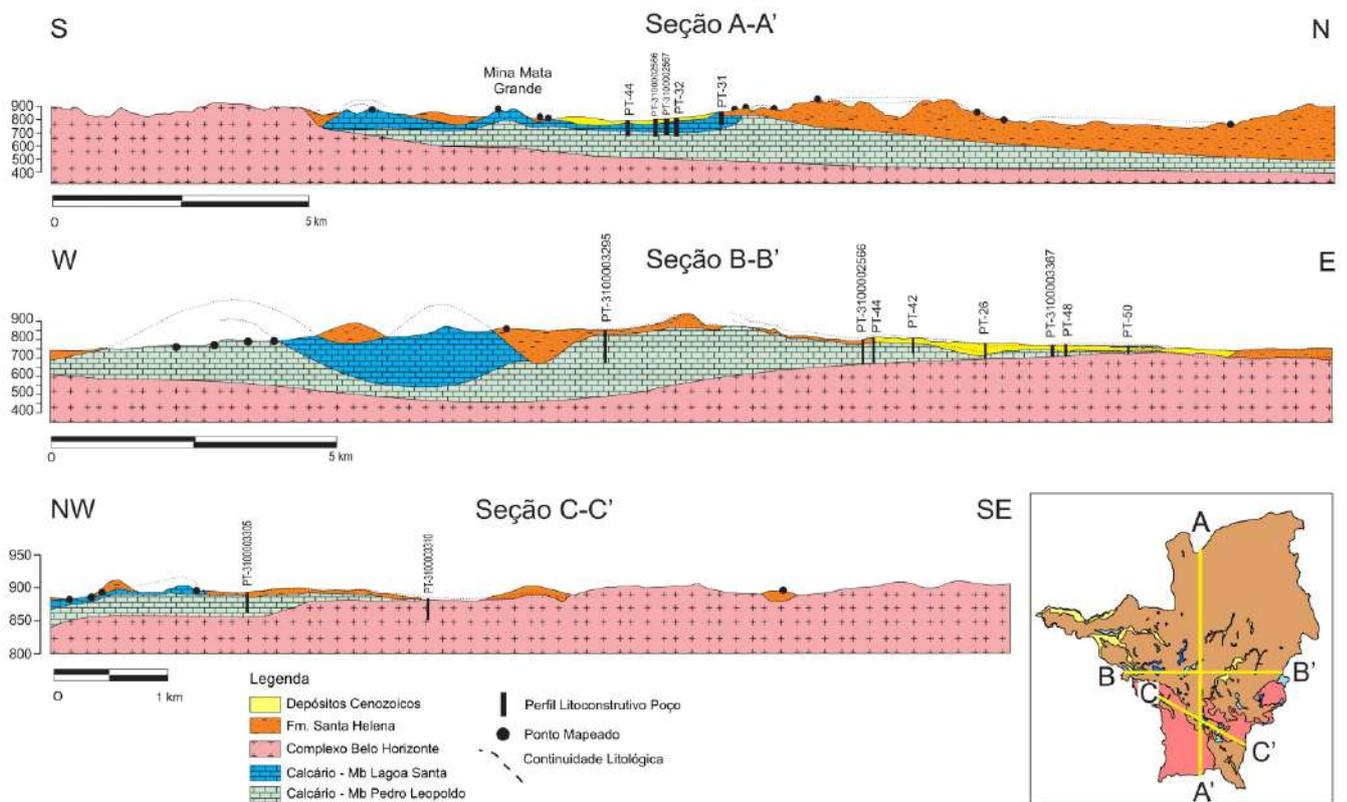
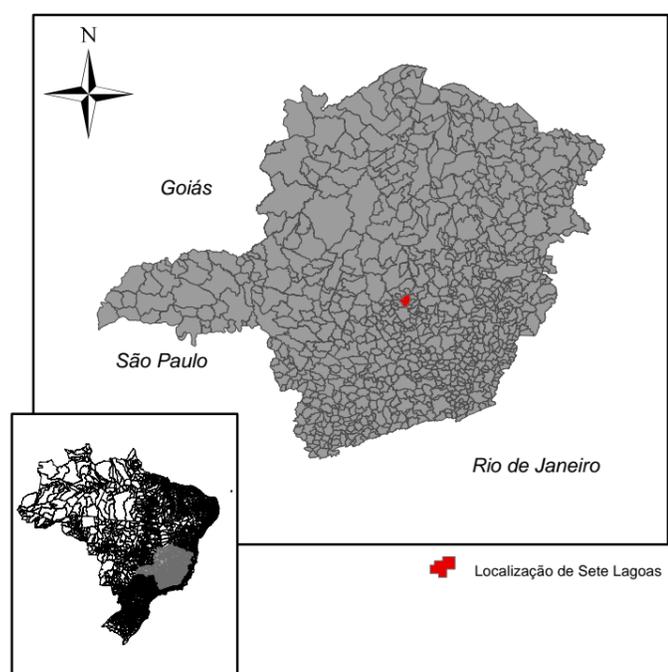
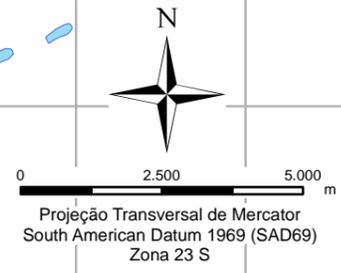
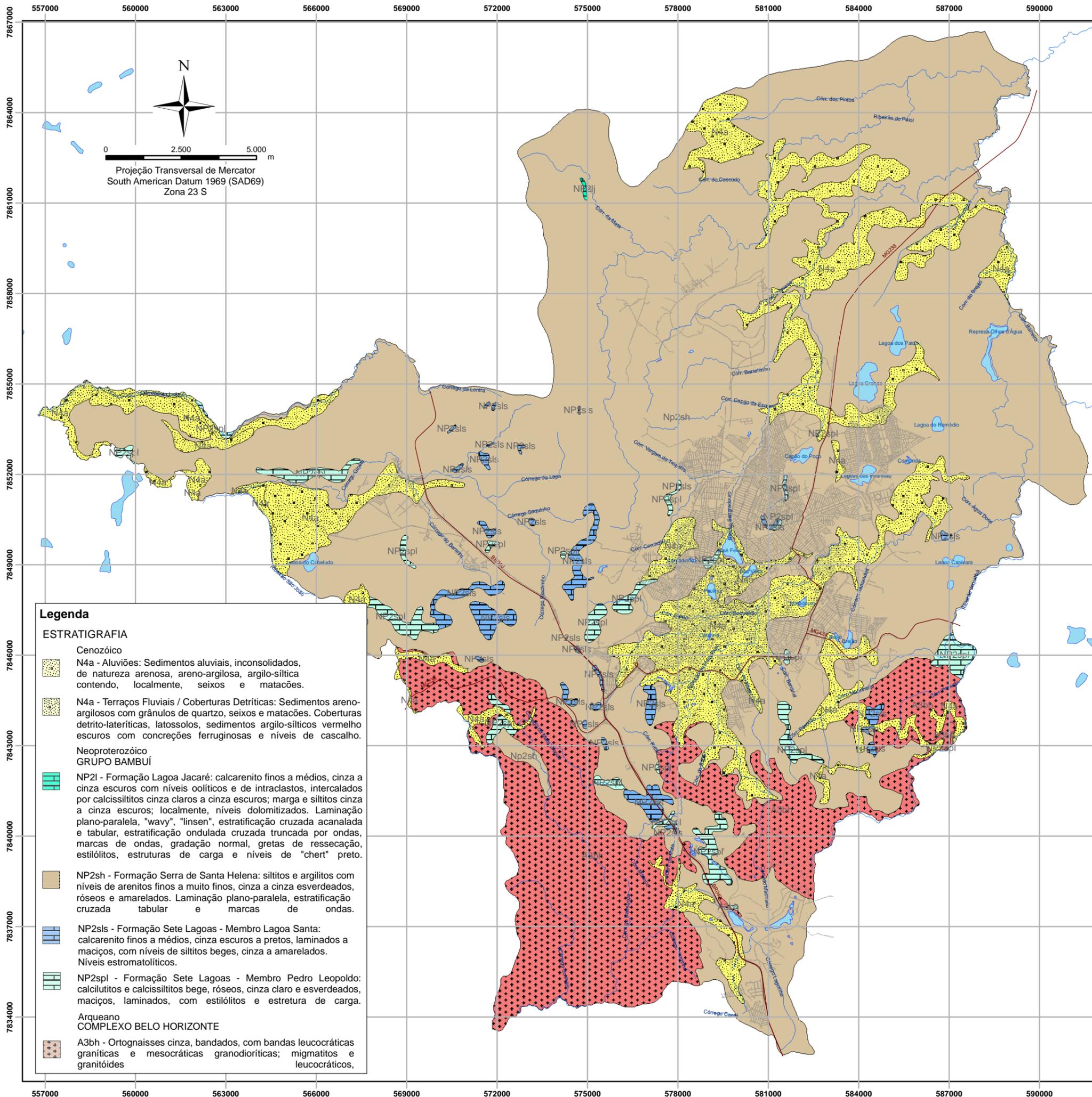


Figura 6.9 Seções geológicas da área estudada

Em atendimento aos requisitos de escala previstos neste estudo, o mapa geológico é apresentado também no **Anexo I** em cartografias nas escalas 1:25.000, na área rural, e 1:10.000, na área urbana.





Legenda

- Lagoas
- Rodovias
- Malha de Ruas
- Drenagem
- Limite Municipal

Legenda

ESTRATIGRAFIA

- Cenozóico**
- N4a - Aluviões: Sedimentos aluviais, inconsolidados, de natureza arenosa, areno-argilosa, argilo-siltica contendo, localmente, seixos e matacões.
- N4a - Terraços Fluviais / Coberturas Detríticas: Sedimentos areno-argilosos com grânulos de quartzo, seixos e matacões. Coberturas detrito-lateríticas, latossolos, sedimentos argilo-silticos vermelho escuros com concreções ferruginosas e níveis de cascalho.
- Neoproterozóico**
- GRUPO BAMBUÍ**
- NP2l - Formação Lagoa Jacaré: calcarenito finos a médios, cinza a cinza escuros com níveis oolíticos e de intraclastos, intercalados por calcissiltitos cinza claros a cinza escuros; margas e siltitos cinza a cinza escuros; localmente, níveis dolomitizados. Laminação plano-paralela, "wavy", "linsen", estratificação cruzada acanalada e tabular, estratificação ondulada cruzada truncada por ondas, marcas de ondas, gradação normal, gretas de ressecção, estilólitos, estruturas de carga e níveis de "chert" preto.
- NP2sh - Formação Serra de Santa Helena: siltitos e argilitos com níveis de arenitos finos a muito finos, cinza a cinza esverdeados, róseos e amarelados. Laminação plano-paralela, estratificação cruzada tabular e marcas de ondas.
- NP2sls - Formação Sete Lagoas - Membro Lagoa Santa: calcarenito finos a médios, cinza escuros a pretos, laminados a maciços, com níveis de siltitos beges, cinza a amarelados. Níveis estromatolíticos.
- NP2spl - Formação Sete Lagoas - Membro Pedro Leopoldo: calcilitos e calcissiltitos bege, róseos, cinza claro e esverdeados, maciços, laminados, com estilólitos e estrutura de carga.
- Arqueano**
- COMPLEXO BELO HORIZONTE**
- A3bh - Ortognaisses cinza, bandados, com bandas leucocráticas graníticas e mesocráticas granodioríticas; migmatitos e leucocráticos.

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas e CPRM (2003)

CONTRATANTE:		
PROJETO:		
TÍTULO:		ESTUDO HIDROGEOLÓGICO
ELABORADO:		Daniela Barbatí Osório
CONTRATO:	3988	
ESCALA:	1:125.000	
DATA:	DEZ/2013	

7 HIDROGEOLOGIA

A hidrogeologia do município de Sete Lagoas foi caracterizada através do conhecimento adquirido com o mapeamento geológico, das relações litoestruturais e litoestratigráficas e dos dados hidráulicos e dimensões das unidades aquíferas reconhecidas pelos perfis de poços dos cadastros do SAAE, SIAM e SIAGAS, bem como pelos testes de bombeamento e perfilagens óticas realizadas neste estudo.

A caracterização hidrogeológica é apresentada neste capítulo pela descrição do modelo hidrogeológico conceitual e pela avaliação quantitativa dos recursos hídricos subterrâneos no município de Sete Lagoas.

7.1 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

Os modelos hidrogeológicos conceituais constituem uma simplificação e representação das unidades hidrogeológicas, na qual se tenta reproduzir as condições reais do comportamento do fluxo subterrâneo e das interações entre os aquíferos e as demais componentes de fluxos do ciclo hidrológico.

A configuração, conteúdo e natureza das informações que se procura representar podem mudar de acordo com os objetivos do trabalho, cujo interesse maior seja enfatizar as condições hidrogeológicas naturais em potencial ou os aspectos ambientais envolvidos, em especial aqueles de natureza antrópica. Qualquer que seja a condição estabelecida, os modelos devem expressar um conhecimento suficiente que permita o reconhecimento dos principais fatores que condicionam o comportamento do meio subterrâneo.

A seguir serão apresentadas e descritas as unidades hidrogeológicas que compõem o modelo hidrogeológico de Sete Lagoas, os principais parâmetros hidráulicos, o comportamento geral de fluxo no aquífero cárstico com base na potenciometria, a potencialidade hídrica conceitual caracterizada pela cartografia de favorabilidade e a ilustração esquemática bidimensional do modelo hidrogeológico conceitual.

As unidades hidrogeológicas caracterizadas e definidas neste estudo são: Sistema Aquífero Cárstico Sete Lagoas (SACSL), Aquífero Cristalino Belo Horizonte (ACBH), Aquífero Poroso e Aquiclude Serra de Santa Helena (ASSH). A **Figura 7.1** apresenta a cartografia das unidades hidrogeológicas do município de Sete Lagoas.



7.1.1 SISTEMA AQUÍFERO CÁRSTICO SETE LAGOAS (SACSL)

O SACSL se encontra inserido no Domínio Aquífero Carbonático/Metacarbonático, do Grupo Bambuí (CPRM 2010). O município de Sete Lagoas é representado por rochas calcárias da Formação Sete Lagoas (membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa), de natureza micrítica na base e oobioesparítica no topo. A relação de contato inferior é deposicional com o embasamento cristalino e abrupta, em seu contato superior, com as rochas da Formação Serra de Santa Helena.

Os limites do SACSL ao sul e oeste do município, são com o embasamento cristalino, e tem extensão lateral nas direções norte e leste, ultrapassando o próprio município. Com espessura média de 80 metros, tem a maior amplitude na porção nordeste, com 140 metros, e seu adelgaçamento alcança 40 metros na região central. O espessamento se dá em direção norte e leste do município.

O SACSL respeita um sistema de dobramentos principal, e faz parte de uma anticlinal representada pelo alto topográfico da serra de Santa Helena. A sul e oeste, se desenvolve no flanco curto que tem maior grau de mergulho em relação ao flanco longo. Rumo a norte e leste, o SACSL ocorre como parte do flanco longo de dobramento, de mergulho suave. Ainda em relação ao flanco longo, foi constatada uma sequência de dobras parasíticas que formam sinclinais e anticlinais propícias ao desenvolvimento de carstificação (associados ao plano de acamamento).

A distribuição espacial do SACSL na área de estudo é bastante, com restrições de ocorrência apenas para o setor do município. Entretanto, as áreas de ocorrência em superfície são restritas a pequenas faixas de afloramento, conforme observado na **Figura 7.1**. A presença do SACSL ocorre sotoposto às unidades do ASSH e dos aquíferos porosos cenozoicos.

Sobre o desenvolvimento da carstificação no SACSL, foi constatado que o maior grau de dissolução ocorre em porções mais rasas e menos espessas, próximas às áreas de recarga; coincidindo com as áreas centrais do município. Rumo a norte e leste, o grau de carstificação é menor devido ao aumento da espessura e da profundidade de ocorrência do SACSL.



Com relação à hidrogeoquímica, as águas são classificadas como bicarbonatadas cálcicas e apresentam um pH médio de 7,02. Em locais mais próximos de zonas de recarga, a interação com as águas meteóricas e o solo é mais intensa resultando em maior desenvolvimento cárstico pela acidez das águas que se infiltram mais rapidamente, fato este constatado no centro do município. Esta dinâmica ocorre em menor intensidade em profundidades maiores e distantes de zonas de recarga, pois o tempo de permanência no meio faz com que a água alcance o equilíbrio químico, diminuindo seu poder de dissolução das rochas calcárias. Estas circunstâncias são evidenciadas ao norte do município, com as perfilagens óticas.

As áreas com maior recarga estão relacionadas aos afloramentos dessa unidade hidrogeológica (**Figura 7.1**) que correspondem às exposições em superfície dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa. Destaca-se também que o sistema hidrogeológico cárstico é caracterizado por feições geomorfológicas, tais como sumidouros e dolinas, que em geral são responsáveis pela infiltração da água proveniente da superfície, abastecendo o aquífero, de forma mais direta. Nas ocorrências do SACSL situadas sob os depósitos sedimentares cenozoicos as recargas ocorrem de maneira indireta, com contribuições dos fluxos subterrâneos vindos dos sedimentos.

Considera-se que as ocorrências do SACSL situadas sob ASSH estão sob condições de confinamento e que as recargas ao SACSL, nestes locais, são ausentes ou pouco significativas.

Em relação às áreas de descarga deste aquífero, durante a etapa de mapeamento geológico (**Capítulo 6**), observou-se apenas um ponto de surgência associado a afloramentos de rochas carbonáticas do Membro Lagoa Santa, conforme demonstrado na **Foto 7.1**. No entanto, assumiu-se neste estudo, que as áreas de descarga do SACSL encontram-se fora do município, possivelmente, aflorando dentro do limite da bacia do rio Jequitibá.





Foto 7.1 Ponto de descarga do Sistema Aquífero Cárstico Sete Lagoas.

Com relação à direção do fluxo subterrâneo, existem duas que são condicionadas pelo alto estrutural da serra de Santa Helena que atua como divisor de águas subterrâneas. A oeste da serra, o fluxo possui direção noroeste, e a leste da serra, nordeste. Em relação à região urbana, há a convergência de fluxo e o rebaixamento local mais acentuado dos níveis de água, condicionados pela concentração de poços com alta vazão em uma área de elevada transmissividade.

Hidraulicamente, o aquífero se caracteriza por altos valores de transmissividade e de vazão específica, especialmente em regiões em que se observou também alto grau de carstificação e pouca profundidade de ocorrência do aquífero. A condutividade hidráulica apresenta valores na ordem de 10^{-4} m/s, condizentes com calcários carstificados. O coeficiente de armazenamento mostrou um comportamento confinado ($S=10^{-5}$) para diversas áreas do sistema aquífero, com comportamento livre (não confinado) ($S=10^{-2}$) observado na base da serra de Santa Helena e próximo às zonas de afloramento. Todas as variáveis hidráulicas comentadas acima confirmam o fato de que o SACSL possui um grande potencial à exploração, especialmente em áreas mais carstificadas, representando a principal fonte dos recursos hídricos subterrâneos no município com as maiores potencialidades hídricas.



7.1.2 AQUIFERO CRISTALINO BELO HORIZONTE (ACBH)

O ACBH se encontra inserido no Domínio Cristalino (CPRM, 2010). No município de Sete Lagoas é representado por rochas ígneas e metamórficas do Complexo Indiferenciado Belo Horizonte. A relação de contato superior com as rochas do Grupo Bambuí e os depósitos cenozoicos pode ser deposicional ou intrusiva.

Com relação à sua geometria, ele se estende como embasamento por todo o substrato que sustenta os metassedimentos neoproterozoicos do município, e é aflorante na região sul (**Figura 7.1**), com aprofundamento de seu topo na direção norte, podendo alcançar aproximadamente 300 metros de profundidade.

As feições estruturais do ACBH são influenciadas por uma evolução tectônica rúptil que gerou sistemas de fraturas verticais, conjugadas ortogonalmente. Regionalmente, a rede de drenagem apresenta padrões retilíneos e ortogonais, condicionados por lineamentos, o que pode indicar, em subsuperfície, a ocorrência de fraturas em grande escala.

Com relação ao fluxo subterrâneo, pode ser sugerida uma direção preferencial de sul para norte, baseado nas cargas hidráulicas mais elevadas em relação ao SACSL.

Hidraulicamente, o aquífero se caracteriza por baixos valores de transmissividade e de vazão específica se comparados ao SACSL, porém característicos de um aquífero dessa natureza, onde as águas se armazenam e circulam apenas nas fraturas. Este aquífero tem baixo potencial à exploração, mas as melhores potencialidades estão relacionadas à ocorrência de lineamentos e fraturas.

Embora não configure uma fonte de água subterrânea potencial para o abastecimento público, devido aos baixos valores de produtividade dos poços, pode atender a usos particulares como alternativas individuais de abastecimento de água, a partir de poços com vazões até 10 m³/h, podendo localmente, ocorrer maiores vazões.



7.1.3 AQUIFERO POROSO

O aquífero poroso corresponde às ocorrências dos depósitos cenozoicos, constituídos por sedimentos siliciclásticos de granulometria variável de areia grossa a argila. Possui grande extensão em área na região central do município e, de forma dispersa, associada aos principais rios (**Figura 7.1**)

O aquífero poroso tem contato com toda a sequência estratigráfica que ocorre em Sete Lagoas, possuindo contato inferior com o ACBH nas áreas sul e oeste do município, com o SACSL na porção central e, ao norte, com as rochas da Formação Serra de Santa Helena.

O aquífero poroso tem grande papel na manutenção dos níveis de base das drenagens, e na recarga do SACSL, particularmente na área central do município e, provavelmente com recargas indiretas aos aquíferos sotopostos.

Com relação à geometria, os limites laterais desse aquífero são condicionados pela topografia, preenchendo as depressões geomorfológicas. Esses depósitos podem variar entre 2 e 50 metros de espessura.

O fato de este aquífero ser aflorante e apresentar potencial hidráulico igual ao da pressão atmosférica, o mesmo foi descrito como sendo livre.

No contexto de abastecimento de água, este aquífero apresenta pouca relevância quanto à exploração por poços tubulares, no entanto, para extração de pequenas vazões este aquífero pode ser eficiente. Tal fato foi observado pela presença de cisternas nessas regiões e comentado por Pessoa (1996).

7.1.4 AQUICLUDE SERRA DE SANTA HELENA (ASSH)

O ASSH está inserido no Domínio Aquífero Carbonático/Metacarbonático, dentro do Grupo Bambuí (CPRM, 2010). E é constituído por rochas filito-ardosianas da Formação Serra de Santa Helena. A relação de contato inferior é deposicional e abrupto com as rochas do embasamento cristalino, na porção sul do município, e com a Formação Sete Lagoas no restante da área.

Com relação à geometria do ASSH, seus limites de ocorrência são ao sul e oeste do município em contato com o embasamento cristalino, e tem extensão lateral nas direções



norte e leste (**Figura 7.1**). Possui espessura média de 60 metros, sendo que a sua maior amplitude (140 metros) e espessamento se dá em direção norte da área de estudo.

O ASSH respeita um sistema de dobramentos principal, e faz parte de uma anticlinal representada pelo alto topográfico da serra de Santa Helena. A sul e oeste, se desenvolve no flanco curto que tem maior grau de mergulho em relação ao flanco longo. Rumo a norte e leste, o ASSH ocorre como parte do flanco longo de dobramento, de mergulho suave.

As características petrográficas das rochas filito-ardosianas, somadas ao preenchimento dos planos de fratura e acamamento por veios pegmatíticos condicionam sua natureza de baixa permeabilidade desta formação, classificando-a como um aquíclode.

O fato de essa formação ter baixa capacidade de infiltração promove o escoamento superficial da água meteórica contribuindo no abastecimento do rio e no favorecimento da recarga do SACSL, em sua porção aflorante. Pela mesma razão, o ASSH favorece pouca ou nenhuma recarga ao SACSL nas regiões que o recobre, sobretudo, no setor norte e nordeste do município.

7.1.5 VISUALIZAÇÃO DO MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

O modelo hidrogeológico conceitual elaborado para o município de Sete Lagoas, representado na **Figura 7.2**, fornece uma visão bidimensional das unidades hidrogeológicas com visualização para:

- a geometria e dimensões relativas das unidades hidrogeológicas;
- o comportamento geral das componentes de fluxo do ciclo hidrológico e a indicação das áreas de recarga dos principais aquíferos;
- a compartimentação lito-estrutural e sua influência no comportamento dos fluxos hídricos subterrâneos, a identificação dos aquíferos e aquíclode;

Desse modo, o modelo integra todo o conhecimento adquirido sobre a hidrogeologia da área nos aspectos dimensionais, estruturais e hidrodinâmicos do comportamento hidráulico em subsuperfície e dos fluxos de recarga.



O modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas constituiu uma importante ferramenta na avaliação da quantidade das águas subterrâneas e demais compreensões acerca da gestão dos recursos hídricos subterrâneos na área de interesse.

Em síntese, o modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas define o SACSL como a principal unidade hidrogeológica da área, com as maiores potencialidades hídricas, sendo relevante traçar as seguintes considerações:

As recargas do SACSL ocorrem de maneira direta nas suas áreas de afloramento e de maneira indireta pela interação com os aquíferos porosos sobrepostos e através das coberturas intemperizadas, sendo que, nessas áreas de ocorrência possuem comportamento livre a, localmente, semi-confinado;

Nas áreas em que o SACSL está sob o ASSL possui comportamento confinado e com recarga nula ou pouco significativa;

As direções de fluxo subterrâneo do SACSL são divergentes por influência da Serra de Santa Helena, entretanto, observa-se a tendência de fluxo regional no sentido nordeste do município;

O fluxo regional do SACSL no sentido nordeste sugere a possibilidade de áreas de descargas regionais para aquela região, provavelmente na bacia hidrográfica do rio Jequitibá;

As dimensões do SACSL externas à Sete Lagoas permitem sugerir a possibilidade de aportes de água que entram para o município provenientes de recargas ocorridas em áreas do SACSL situadas em outras localidades.

A partir da compilação do conhecimento adquirido foi elaborada a **Tabela 7.1**, a qual se resume todas as informações das unidades hidrogeológicas identificadas e caracterizadas em Sete Lagoas que contribuem com a compreensão do modelo hidrogeológico conceitual.



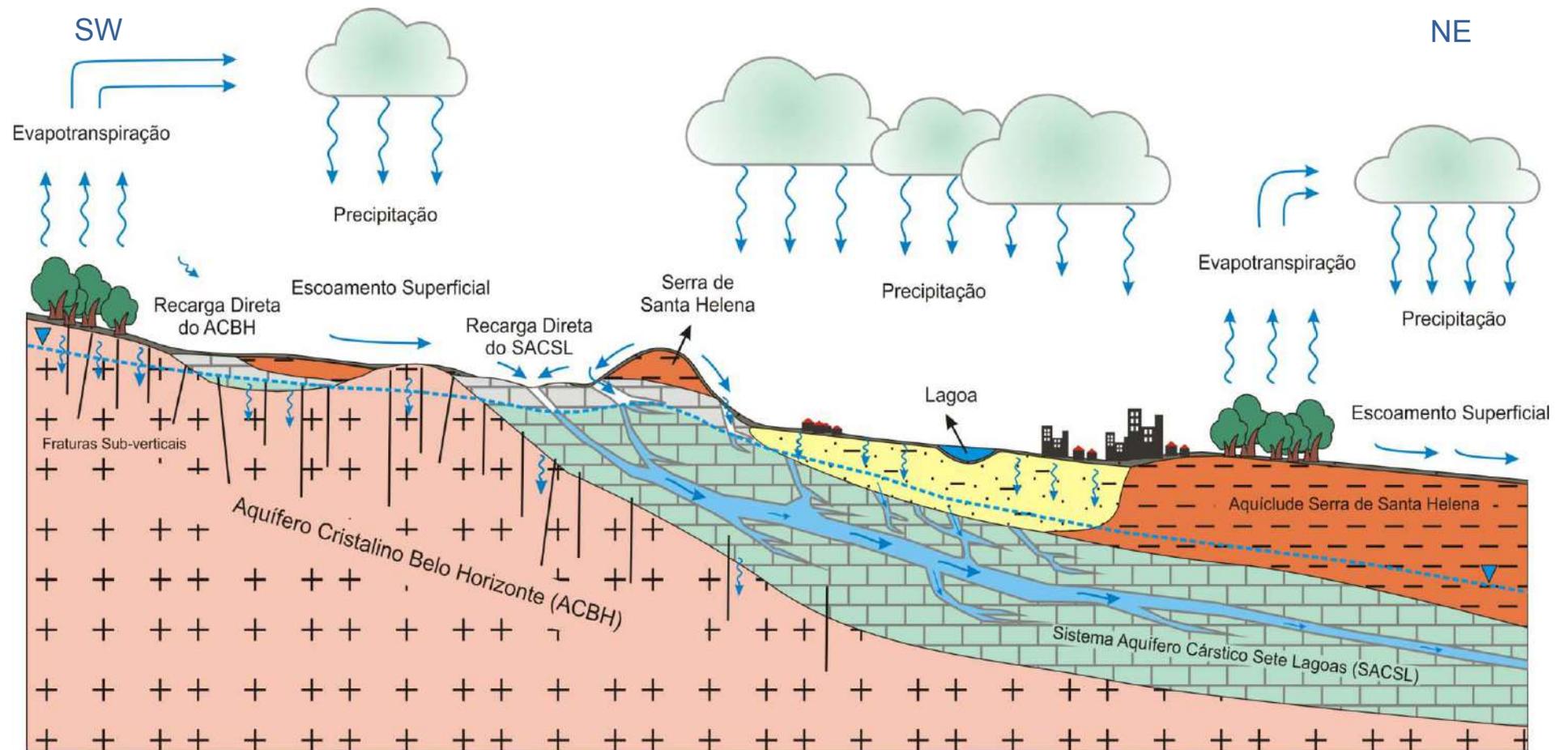


Figura 7.2 Modelo hidrogeológico conceitual esquemático do município de Sete Lagoas.



Tabela 7.1 Resumo das características dos aquíferos.

Aquíferos/ Características	Litologia	Tipo de Aquífero	Espessura (m)	T (m ² /h)	K (m/h)	S	Mecanismos de recarga	Caracterização hidrogeoquímica
Cenozoico	Sedimentos siliciclásticos arenosos a argilosos	Domínio Poroso	0,1 a 40 metros	-	-	-	Porosidade	-
Aquiclude Serra de Santa Helena	Rochas filito-ardosianas	Domínio Carbonático / Metacarbonático	10 a 120 metros ⁽²⁾	1x10 ⁻⁴	1x10 ⁻⁶	-	Faturas ⁽³⁾	-
Sistema Aquífero Cárstico Sete Lagoas	Membro Lagoa Santa - oobioesparitos / Membro Pedro Leopoldo - micritos	Domínio Carbonático / Metacarbonático	40 a 140 metros	1x10 ²	1x10 ⁻¹	1x10 ⁻² a 1x10 ⁻⁵	Dutos cársticos e fraturas ⁽⁴⁾	HCO ⁻ + Na ²⁺
Aquífero Cristalino Belo Horizonte	Complexo gnáissico - migmatítico indiferenciado	Domínio Cristalino	80 ⁽¹⁾ metros	1x10 ⁻¹	-	-	Faturas	HCO ⁻ + (Na ²⁺ K ⁺ Mg ⁺²)

T: Transmissividade; K: Condutividade Hidráulica; S: Coeficiente de Armazenamento.

(1) - dados coletados a partir de perfis lito-constructivos do PT-85 e PT-86.

(2) - dados coletados a partir de ensaios realizados por Pessoa (1996) em PTs instalados nos municípios de Jequitibá e Paraopeba.

(3) - Situação não válida ao município de Sete Lagoas, uma vez que esses planos se encontram preenchidos por veios pegmatíticos.

(4) – A infiltração para a recarga ocorrerá geralmente a partir de coberturas cenozoicas e mantos de intemperismo.



7.1.6 POTENCIOMETRIA DO SISTEMA AQUÍFERO CÁRSTICO SETE LAGOAS

O deslocamento da água dentro do aquífero, condicionado pelo potencial hidráulico, acontece do ponto de maior potencial para o ponto de menor potencial hidráulico, em qualquer direção. O potencial hidráulico é determinado pela pressão, gravidade e energia cinética. Para tanto, foi considerada a carga hidráulica de cada poço, definida pela diferença entre os níveis estáticos e a cota do terreno.

A partir da interpolação do potencial hidráulico de cada poço, obtém-se uma superfície denominada de superfície potenciométrica, representada graficamente por *linhas equipotenciais*, e a direção do fluxo subterrâneo representado por linhas de fluxo.

A inclinação da superfície potenciométrica, denominada de gradiente hidráulico, é definida pela razão entre as variações de carga hidráulica e a distância percorrida na direção do fluxo.

A partir da interpolação dos valores da carga hidráulica de cada poço, definiram-se os pontos de maior e menor potencial hidráulico. Em consequência, determinou-se a superfície potenciométrica representada por linhas equipotenciais. A representação, no mapa, das linhas equipotenciais é feita a partir da interpretação do modelo conceitual, pois a simples interpolação dos valores poderiam não considerar feições geológicas que condicionam o fluxo subterrâneo.

Em terrenos cársticos, os fluxos são controlados fortemente pelas estruturas e pelas feições cársticas, sobretudo os dutos causados pela dissolução da rocha. A representação do fluxo subterrâneo no mapa potenciométrico elaborado neste trabalho corresponde à tendência geral de deslocamento, baseada nas cargas hidráulicas determinadas.

As técnicas adotadas pela Servmar nos testes de bombeamento consideraram o desligamento dos poços adjacentes do SAAE. Em consequência, assumiram-se as medidas de níveis estáticos como correspondentes às características hidráulicas do aquífero, sem influência de outros poços em bombeamento. Entretanto, os testes de bombeamento não abrangeram todos os poços ativos do SAAE, conseqüentemente, não houve medição do nível estático em todos os poços.

Deve-se salientar também que não há como controlar possíveis influências, tais como rebaixamento de nível provocado por poços de terceiros e/ou elevação do nível de água provocado por recargas artificiais, por exemplo, por vazamentos na rede de abastecimento



de água. Tais fatores podem ter ocorrido, influenciando nas medidas do nível estático e, conseqüentemente, no comportamento geral do fluxo subterrâneo.

A **Tabela 7.2** compila dados relativos à obtenção das cargas hidráulicas de poços com captação no SACSL, visando à elaboração do mapa potenciométrico dessa unidade hidrogeológica, bem como para efetuar uma análise acerca de possíveis modificações dos níveis estáticos ao longo do tempo, com base nos dados da época da construção dos poços, em comparação com os níveis estáticos obtidos neste estudo.

A **Figura 7.3** demonstra o gráfico de dispersão dos dados dos níveis estáticos atuais e nas datas de instalação dos poços. Nos casos avaliados, foram observados rebaixamentos dos níveis estáticos, a exceção do PT-30 em que foi verificada uma pequena elevação. A **Figura 7.4** apresenta a localização dos poços que apresentaram as maiores taxas de rebaixamento.

Na elipse delimitada na **Figura 7.3**, envolvendo os poços que apresentaram as maiores taxas de rebaixamento, é possível observar que abrangem os poços mais antigos, indicando que esses rebaixamentos podem estar relacionados ao aumento da captação das águas subterrâneas. De modo geral, os poços que apresentaram menores rebaixamentos foram construídos após 1985.

O PT-02 aparece como exceção ao discutido acima. Este poço foi construído na década de 50 e apresenta um rebaixamento de cerca de 8 m, enquanto outros poços demonstraram rebaixamentos de até 40 m, com média de 17 m.

Em virtude de terem sido verificados rebaixamentos em quase todos os poços avaliados, conclui-se que as captações estão provocando quedas nos níveis do aquífero. Entretanto, deve-se ressaltar novamente que interferências pontais podem ter ocorrido, significando que algum dado represente nível dinâmico, ou seja, representa um reflexo de um bombeamento em curso, de algum poço próximo, no momento da mediação. Essa discussão se justifica, pois, rebaixamentos da ordem de 40 m representariam a redução de quase a metade da potencialidade hídrica do SACSL e não corresponde à realidade verificada pela produtividade dos poços em Sete Lagoas.



Tabela 7.2 Cargas hidráulicas dos poços do SAAE.

Poço	Cota (SRTM)	NE 1 (m)	Data 1	NE 2 (m)	Carga Hidráulica ¹	Carga Hidráulica ²	Data 2	Clima da Data de Instalação	Clima da Data Teste de Aquífero
PT-01	783,21	54,95	23/04/2012	14	728,26	769	10/04/1942	Seco	Seco
PT-02	783,25	56,20	13/04/2012	48	727,05	735	14/06/1956	Seco	Seco
PT-03	784,3	56,33	11/04/2012	51	727,97	733	17/10/1990	Chuvoso	Seco
PT-08	785,43	57,73	12/04/2012	28,7	727,70	757	18/11/1974	Chuvoso	Seco
PT-09	785,8	56,80	20/04/2012	36	729,00	750	05/12/1982	Chuvoso	Seco
PT-11	791,13	58,06	02/02/2012	26	733,07	765	14/09/1968	Seco	Chuvoso
PT-12	787,78	59,80	06/10/2011	29	727,98	759	17/12/1970	Chuvoso	Chuvoso
PT-13	785,72	68,50	01/12/2011	44,7	717,22	741	06/04/1984	Seco	Chuvoso
PT-15	795,32	48,12	21/03/2012	21	747,20	774	30/10/1981	Chuvoso	Chuvoso
PT-18	784,92	22,40	30/11/2011		762,52		14/02/1993	Chuvoso	Chuvoso
PT-19	805,77	10,18	28/03/2012	5,35	795,59	800	05/01/1987	Chuvoso	Chuvoso
PT-22	718,16	10,23	31/01/2012	6,3	707,93	712	15/07/1996	Seco	Chuvoso
PT-28	834,06	48,43	02/12/2011	32,9	785,63	801	03/05/1986	Seco	Chuvoso
PT-30	988,45	43,65	18/04/2012	49,9	944,80	938	16/06/1993	Seco	Seco
PT-34	801,06	58,88	29/03/2012	48	742,18	753	05/06/1982	Seco	Chuvoso
PT-39	762,42	1,76	01/02/2012	1,5	760,66	761	08/07/1991	Seco	Chuvoso
PT-44	824	40,66	22/11/2011		783,34		05/07/1972	Seco	Chuvoso
PT-46	809,48	36,73	21/11/2011		772,75		10/07/1979	Seco	Chuvoso
PT-47	826,26	24,57	24/04/2012	16	801,70	810	24/03/1986	Chuvoso	Seco
PT-48	768	33,99	04/04/2012		734,01		16/02/1976	Chuvoso	Seco
PT-53	757,91	4,00			753,91		28/08/1981	Seco	
PT-57	805,7	5,63	07/03/2012		800,07		18/04/1999	Seco	Chuvoso
PT-63	739,23	38,25	008/12/2011	18	700,98	721	23/06/1995	Seco	Chuvoso
PT-69	757,86	8,39	01/03/2012		749,47		26/06/1995	Seco	Chuvoso
PT-90	725,67	2,03	07/09/2011		723,64		14/10/1998	Chuvoso	Seco
PT-99	756,59	6,01	17/11/2011		750,58		26/09/1981	Seco	Chuvoso

NE 1 – nível estático do teste de bombeamento; Data 1 – data do teste de bombeamento; Carga Hidráulica¹ = Carga Hidráulica do Teste de Bombeamento; NE 2 – nível estático da instalação do poço; Data 2 – data da instalação do poço; Carga Hidráulica² = Carga Hidráulica da instalação do poço.



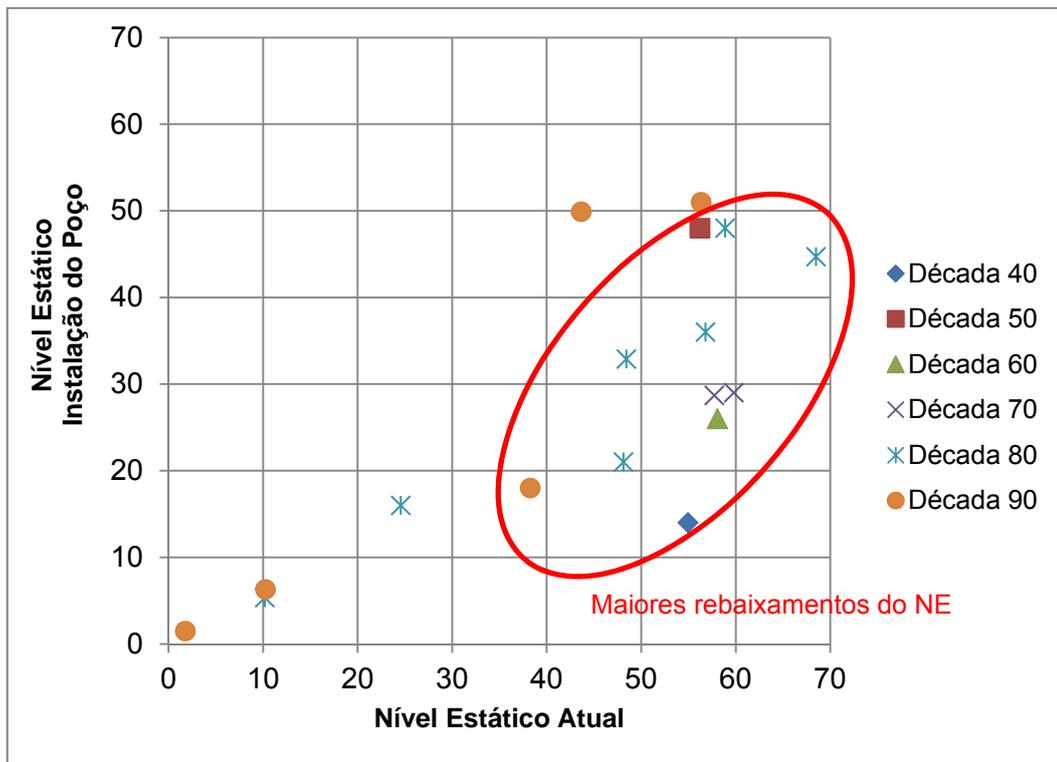


Figura 7.3 Gráfico de dispersão de rebaixamento por década de instalação.

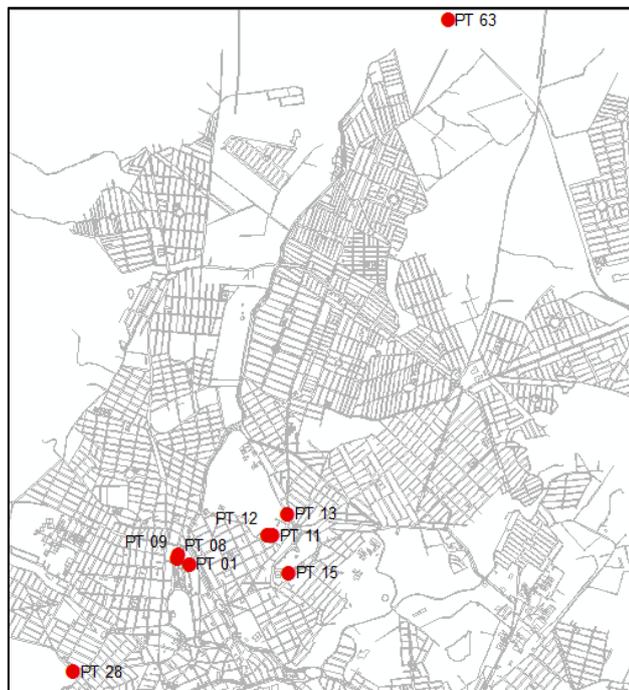


Figura 7.4 Localização dos poços com maiores rebaixamentos de nível estático



A partir da obtenção das cargas hidráulicas atuais, considerando poços com perfil construtivo conhecido, foi confeccionado o mapa potenciométrico do SACSL na área de estudo, conforme apresentado na **Figura 7.5**. A potenciometria do SACSL foi interpretada a partir das cargas hidráulicas dos seguintes poços do SAAE: PT-01, PT-02, PT-07, PT-08, PT-09, PT-11, PT-13, PT-14, PT-15, PT-19, PT-22, PT-28, PT-36, PT-39, PT-41, PT-43, PT-44, PT-46, PT-47, PT-48, PT-51, PT-52, PT-53, PT-64, PT-66, PT-75, PT-78, PT-89, PT-90 e PT-99.

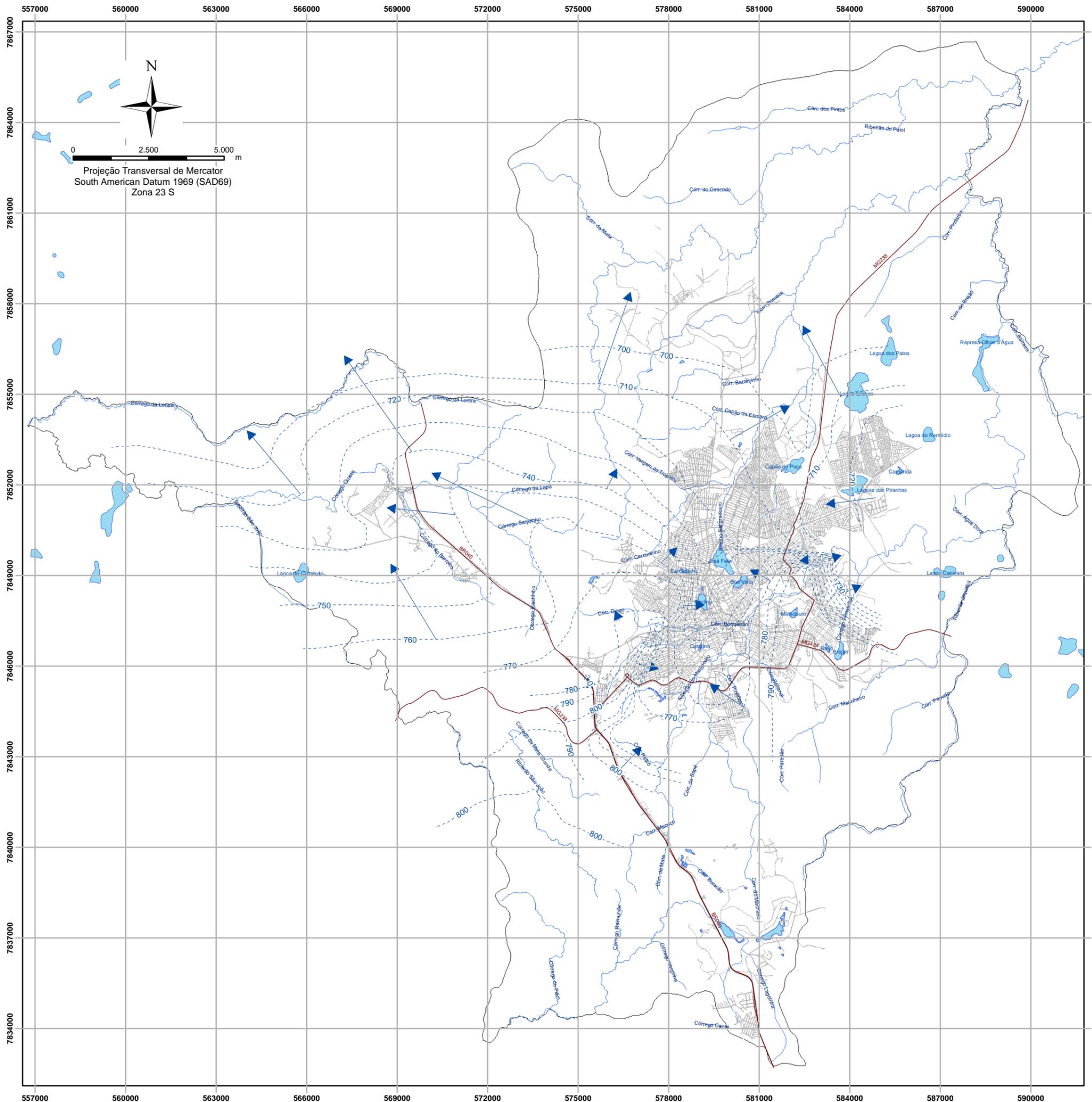
As linhas equipotenciais demonstram predominância do fluxo regional subterrâneo proveniente de sudeste, sofrendo inflexões para nordeste e noroeste, aparentemente por influência da Serra de Santa Helena. A limitação de dados na zona rural de Sete Lagoas dificulta o detalhamento sobre a dinâmica dos fluxos regionais, entretanto, não desqualifica as interpretações alcançadas.

Na zona urbana do município a densidade de dados permite melhor compreensão e detalhamento dos fluxos subterrâneos. A tendência regional é observada, entretanto, é possível notar a interferência das captações, através de formas concêntricas nas equipotencias, no entorno de locais com elevada concentração de poços.

Em análise a algumas cargas hidráulicas de poços instalados no ACBH, notou-se equivalência com a potenciometria do SACSL, podendo indicar conectividade hidráulica entre esses aquíferos. Se a conexão existir, as cargas hidráulicas indicam tendência de fluxo do ACBH para o SACSL, pelo menos na região sul do município. A quantidade de dados, entretanto, não permite comprovar cabalmente essa interpretação, tão pouco, estimar vazões dos possíveis aportes hídricos provenientes do ACBH.

Em síntese, a potenciometria sugere que o SACSL receba contribuições provenientes de sudeste e, possivelmente, de sul vindas do ACBH com fluxos nos sentidos nordeste e noroeste por provável inflexão causada pela Serra de Santa Helena com áreas de descargas fora dos limites do município. Na área urbana foram evidenciados rebaixamentos dos níveis de água do SACSL influenciados por captações das águas subterrâneas.





Projeção Transversal de Mercator
 South American Datum 1969 (SAD69)
 Zona 23 S



Legenda

- Linha Equipotencial
- Linha de Fluxo
- Lagoas
- Rodovias
- Malha de Ruas
- Drenagem
- Limite Municipal

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas

CONTRATANTE: 	
PROJETO: ESTUDO HIDROGEOLÓGICO	
TÍTULO: Figura 7.5 Mapa potenciométrico do SACS	
ELABORADO: Daniela Barbatí Osório	
CONTRATO: 3988	AMBIENTAL & ENGENHARIA
ESCALA: 1:125.000	
DATA: DEZ/2013	

7.1.7 FAVORABILIDADE HÍDRICA

A cartografia de favorabilidade hídrica objetivou delimitar áreas com base nas potencialidades dos aquíferos no município de Sete Lagoas. Embora, para os aquíferos cársticos não exista uma metodologia consagrada, optou-se pela adoção de delimitações com base nos dados de transmissividade, associadas às interpretações com base no modelo hidrogeológico conceitual.

A **Tabela 7.3** apresenta as faixas de transmissividades adotadas com base nos dados existentes e que definiram quatro classes de favorabilidade hídrica, conforme demonstrado a seguir.

Tabela 7.3 Classificação da favorabilidade hídrica e as transmissividades

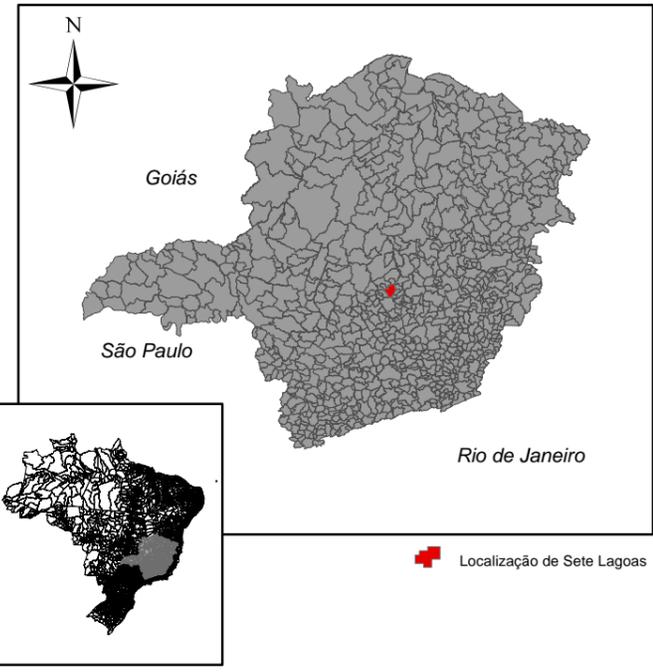
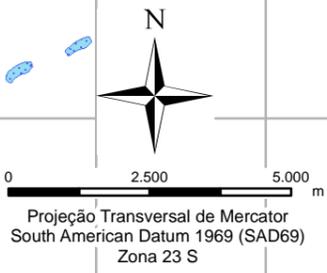
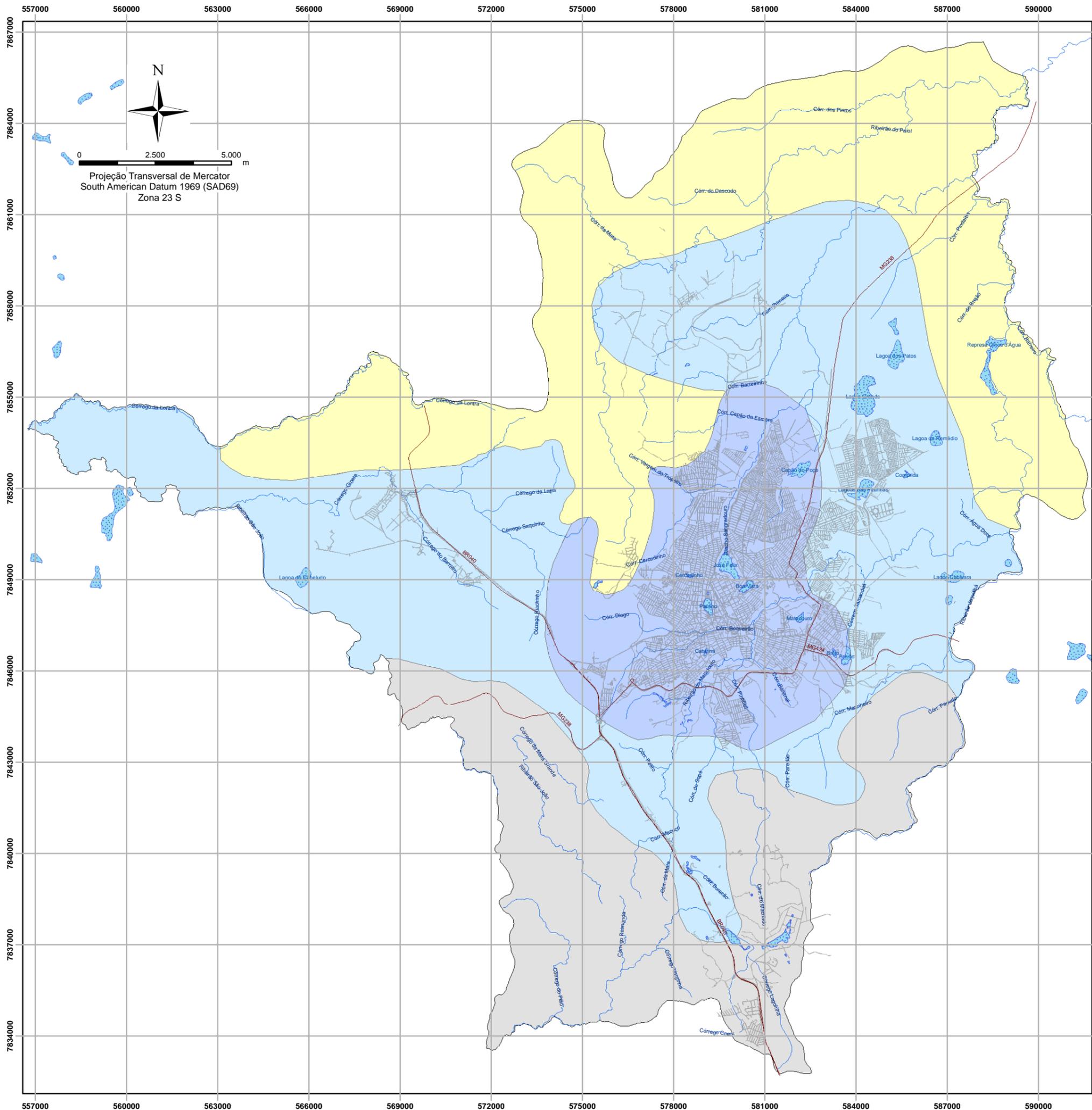
Favorabilidade Hídrica	Tipo do Aquífero	Transmissividade (m ² /h)
Baixa	ACBH	0,1 a 0,5
Moderada	SACSL	1-5
Alta	SACSL	5-25
Muito Alta	SACSL	25 a 130

No cenário observado, o aquífero cárstico (SACSL) é o de maior potencialidade hídrica, seguido do aquífero cristalino (ACBH). Por esta razão, as áreas onde ocorre o ACBH foram classificadas como baixa favorabilidade hídrica e o SACSL foi subdividido em três classes, conforme se observa na **Figura 7.6**.

As áreas com muito alta favorabilidade hídrica abrangem a área urbana central, esta por sua vez, está relacionada à ocorrência de sedimentos cenozoicos sobre o SACSL e o alto grau de carstificação do Membro Pedro Leopoldo.

As áreas classificadas em moderada e alta favorabilidade hídrica distribuem-se, predominantemente, nas áreas norte e oeste de Sete Lagoas, e podem ser associadas à ocorrência do SACSL sotoposto ao ASSL.





Legenda
Índice de Favorabilidade Hídrica

-  Muito Alta
-  Alta
-  Moderada
-  Baixa
-  Lagoas
-  Rodovias
-  Malha de Ruas
-  Drenagem
-  Limite Municipal

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas

CONTRATANTE:		 Serviço Autônomo de Água e Esgoto
PROJETO:		
TÍTULO:		ESTUDO HIDROGEOLÓGICO
ELABORADO:		Figura 7.6 Favorabilidade Hídrica
CONTRATO:		Daniela Barbatl Osório
ESCALA:		3988
DATA:		1:125.000
		DEZ/2013


AMBIENTAL & ENGENHARIA

7.2 AVALIAÇÃO DA QUANTIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

A avaliação da quantidade dos recursos subterrâneos objetivou a caracterização e cálculo das componentes de fluxo hídrico subterrâneo visando fornecer ferramental técnico para subsidiar decisões acerca da gestão das águas no município.

Neste tópico são descritos os métodos e resultados do balanço hídrico climatológico, dos recursos disponíveis, das reservas permanentes e renováveis, a potencialidade e os recursos exploráveis no município de Sete Lagoas.

7.2.1 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DA BACIA DO RIO JEQUITIBÁ

O balanço hídrico pode ser considerado como o equacionamento das entradas e saídas de água dentro de uma unidade hidrográfica durante um determinado intervalo de tempo. As entradas compreendem a precipitação, águas superficiais e subterrâneas que chegam à região, enquanto que as saídas incluem a evapotranspiração e o escoamento superficial e subterrâneo que deixam essa bacia.

Descrição do Método

A determinação dos limites da bacia hidrográfica e da área de captação é o ponto de partida em todas as análises hidrológicas e um dos dados essenciais que servem de base para a gestão dos recursos hídricos (BONACCI *et al.* 2008). As diferenças entre as bacias hidrológicas e topográficas em terreno cárstico são, via de regra, tão grandes que os dados sobre a bacia topográfica são de pouca utilidade, na prática. Muitas vezes, a posição dos limites de captação do carste depende do nível das águas subterrâneas que podem mudar bruscamente em tempos muito curtos.

No caso deste estudo, a unidade hidrográfica adotada foi a sub-bacia do rio Jequitibá, utilizando-se do seguinte raciocínio: o município de Sete Lagoas localiza-se dentro da área de influência da bacia hidrográfica do rio das Velhas (BHRV), maior afluente em extensão da Bacia do São Francisco. Dentro da BHRV, encontram-se, no município, a sub-bacia hidrográfica Jequitibá que abrange uma área de 621,06 km², dos quais 392,5 km² (63,2%) estão inseridos no município de Sete Lagoas (Chaves, 2005), além disso, é a sub-bacia onde está localizada a estação climatológica do município (**Figura 7.7**).



Adotada a sub-bacia, foi escolhida, posteriormente, a metodologia para as estimativas de balanço hídrico. Neste caso, a desenvolvida por Thornthwaite & Mather (1955), que é uma das várias maneiras de se monitorar a variação do armazenamento de água no solo em uma bacia hidrográfica e que, envolve apenas dois elementos meteorológicos, que são a temperatura média mensal e a precipitação média mensal. Além disso, também relaciona as entradas e saídas de água, ocorridas num determinado espaço e durante um ano, considerando a variação do volume de água a partir da aplicação do princípio da conservação de massa.

Por meio da contabilização do suprimento natural da água no solo, da precipitação (PRP), da demanda atmosférica e capacidade de água disponível (CAD), essa metodologia fornece estimativas da evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR), do déficit hídrico (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM) (CAMARGO, 1971; PEREIRA *et al.*, 1997 *apud* Sentelhas, 2003).

Diante disso, o balanço hídrico simplificado pôde ser estabelecido a partir da identificação do volume de água recebido, armazenado e perdido pela bacia, por meio da seguinte equação:

$$PRE = ESC + \Delta ARM + ETR$$

Onde: PRE é a precipitação (mm); ESC é o escoamento superficial (mm), ETR é a evapotranspiração real (mm), e ΔARM é a variação no armazenamento de água na zona não saturada (mm).

De acordo com Hewlett & Nutter (1969); Gregory & Walling (1973); Vestena (2002) e Vestena & Kobiyama (2007), a variação do armazenamento total para períodos de tempos mais longos pode ser desprezada, pois o balanço hídrico é um ciclo e a variação de armazenamento de água no solo tende a zero, pois há um equilíbrio da água armazenada no solo, permitindo avaliar os elementos do balanço hídrico que caracteriza o regime hidrológico da bacia hidrográfica. A partir disso, com os dados de pluviosidade e descarga líquida, a evapotranspiração real pode ser quantificada, admitindo-se que o ΔARM para longos períodos de tempo se anula, então a equação pode ser simplificada:

$$PRP = ETP + EXC$$

Para o desenvolvimento das estimativas do balanço hídrico, alguns procedimentos e parâmetros foram adotados e calculados, conforme podem ser vistos abaixo:



Evapotranspiração Potencial (ETP) e Real (ETR): o termo refere-se à perda de água ocorrida tanto pela superfície do solo (evaporação), quanto pelas plantas (transpiração). A evapotranspiração real não depende somente dos fatores meteorológicos, mas também das propriedades físicas do solo e dos aspectos relacionados à cobertura vegetal (Mota, 1986). O solo úmido representa a manutenção da evapotranspiração na razão potencial, sendo determinada pelas condições climáticas predominantes. Com o decréscimo da umidade, o solo começará a secar e a evapotranspiração real será menor que a potencial (déficit). Esses valores são determinados a partir de derivações do método proposto por Thornthwaite (1948) e associados aos seus respectivos dados tabelados. Para isso, foi utilizada a equação proposta por Thornthwaite (1948):

$$ETP = 0,53 \left(10 \frac{T_i}{I}\right)^a \cdot \left(\frac{H_i}{12}\right) N_i$$

Onde: T_i = Temperatura média ($^{\circ}\text{C}$); I = Índice térmico anual; a = coeficiente empírico composto; N_i = número de dias; e H_i = número possível de horas de brilho solar no dia mediano do i -ésimo período. O índice térmico anual “ I ” pode ser calculado pela equação $1,049(T_i)^{1,514}$, onde T_i é a temperatura média anual. O Coeficiente empírico composto “ a ” é calculado utilizando a seguinte equação: $a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,792 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239$. Com relação do H_i , é utilizada a **Tabela 7.4** a seguir.

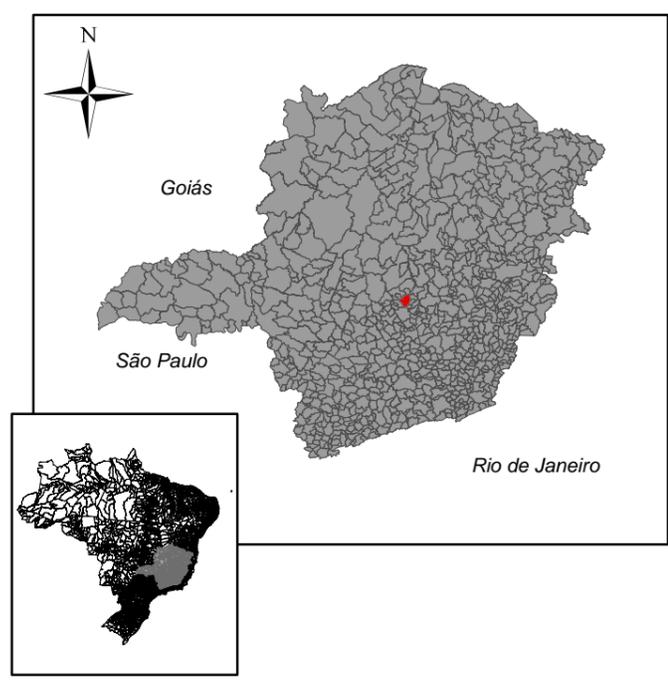
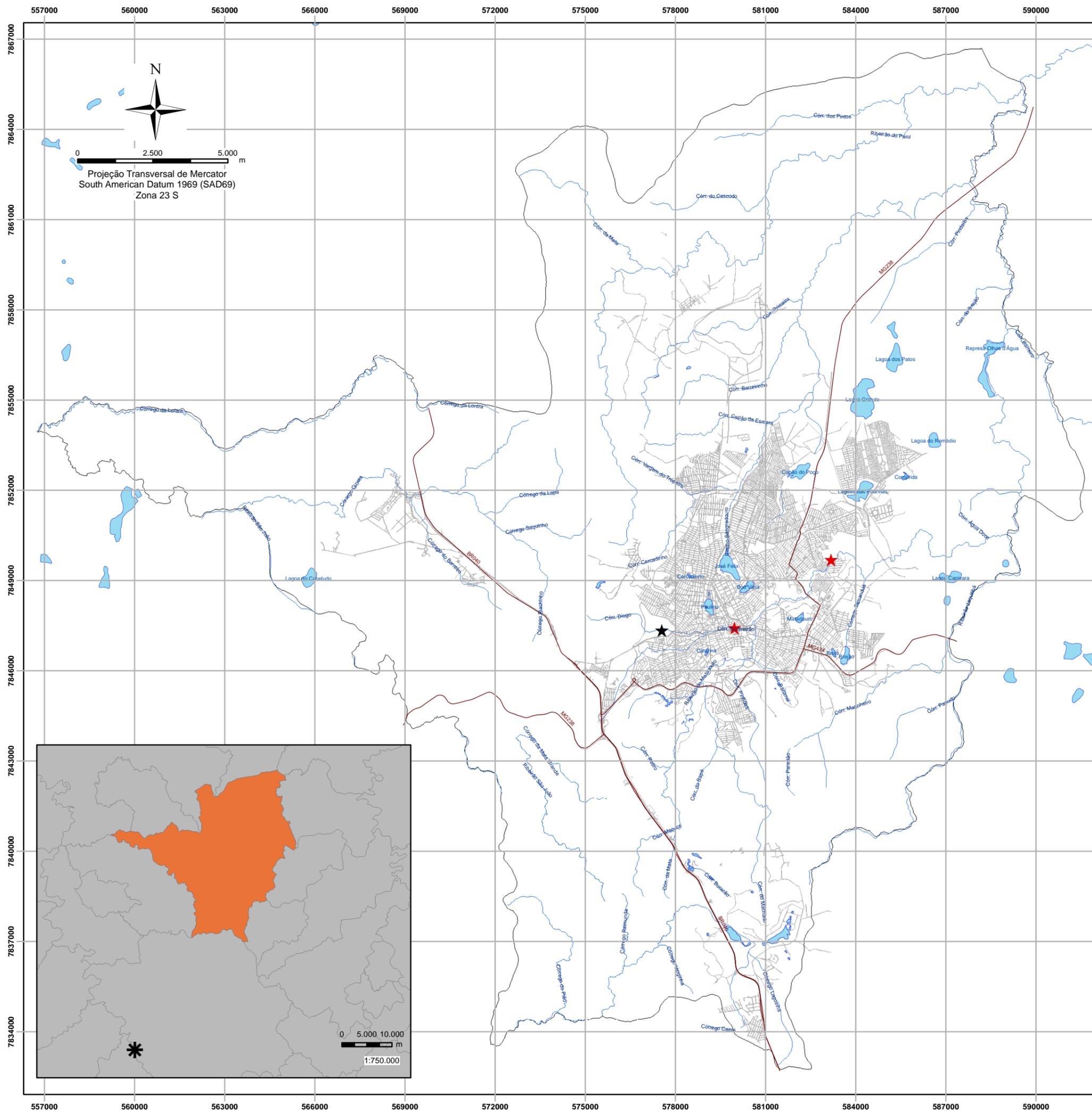
Precipitação (PRE) e Temperatura (T): foram utilizados valores médios baseados em dados de Normais Climatológicas, no caso deste estudo, das séries históricas (intervalo de coleta de dados entre os anos de 1961 a 1990) da estação climatológica situada nas dependências da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas (MG), e que possui, como área de influência, a bacia hidrográfica do rio Jequitibá. As coordenadas geográficas são X: 578717 e Y: 7847371, enquanto que a altitude é de 732 metros (**Figura 7.7**).



Tabela 7.4 Duração máxima de insolação diária média, em diferentes meses e latitudes.

LAT	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
10° N	11,6	11,8	12,1	12,4	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
8° N	11,7	11,9	12,1	12,3	12,5	12,6	12,5	12,4	12,2	12,0	11,8	11,6
6° N	11,8	11,9	12,1	12,3	12,4	12,5	12,4	12,3	12,2	12,0	11,9	11,7
4° N	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,4	12,3	12,2	12,0	12,0	11,9	11,9
2° N	12,0	12,0	12,1	12,2	12,2	12,2	12,0	12,0	12,1	12,1	12,0	12,0
0°	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
2° S	12,2	12,2	12,1	12,1	12,0	12,0	12,0	12,0	12,1	12,1	12,2	12,2
4° S	12,3	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,4
6° S	12,4	12,3	12,1	12,0	11,9	11,7	11,8	11,9	12,1	12,2	12,4	12,5
8° S	12,5	12,4	12,1	11,9	11,7	11,6	11,7	11,9	12,1	12,3	12,5	12,6
10° S	12,6	12,4	12,1	11,9	11,7	11,5	11,6	11,8	12,0	12,3	12,6	12,7
12° S	12,7	12,5	12,2	11,8	11,6	11,4	11,5	11,7	12,0	12,4	12,7	12,8
14° S	12,8	12,6	12,2	11,8	11,5	11,3	11,4	11,6	12,0	12,4	12,8	12,9
16° S	13,0	12,7	12,2	11,7	11,4	11,2	11,2	11,6	12,0	12,4	12,9	13,1
18° S	13,1	12,7	12,2	11,7	11,3	11,1	11,1	11,5	12,0	12,5	13,0	13,2
20° S	13,1	12,8	12,2	11,6	11,2	10,9	11,0	11,4	12,0	12,5	13,2	13,3
22° S	13,4	12,8	12,2	11,6	11,1	10,8	10,9	11,3	12,0	12,6	13,2	13,5
24° S	13,5	12,9	12,3	11,5	10,9	10,7	10,8	11,2	11,9	12,6	13,3	13,6
26° S	13,6	12,9	12,3	11,5	10,8	10,5	10,7	11,2	11,9	12,7	13,4	13,8
28° S	13,7	13,0	12,3	11,4	10,7	10,4	10,6	11,1	11,9	12,8	13,5	13,9
30° S	13,9	13,1	12,3	11,4	10,6	10,2	10,4	11,0	11,9	12,8	13,6	14,1
32° S	14,0	13,2	12,3	11,3	10,5	10,0	10,3	10,9	11,9	12,9	13,7	14,2
34° S	14,2	13,3	12,3	11,3	10,3	9,8	10,1	10,9	11,9	12,9	13,9	14,4
36° S	14,3	13,4	12,4	11,2	10,2	9,7	10,0	10,7	11,9	13,0	14,0	14,6
38° S	14,5	13,5	12,4	11,1	10,1	9,5	9,8	10,6	11,8	13,1	14,2	14,8
40° S	14,7	13,6	12,4	11,1	9,9	9,3	9,6	10,5	11,8	13,1	14,3	15,0





Legenda

-  Lagoas
-  Rodovias
-  Malha de Ruas
-  Drenagem
-  Limite Municipal
-  Estação Fluviométrica - IGAM
-  Estação Climatológica - EMBRAPA
-  Estação Climatológica - INMET
-  Localização de Sete Lagoas
-  Municípios de Minas Gerais

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas

CONTRATANTE:		 <p>SAAE Serviço Autônomo de Água e Esgoto</p>
PROJETO:		
TÍTULO:		Figura 7.7 Localização da estação meteorológica e fluviométrica
ELABORADO:		Daniela Barbatl Osório
CONTRATO:	3988	 <p>Servmar AMBIENTAL & ENGENHARIA</p>
ESCALA:	1:125.000	
DATA:	DEZ/2013	

Projeção Transversal de Mercator
South American Datum 1969 (SAD69)
Zona 23 S

0 5.000 10.000 m
1:750.000

Armazenamento de Água (ARM) ou Capacidade de Campo (CAD): trata-se da quantidade de água contida no solo, após ter sido drenado o excesso de água gravitacional e após ter diminuído muito a velocidade do movimento descendente da água. É a capacidade máxima que um solo tem de reter água em seus capilares, contra a ação da gravidade. Para a área de estudo, o valor de CAD adotado foi de 150 mm, devido ao predomínio de uma vegetação com raízes pouco profundas e às características do solo, de acordo com a proposta de Fenn et al (1975), demonstrada na **Tabela 7.5** abaixo.

Tabela 7.5 Armazenamento de água no solo por tipo de solo (FENN et al, 1975)

Tipo de solo	Capacidade de Campo (mm)
Areia fina/argilosa	150
Franco arenoso	200
Franco siltoso	300
Franco argiloso	375
Argila	450

Déficit Hídrico (DEF): definição dos períodos e das magnitudes da deficiência hídrica no solo, representada pelos períodos em que a evapotranspiração potencial é maior do que a evapotranspiração real.

Excedente Hídrico (EXC): trata-se da água perdida por escoamento superficial ou subterrânea/percolação profunda (recarga dos aquíferos). A obtenção destes valores separados só pode ser determinada mediante o hidrograma das curvas de escoamento superficial e subterrâneo (visto a seguir) ou por métodos indiretos. Para isso, foi consultado o hidrograma das vazões médias mensais do rio Jequitibá, no qual representa a relação de descarga da bacia do referido curso d'água, próximo de sua confluência com o rio das Velhas, para o período de recorrência de 15 anos (1976 - 1990). Os dados utilizados, tanto na execução do balanço hídrico, quanto os extraídos no posto fluviométrico de Fazenda Contagem, podem ser vistos na **Tabela 7.6**.



Tabela 7.6 Comportamento médio mensal da precipitação e temperatura e vazões médias mensais do rio Jequitibá.

Estação INMET – EMBRAPA - Sete Lagoas (1961-1990)			Posto Fluviométrico Fazenda Contagem-Jequitibá* (1976-1990)
Meses	Precipitações Médias Mensais (mm)	Temperaturas Médias Mensais (°C)	Descargas Médias Mensais (m ³ /s)
JAN	251,8	22,7	13,39
FEV	172,6	22,9	13,03
MAR	106,3	22,7	10,04
ABR	49,3	21,1	7,05
MAI	23,9	19	4,68
JUN	7,8	17,8	3,92
JUL	16,4	17,5	3,23
AGO	11,8	19,4	2,78
SET	30,1	21	2,70
OUT	120,9	22,1	3,02
NOV	224,2	22,3	6,05
DEZ	256,7	22,4	10,87
Média Total	105,98	20,91	6,75
Acumulado	1377,78	-	80,76

* dados retirados de Pessoa (1996).

Hidrograma do Rio Jequitibá

Denominado hidrógrafa ou hidrograma, nada mais é que a representação gráfica da vazão que passa por uma seção no rio, ou ponto de controle, em função do tempo, podendo ser caracterizada por três fases principais: 1) ascensão, altamente correlacionada com a intensidade da precipitação; 2) região do pico, próximo ao valor máximo, quando o hidrograma começa a mudar de inflexão, resultado da redução da alimentação de chuvas e/ou amortecimento da bacia. Esta região termina quando o escoamento superficial acaba resultando somente o escoamento subterrâneo; e 3) recessão, onde, nesta fase, somente o escoamento subterrâneo está contribuindo para a vazão total do rio.

A parcela de escoamento superficial pode ser identificada diretamente no hidrograma, observado por métodos gráficos que se baseiam na análise qualitativa. Existem três métodos gráficos tradicionalmente usados (**Figura 7.8**):

- Método 1: extrapolando-se a curva de recessão, a partir do ponto C até encontrar o ponto B, localizado abaixo da vertical do pico, e ligando-se os pontos A, B e C. O volume acima da reta ABC é o escoamento superficial e o volume abaixo é o escoamento subterrâneo;
- Método 2: método mais simples, ligando apenas os pontos A e C por uma reta; e



- Método 3: consistindo em extrapolar a tendência anterior ao ponto A até a vertical do pico, encontrando o ponto D. Ao ligar os pontos D e C, obtém-se a separação dos escoamentos.

O ponto A é caracterizado pelo início da ascensão do hidrograma, ou do escoamento superficial. O ponto C é caracterizado pelo término do escoamento superficial e início da recessão. Para a determinação do ponto C, existem vários critérios, como a inspeção visual por meio da plotagem das vazões numa escala mono-log, (vazão na escala logarítmica), ou pelo método de Linsley *et al* (1975), vista na equação abaixo:

$$N = 0,872 \cdot A^{0,2}$$

Onde, N = tempo entre o pico do hidrograma e o tempo do ponto C, em dias; e A é a área da bacia em km².

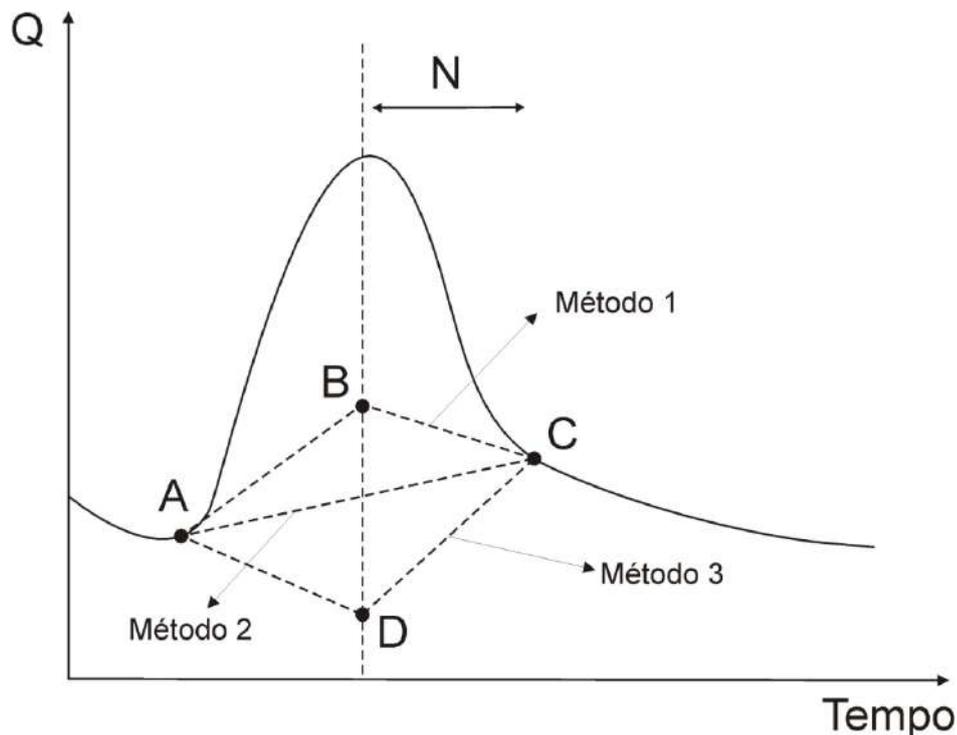


Figura 7.8 Métodos de separação gráfica.

No caso dos estudos realizados em Sete Lagoas, foi adotado o “método 2” para a identificação da interface escoamento superficial/subterrâneo e o método de Linsley *et al* (1975), para se estimar o ponto C. O método 2 utilizado foi o escolhido pela simplificação



dos cálculos aplicados neste método. O método de Linsley *et al* (1975) foi adotado pela precisão do cálculo, sendo que o outro método seria a partir da inspeção visual, calculando o intervalo entre o pico do hidrograma e o tempo do ponto C. O método de Linsley *et al* (1975) proporciona valores mais exatos, evitando possíveis erros oriundos da análise visual.

Caracterização da Precipitação Pluviométrica e da Temperatura do Ar

Utilizando-se os dados médios mensais da temperatura do ar e precipitação, pôde-se fazer uma relação do comportamento médio mensal (**Tabela 7.7** e **Figura 7.9**).

Tabela 7.7 Comportamento médio mensal da precipitação e temperatura (Estação INMET – EMBRAPA - Sete Lagoas)

Meses	P Média	T Média
Jan	251,80	22,70
Fev	172,60	22,90
Mar	106,30	22,70
Abr	49,30	21,10
Mai	23,90	19,00
Jun	7,80	17,80
Jul	16,40	17,50
Ago	11,80	19,40
Set	30,10	21,00
Out	120,90	22,10
Nov	224,20	22,30
Dez	256,70	22,40
Média Total	105,98	20,91
Acumulado	1377,78	-

T Média: Temperatura Média; P Média: Precipitação Média.

É importante ressaltar que os três meses mais chuvosos são novembro, dezembro e janeiro, correspondendo a 53,18% da precipitação anual.



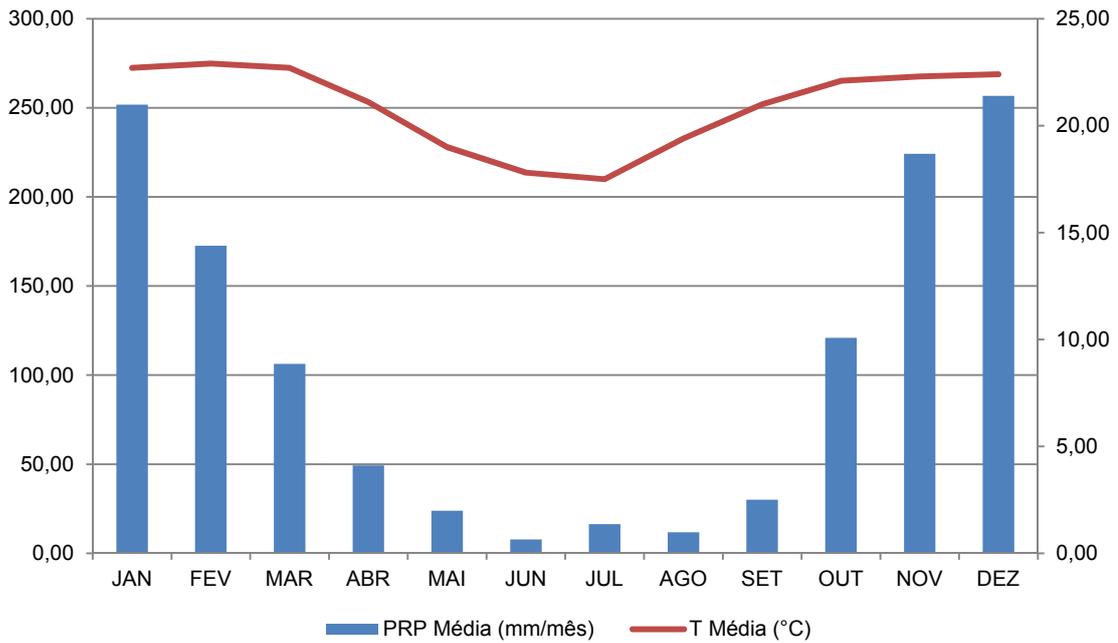


Figura 7.9 Relação entre precipitação média mensal e temperatura média mensal.

Estimativas do Balanço Hídrico Climatológico

Na **Tabela 7.8**, encontram-se os dados de precipitação, excedente de água, déficit hídrico, evapotranspiração potencial e evapotranspiração real, estimados pelo método proposto por Thornthwaite & Mather (1955). A partir desses resultados, foi possível avaliar, também, a recarga do aquífero livre ou a taxa de infiltração da água no solo, a partir do resultado do excedente hídrico. A **Tabela 7.9** apresenta os dados utilizados para a elaboração do balanço hídrico na região.

Tabela 7.8 Dados acumulados de precipitação, excedente de água, deficiência de água, evapotranspiração potencial e evapotranspiração real.

Estações	PRP (mm)	EXC (mm)	DEF (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)
Sete Lagoas	1377,78	420,44	133,23	1090,57	957,34

PRP: Precipitação Média; EXC: Excedente Hídrico; DEF: Déficit hídrico; ETP: Evapotranspiração Potencial; ETR – Evapotranspiração Real.



Teoricamente, quando os valores da curva da PRP estão abaixo da curva da ETP ocorre o consumo da água que está retida no solo, até que se esgote a capacidade de campo disponível (CAD). Segue-se, então, o período de deficiência de água no solo, o que se prolonga até que os valores da curva da PRP ultrapassem a curva de ETP, iniciando-se a reposição de água no solo, até completar a CAD. Uma vez completada tal capacidade, a sobra é considerada como excedente hídrico (EXC). Os meses em que ocorre esse excedente hídrico correspondem àqueles em que deve ocorrer recarga de água subterrânea, por meio da percolação profunda.

Tendo esse raciocínio em mente, e observando a **Figura 7.10**, o balanço hídrico estimado para a área de influência da estação de Sete Lagoas mostrou que, a partir do mês de janeiro, iniciou-se a redução dos índices pluviométricos, mantendo essa tendência até o mês de junho. Essa tendência não foi observada nas curvas de evapotranspiração real e potencial, mantendo-se quase que constantes até o mês de março, tendo uma pequena queda até junho e, posteriormente, a partir de julho, o início de sua recuperação. Como o declínio da temperatura no inverno reduz o processo de evapotranspiração e os estoques de água no solo são utilizados lentamente pela vegetação, os maiores déficits hídricos só começaram a ser notados a partir do mês de abril, finalizando no início de outubro. Com o início das chuvas mais significativas, a partir de outubro, e que vai até dezembro, essa deficiência hídrica foi compensada pela reposição de água devido à elevação nos índices de precipitação, até que se alcançou a capacidade de campo considerada, de 150 mm. Diante disso, iniciou-se, entre os meses de janeiro e março, o período que apresentou maior disponibilidade hídrica, ou excedente de água no solo.

Em síntese, o balanço hídrico dividiu-se, mensalmente, em:

- Excedentes hídricos: janeiro a março;
- Déficits hídricos: abril a setembro; e
- Reposição hídrica: outubro a dezembro.



Tabela 7.9 Balanço hídrico climatológico – Estação Sete Lagoas.

Meses	PRP MÉDIA	T MÉDIA	ETP (mm)	P-ETP (mm)	Neg. Acum. (mm)	ARM (mm)	ALT (mm)	DEF (mm)	ETR (mm)	EXC (mm)
JAN	251,8	22,7	112,86	138,94	0	150	0	0	112,86	138,94
FEV	172,6	22,9	99	73,6	0	150	0	0	99	73,6
MAR	106,3	22,7	103,95	2,35	0	150	0	0	103,95	2,35
ABR	49,3	21,1	78,57	-29,27	-29,27	123	27	2,27	76,3	0
MAI	23,9	19	60,48	-36,58	-65,85	96	27	9,58	50,9	0
JUN	7,8	17,8	52,44	-44,64	-110,49	71	25	19,64	32,8	0
JUL	16,4	17,5	48,45	-32,05	-142,54	57	14	18,05	30,4	0
AGO	11,8	19,4	65,34	-53,54	-196,08	37	20	33,54	31,8	0
SET	30,1	21	81	-50,9	-246,98	26	11	39,9	41,1	0
OUT	120,9	22,1	97,2	23,7	-223,28	31	5	0	97,2	18,7
NOV	224,2	22,3	101,37	122,83	-100,45	76	45	0	101,37	77,83
DEZ	256,7	22,4	106,02	150,68	0	150	74	0	106,02	76,68
Média Total	105,98	20,91	83,89	22,09	-92,91	93,08	20,67	10,25	73,64	32,34
Acumulado	1377,78	-	1090,57	287,21	-	-	-	133,23	957,34	420,44

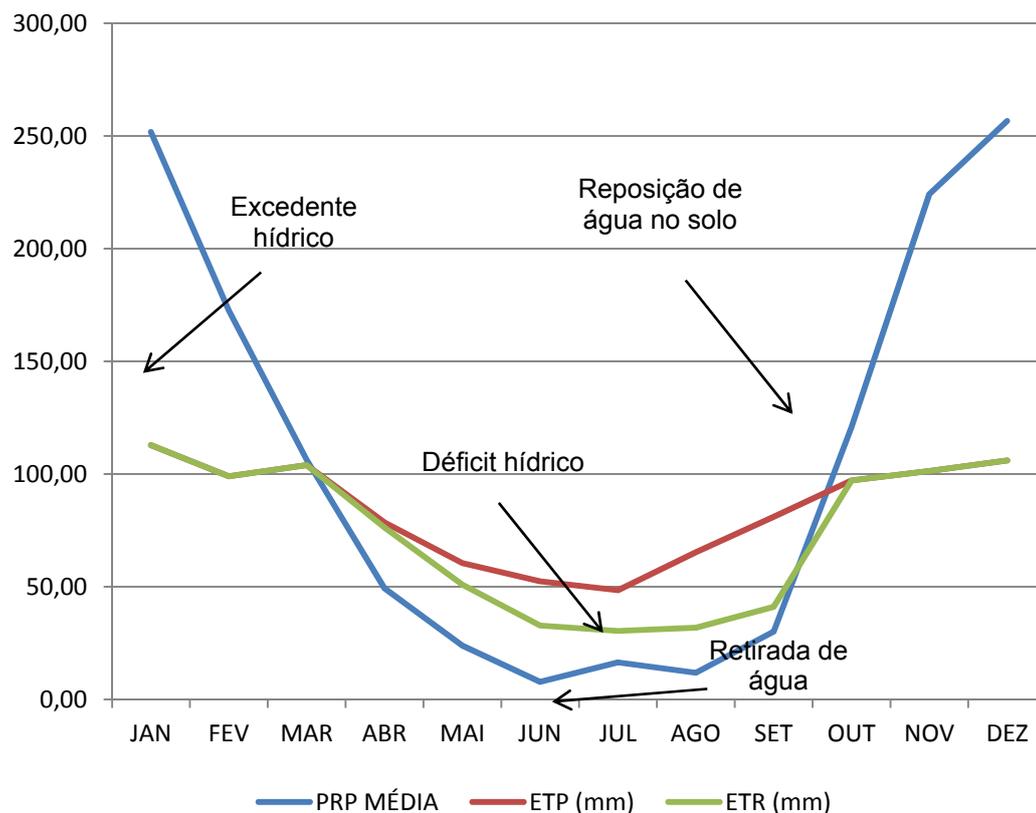


Figura 7.10 Balanço hídrico médio mensal para o município de Sete Lagoas



Análise do Hidrograma do Rio Jequitibá

Como os valores estimados dos excedentes hídricos tratam das parcelas de água perdida por escoamento superficial e escoamento subterrâneo, o próximo passo foi a obtenção destes valores separados mediante a análise do hidrograma de recessão das vazões do rio Jequitibá, segundo os métodos citados por Magalhães (*apud* ABRH 1989).

A partir do método de Linsley *et. al* (1975), onde a área da bacia é igual a 621,06 km², foi possível determinar o valor de $N = 3,156045071$. Com isso, o ponto C, que determina o final do escoamento superficial, foi plotado no hidrograma e, junto com o ponto A (início do escoamento superficial), determinado a separação dos escoamentos (**Figura 7.11**).

Analisando a **Figura 7.11**, é possível observar que, após o início da chuva, existe um intervalo de tempo em que o nível do rio começa a se elevar (ponto A). Este tempo retardado de resposta deve-se às perdas iniciais por interceptação vegetal e depressões do solo, além do próprio retardo de resposta devido ao tempo de deslocamento da água pela bacia. O hidrograma atinge o máximo (ponto B), de acordo com a distribuição de precipitação, e apresenta, a seguir, a recessão onde se observa um ponto de inflexão (ponto C). Este ponto caracteriza o fim do escoamento superficial e a predominância do escoamento subterrâneo. O primeiro ocorre em um meio (superficial) que torna a resposta rápida, finalizando antes do escoamento subterrâneo que, por escoar pelo solo poroso, apresenta um tempo de retardo maior.



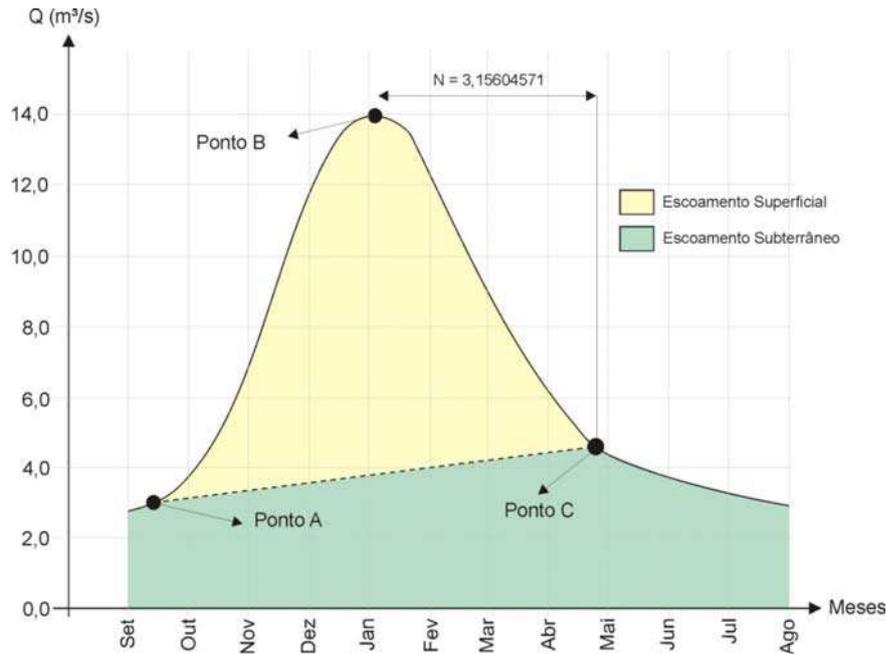


Figura 7.11 Comportamento do hidrograma do rio Jequitibá.

Compartimentação dos fluxos e estimativas dos escoamentos superficial e subterrâneo

Após essas análises, foi possível calcular a separação dos escoamentos superficial e subterrâneo, determinando suas porcentagens de contribuição na descarga total. Após isso, a partir dos cálculos das áreas de cada escoamento foi possível também estimar as vazões, em m^3/ano , desses excedentes (**Tabela 7.10**).

Tabela 7.10 Elementos de cálculo da separação do escoamento superficial e subterrâneo.

Mês	Vazão (m^3/s)	Método 2	
		Vazão Subterrânea (m^3/s)	Vazão Superficial (m^3/s)
Set	2,71	2,71	0
Out	3,02	2,92	0,1
Nov	6,05	3,18	2,87
Dez	10,87	3,45	7,42
Jan	13,39	3,71	9,68
Fev	13,03	3,98	9,05
Mar	10,04	4,22	5,82
Abr	7,05	4,51	2,54
Mai	4,68	4,68	0
Jun	3,92	3,92	0
Jul	3,23	3,23	0
Ago	2,78	2,78	0
Acumulado	80,77	43,29	37,48
Porcentagem	100%	54%	46%
Vazão (m^3/ano)	$199,4 \times 10^6$	$107,6 \times 10^6$	$91,7 \times 10^6$



A descarga total no rio possui uma vazão de $199,4 \times 10^6$ m³/ano, sendo que o escoamento subterrâneo responde a 54% desse excedente hídrico, com vazão de $107,6 \times 10^6$ m³/ano, restando 46% para a descarga superficial, de $91,7 \times 10^6$ m³/ano. Como o valor do excedente hídrico é de $261,1 \times 10^6$ m³/ano (EXC = 957,34 mm x Área da bacia = 621,06 km²), a diferença entre a vazão da descarga total no rio e o excedente hídrico, que foi igual a $61,6 \times 10^6$ m³/ano, pode ser considerado como perdas relacionadas à captação subterrânea ou de perdas de outra natureza. De posse de todas essas análises, foi possível sintetizar todos os quantitativos dos componentes hidrológicos, na **Tabela 7.11**.

Tabela 7.11 Quantitativos dos componentes hidrológicos.

Componentes Hidrológicos		Volume Total (mm)	Vazão Total (m ³ /ano)	Vazão Total (m ³ /s)
Parâmetros	%			
Precipitação média anual		1377,78	$855,6 \times 10^6$	27,14
Evapotranspiração real		957,34	$594,5 \times 10^6$	18,86
Excedente hídrico		420,44	$261,1 \times 10^6$	8,28
Excedente hídrico	Escoamento superficial	147,71	$91,7 \times 10^6$	2,91
	Escoamento subterrâneo	173,40	$107,6 \times 10^6$	3,41
	Captação subterrânea	99,33	$61,6 \times 10^6$	1,96

Dessa forma, considerando a precipitação média anual como 100%, ou uma vazão de $8,56 \times 10^8$ m³/ano, de todo o aporte hídrico da bacia do rio Jequitibá, 69,49% desse total, ou uma vazão de $5,95 \times 10^8$ m³/ano, são destinados a evapotranspiração real, enquanto que os 30,51% restantes da água do sistema ($2,61 \times 10^8$ m³/ano), são destinados ao excedente hídrico, sendo esse total de excesso de água dividido em três componentes: 12,58%, ou $1,08 \times 10^8$ m³/ano, de escoamento subterrâneo; 10,72%, ou $9,17 \times 10^7$ m³/ano, de escoamento superficial; e 7,21%, ou $6,17 \times 10^7$ m³/ano, de perdas hídricas, que podem estar relacionadas com as captações subterrâneas e/ou perdas de outra natureza.

Diante do exposto, pode-se considerar que o aporte total de água ao sistema hídrico subterrâneo é a somatória de duas componentes: o escoamento subterrâneo e as denominadas “perdas hídricas” que se conclui estarem associadas às captações subterrâneas. Desse modo, tem-se que a contribuição ao sistema hídrico subterrâneo é de 19,79% das precipitações ou o equivalente a $169,2 \times 10^6$ m³/ano.



7.3 RESERVAS, POTENCIALIDADES E RECURSOS EXPLOTÁVEIS

A avaliação dos recursos hídricos subterrâneos das reservas e recursos dos aquíferos representa papel de fundamental importância para gestão dos recursos hídricos subterrâneos, de forma a conduzir racionalmente o controle da extração da água e suas formas de uso e proteção. Uma postura sempre conservadora de início é aconselhável, de modo que essas reservas se tornem sustentáveis, sofrendo reavaliações à medida que o conhecimento do sistema aquífero evolui. Com isso, os valores estimados para as reservas devem ser adotados como o início do processo de gerenciamento deste bem.

Segundo o modelo hidrogeológico conceitual, o Sistema Aquífero Cárstico Sete Lagoas (SACSL) apresenta o maior potencial hídrico para o município. De natureza confinante, em sua maior parte, possui zonas de afloramento que recarregam esses aquíferos. Devido a isso, as avaliações, vistas a seguir, foram feitas para essa situação, utilizando alguns conceitos ligados às reservas de aquíferos confinados e valores estimados pelo balanço hídrico.

7.3.1 RECURSOS DISPONÍVEIS

Recursos disponíveis são aqueles em que já existe exploração significativa e que envolve dois tipos: disponibilidade instalada e disponibilidade efetiva (FEITOSA et al. 2008).

A disponibilidade instalada é a descarga possível de ser obtida a partir das captações existentes no aquífero, considerando-se o bombeamento em regime contínuo, sendo utilizados os dados de vazões dos poços, considerando um regime de 24 horas por dia. Em outras palavras, é a capacidade máxima de exploração em um regime ininterrupto.

A disponibilidade efetiva é a descarga anual bombeada estimada por meio do controle das captações existentes em funcionamento. É geralmente inferior à disponibilidade instalada, pois, em geral, sobretudo em obras privadas, as vazões captadas são inferiores à vazão ótima e o regime de bombeamento, dificilmente ultrapassa 8 h/dia, sendo até mesmo comum, o uso em dias descontínuos. Na prática, esses valores somente podem ser obtidos a partir de levantamentos sobre a situação de uso, a vazão horária, horas bombeadas por dia e número de dias por semana.



Os dados relativos à operação dos poços são incompletos, até mesmo para os poços do SAAE. A informação que se tem sobre o regime de operação dos poços do SAAE é que, de modo geral, operam ininterruptamente, pois alguns sistemas de abastecimento utilizando o próprio bombeamento dos poços para pressurizar as tubulações da rede de distribuição. Vale salientar que não há medidores (hidrômetros) instalados nos poços, sendo que a macromedição ocorre por hidrômetros instalados na saída de alguns reservatórios ou por estimativas a partir da vazão nominal do poço.

Em relação às informações de poços particulares a situação é ainda pior. A disponibilidade de informações está associada aos usuários outorgados que, nestes casos, recebem autorização para captar um volume máximo definido, por uma determinada quantidade de horas por dias e determinado dias por mês. Desse modo, pode-se estimar a vazão nominal de captação legalmente permitida, embora seja desconhecida, mesmo para esses casos, a captação efetivamente realizada pelo usuário do recurso hídrico subterrâneo.

A seguir será descrito o método aplicado para estimar a captação (exploração) de água subterrânea dos aquíferos em Sete Lagoas, ressaltando que, diante das limitações discutidas acima acerca dos dados disponíveis, os valores alcançados necessitam ser confirmados a partir de futuras medidas de gestão, controle e fiscalização que visem ampliar as informações sobre os dados dos usuários das águas subterrâneas.

O banco de dados dos poços produtores de água de Sete Lagoas consistido neste estudo foi a fonte das informações utilizadas para a estimativa dos recursos disponíveis ou volumes explorados dos aquíferos.

O método de cálculo foi diferenciado para os poços públicos (SAAE) e particulares. A partir dos dados de vazão do poço registrados no cadastro, obteve-se a vazão média que foi replicada para os poços sem registro de vazão. A vazão média dos poços do SAAE foi calculada em 36 m³/h e dos poços particulares em 23 m³/h. Para o regime de operação dos poços foi aplicado procedimento similar, sendo aplicado regime de 24 h/dia de operação dos poços do SAAE e 11h/dia para o funcionamento dos poços particulares. A partir desses procedimentos, foi obtido volume de captação diário para todos os poços do cadastro.



Os recursos disponíveis em Sete Lagoas totalizaram 196.669 m³/dia ou 71.784.185 m³/ano. Nessa estimativa foram desconsiderados 26 poços do cadastro que continham os seguintes registros de situação: desativado, não equipado, não instalado e inoperante. Desse modo, os recursos disponíveis estimados correspondem ao funcionamento de 519 poços tubulares, operando em diferentes regimes diários por todos os dias do ano.

A **Figura 7.12** a seguir apresenta a distribuição dos poços por tipo de uso, em quantidade de poços (a) e em volume explorado (b).

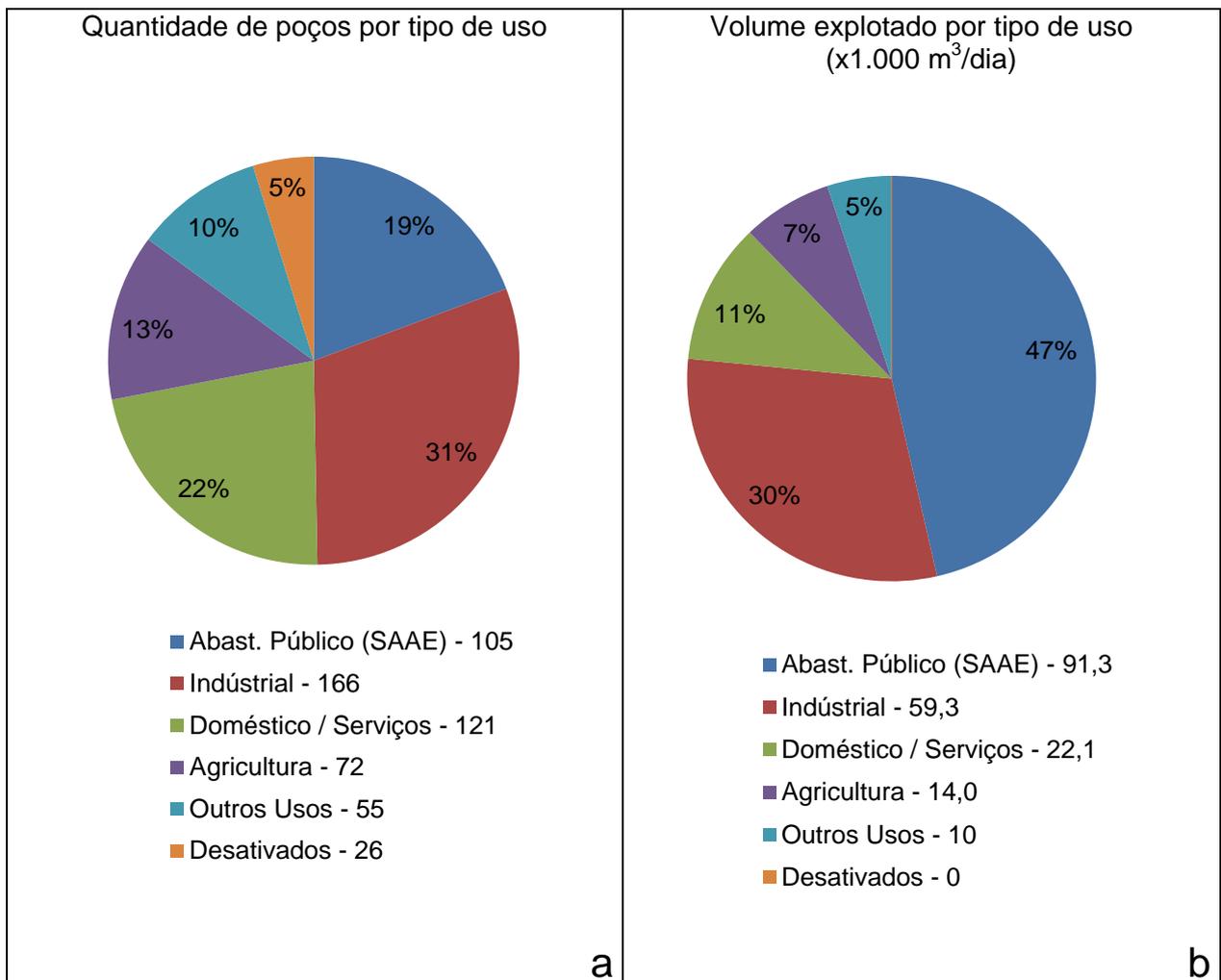


Figura 7.12 Gráficos da distribuição de poços por tipo de uso: quantidade de poços (a); volume explorado (b)

Em análise à **Figura 7.12**, nota-se que os poços de abastecimento público correspondem à 19% dos poços existentes, entretanto respondem por 47% do volume total explorado dos aquíferos. Destaca-se também a captação para usos industriais com 30% de volume explorado.



No intuito de entender a distribuição espacial dessas captações na área de estudo, foi elaborado um mapa das vazões dos poços. Devido à característica pontual das captações subterrâneas, a área de estudo foi gradeada em quadrículas ou células de 500 x 500 m e, nessas quadrículas, foram somados os volumes explorados pelos poços nelas inseridos, conforme demonstrado na **Figura 7.13**. Desse modo, buscou-se a compreensão acerca do adensamento dos volumes explorados.

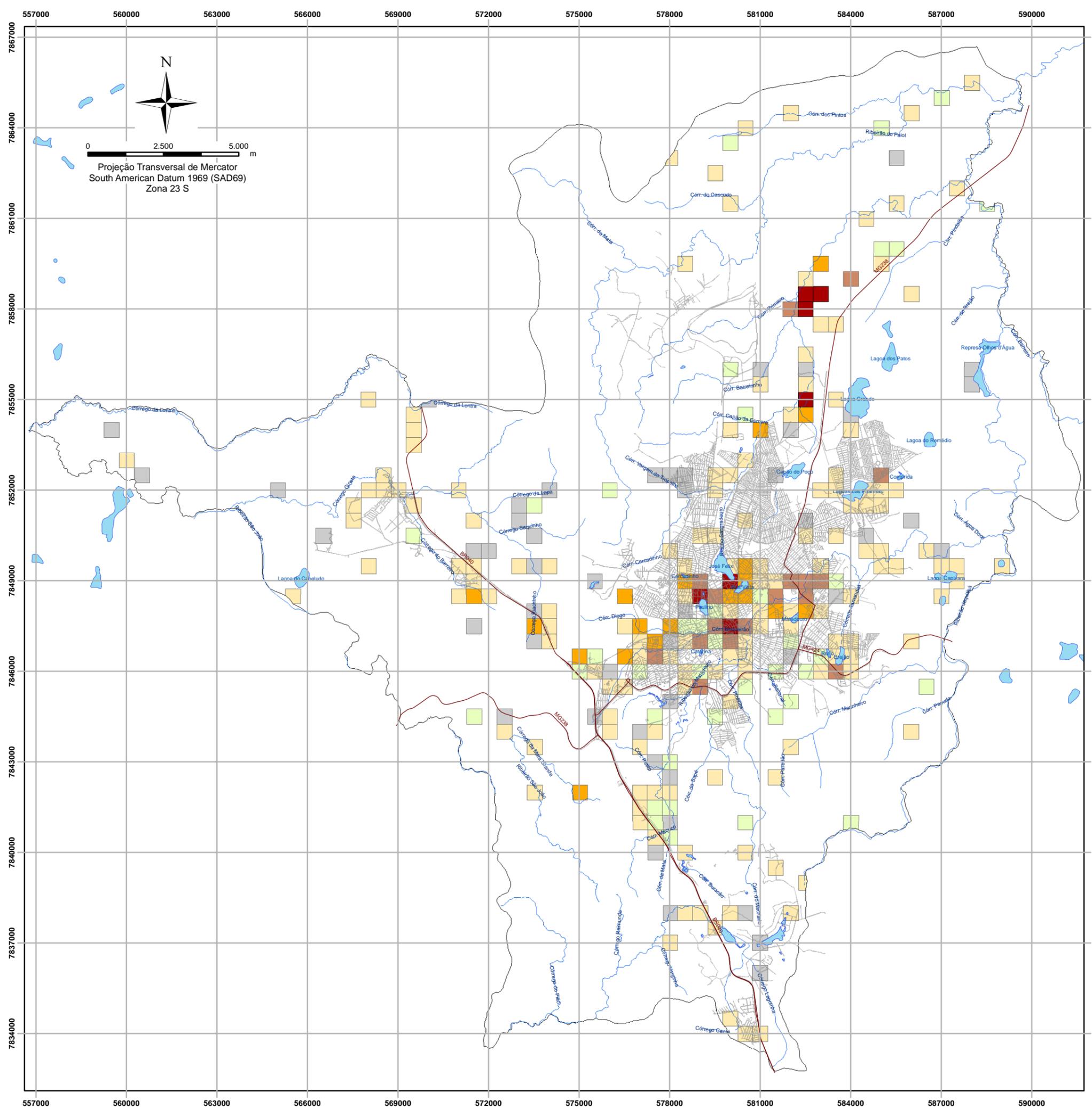
No capítulo 4, pode ser observada a distribuição do adensamento do número de poços no município (**Figura 4.11**). É elevada a correlação entre o adensamento de poços e o adensamento das vazões, como esperado.

Em análise à **Figura 7.13** é possível observar que na região central de Sete Lagoas concentram-se os maiores volumes captados. A exploração máxima obtida em uma quadrícula é de 8.170 m³/dia, situada a norte da lagoa Paulino. Merecem destaques também a região industrial na zona norte do município, onde estão situadas indústrias grandes usuárias de águas, ocorrendo 3 quadrículas contíguas com vazões acima de 4.000 m³/dia e, nas proximidades da MG238, a oeste da lagoa Grande, se observa de maneira isolada uma quadrícula com elevado volume de captação.

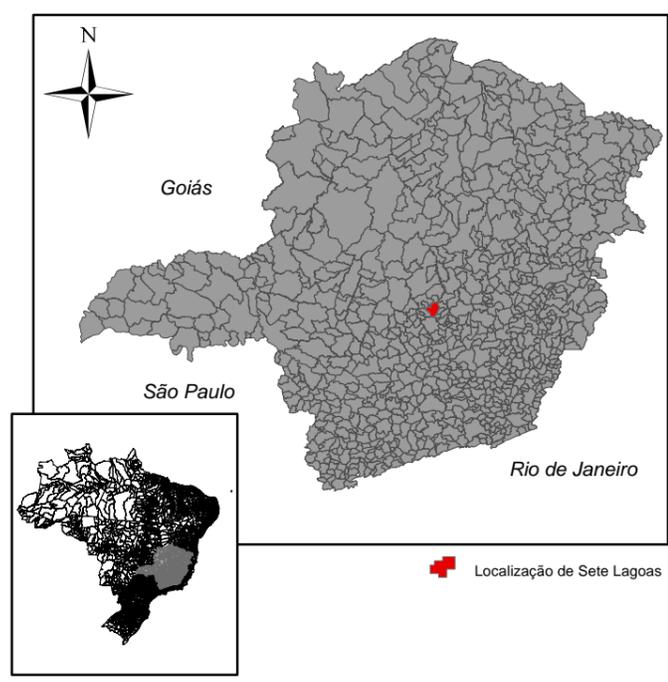
Destaca-se também que, em grande parte do território do município, os recursos hídricos subterrâneos não estão sendo captados, sinalizando a existência de potencialidades ainda não comprometidas. Adiante, neste capítulo, serão apresentadas discussões quantitativas sobre as potencialidades e recursos exploráveis.

Deve-se alertar sobre a possibilidade de valores superestimados de captação subterrânea ou, se reais, sobre fortes desperdícios de água nas práticas dos usuários de Sete Lagoas. O volume total explorado representa um consumo per capita de 918 l/hab/dia. E, mesmo excluindo integralmente os usos industriais, agrícolas e considerando uma perda de 40% do abastecimento público (SNIS, 2011), o consumo per capita ainda é de 588 l/hab/dia, quase três vezes superior ao estabelecido pela Organização Mundial de Saúde.





Projeção Transversal de Mercator
South American Datum 1969 (SAD69)
Zona 23 S



Localização de Sete Lagoas

Legenda

Somatória dos volumes (m³) diários captados nos aquíferos

- 0
- 0,1 - 50,0
- 50,1 - 250,0
- 250,1 - 1000,0
- 1000,1 - 2000,0
- 2000,1 - 4000,0
- 4000,1 - 8168,7

- Lagoas
- Rodovias
- Malha de Ruas
- Drenagem
- Limite Municipal

Nota: Área da quadricula unitária corresponde a 500 x 500 metros (0.25 km²)

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas

CONTRATANTE:		
PROJETO:		
TÍTULO:		ESTUDO HIDROGEOLÓGICO
TÍTULO:		Figura 7.13 Volumes captados dos aquíferos em Sete Lagoas
ELABORADO:		Daniela Barbati Osório
CONTRATO:	3988	
ESCALA:	1:125.000	
DATA:	DEZ/2013	

7.3.2 RESERVA PERMANENTE

Considerada como um volume armazenado passível de mobilização, não renovável e sem participar da vazão de escoamento natural produzido pela recarga, a reserva permanente para aquíferos confinados é, naturalmente, a água que permanece saturando o meio maciço, sendo constituídas pelas reservas de confinamento (V_p) e de saturação (V_s), razão pela qual é procedimento habitual escrevê-la como a soma das parcelas (Feitosa *et al.* 2008):

$$V = V_p + V_s = (A_c \cdot S \cdot \Delta h) + (A \cdot \eta_e \cdot b)$$

Onde, V_s : volume de água de saturação; A : área de ocorrência do aquífero; η_e : porosidade efetiva; b : espessura média de saturação; A_c : área sob confinamento; S : coeficiente de armazenamento, e Δh : carga piezométrica acima da base da camada confinante.

Apesar da determinação dessas reservas serem feitas a partir de fórmulas simples, é inevitável a ocorrência de imprecisões, principalmente devido à complexidade geológica dos reservatórios subterrâneos e a dificuldade oferecida para uma melhor compreensão das suas geometrias, principalmente em regiões cársticas. Devido a essas limitações, foi feita uma estimativa das reservas e recursos do SACSL, para dois cenários:

- Cenário 1: aquífero carbonático com condutos cársticos de 0,5 metro de espessura, contínuo e concordante ao acamamento. Objetivo: avaliação moderada do volume de reserva permanente (cenário intermediário); e
- Cenário 2: aquífero carbonático com condutos cársticos de 1,0 metro de espessura, contínuo e concordante ao acamamento. Objetivo: estimativa mais otimista do volume de reserva permanente (melhor cenário, dentre os dois).

Os dois valores de espessura adotados para os cenários 1 e 2 foram baseados nas informações das filmagens óticas, que indicaram variações médias das zonas de condutos cársticos entre 0,5 e 1,0 metro de espessura. Como o valor considerado para a espessura do aquífero foi de 80,0 metros, então o cenário 1 terá 79,5 metros (0,5 metro restante destinado à espessura do carste saturado), enquanto que o cenário 2 terá 79,0 metros (1,0 metro restante destinado à espessura do carste saturado).



De acordo com a fórmula vista acima, são necessários dados sobre a porosidade efetiva. A Tabela 7.12 apresenta valores de literatura (DRISCOLL, 1987) para a porosidade efetiva de alguns materiais geológicos, tendo sido adotado 5% para o SACSL.

Tabela 7.12 Valores de porosidade efetiva para alguns materiais geológicos.

Litologia	Porosidade Efetiva (%)
Argila	1 – 10
Areia	10 – 30
Cascalho	15 – 30
Areia e cascalho	15 – 25
Arenito	5 – 15
Folhelho/Calcário	0,5 – 5

A **Figura 7.14** apresenta a área de confinamento considerada para fins de cálculo, sendo estimada em 248,16 km², limitada ao sul pelo contato com o domínio cristalino, e nas outras regiões, pelas informações da potenciométrica. O valor adotado para o coeficiente de armazenamento foi 10⁻⁴, baseado na média dos valores determinados em testes de aquífero, enquanto que o valor médio da carga hidráulica foi de 50 metros, conforme já apresentado anteriormente neste capítulo.

Para a reserva de saturação (V_s), os valores adotados para área de ocorrência do aquífero, a porosidade efetiva e a espessura saturada mínima foram respectivamente: 306,11 km², 5% (valor considerado para calcário nos dois cenários), 79,5 metros, para o cenário 1 (0,5 metro restante destinado à espessura do carste saturado); e 79,0 metros para o cenário 2 (1,0 metro restante destinado à espessura do carste saturado).

Somando-se as parcelas de V_s e V_p , o volume permanente estimado para a área estipulada, para os dois cenários, foram:

- Cenário 1: 1,370 km³; e
- Cenário 2: 1,460 km³.



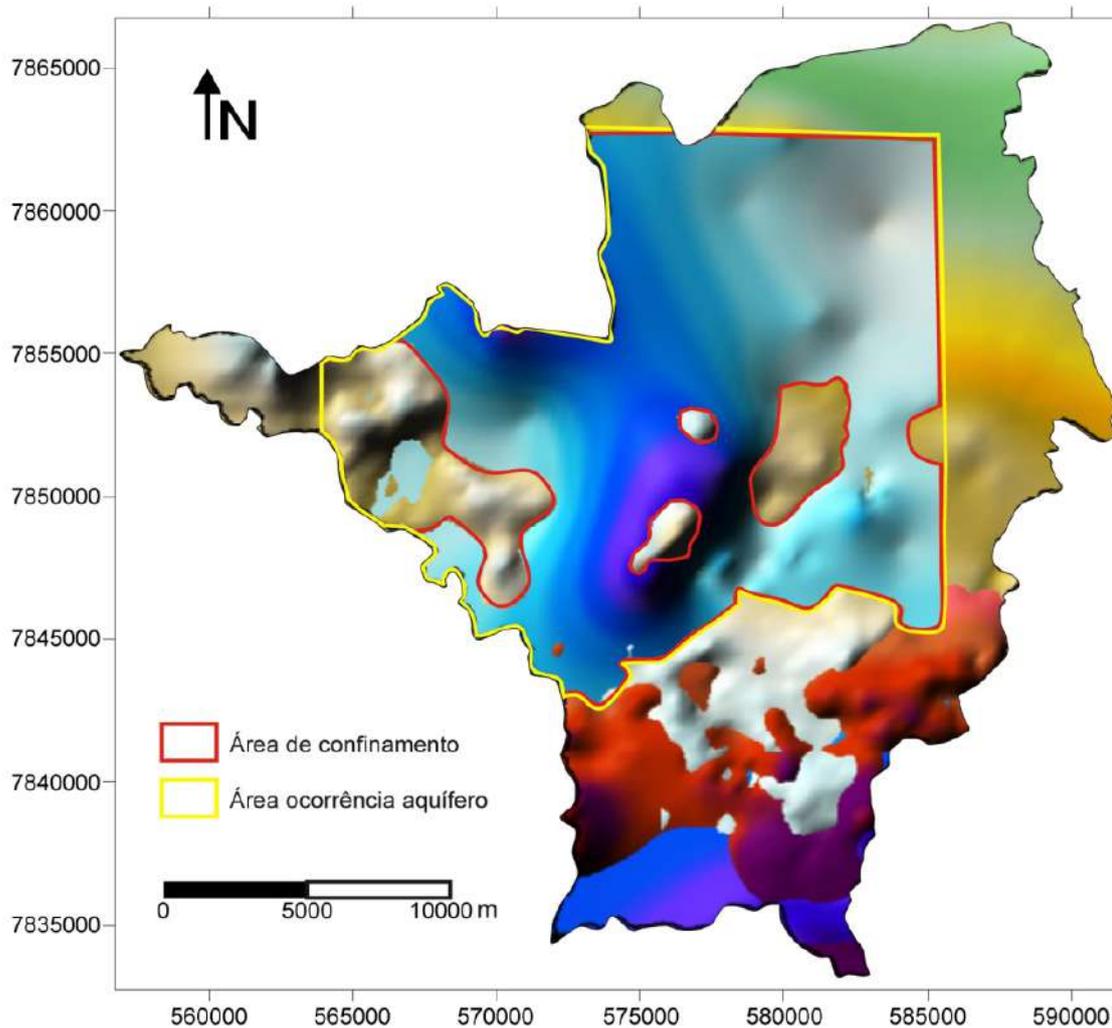


Figura 7.14 Áreas de confinamento e de ocorrência do SACSL aplicadas nas estimativas da reserva permanente.

7.3.3 RESERVA RENOVÁVEL OU RECARGA

A reserva renovável corresponde ao volume hídrico acumulado no aquífero, em função da porosidade efetiva, ou do coeficiente de armazenamento, e variável anualmente em decorrência do balanço entre os aportes sazonais, em geral, dado pelo excedente hídrico da precipitação pluviométrica, e das saídas nos exutórios do aquífero. Essa parcela de água anualmente aportada ao aquífero corresponde à recarga.

Deve-se destacar que outras componentes de fluxo podem influenciar nesse volume de água em circulação no aquífero como, por exemplo, entradas (recargas) artificiais advindas



de perdas das redes de abastecimento e vazamentos das redes de esgotos, bem como saídas, por exemplo, as retiradas de água por captações subterrâneas (bombeamento de poços).

No caso da área de estudo, com o balanço hídrico climatológico associado à análise do hidrograma do rio Jequitibá, foi possível estimar a recarga em 20% da precipitação, conforme compartimentação do excedente hídrico (**Tabela 7.11**).

Para uma área de ocorrência do município igual a 538 km² e precipitação anual de 1.380 mm, tem-se um volume anual de precipitação igual a 742,44x10⁶ m³ (0,742 km³). O método de estimativa com base em 20% da precipitação, extrapolado para todo o município, corresponde à recarga anual 148,50x10⁶ m³ (0,148 km³).

Em função das incertezas inerentes ao método, desde o cálculo do excedente hídrico até a extrapolação para toda a área, foi realizada a estimativa da recarga por um segundo método, visando à validação dos resultados obtidos nos cálculos. O método empregado foi de calcular a reserva renovável com a aplicação da Lei de Darcy, calculando a frente de escoamento do SACSL.

A partir da delimitação das linhas equipotencias e de fluxo (**Figura 7.5**), e sendo conhecidos os valores de transmissividade (T), gradiente hidráulico (i) e largura da frente de escoamento (L), foi possível calcular a descarga do fluxo subterrâneo do SACSL a partir da equação:

$$Q=T.i.L$$

Para o cálculo foram consideradas as linhas equipotenciais de 700m (trecho 1) e 710m (trecho 2) e seus respectivos valores de T, i e L, conforme demonstrado na **Figura 7.8**. Para o trecho 01 foram adotados os seguintes valores: T (médio)= 50 m²/h; L = 25.464 m; e i (médio) = 0,009. Enquanto que para o trecho 2: T (médio) = 5 m²/h; L= 11.046 m; e i = 0,010. Em consequência a frente de fluxo (Q) para o trecho 1 e 2 foram 3,065 m³/s e 0,153 m³/s, respectivamente.



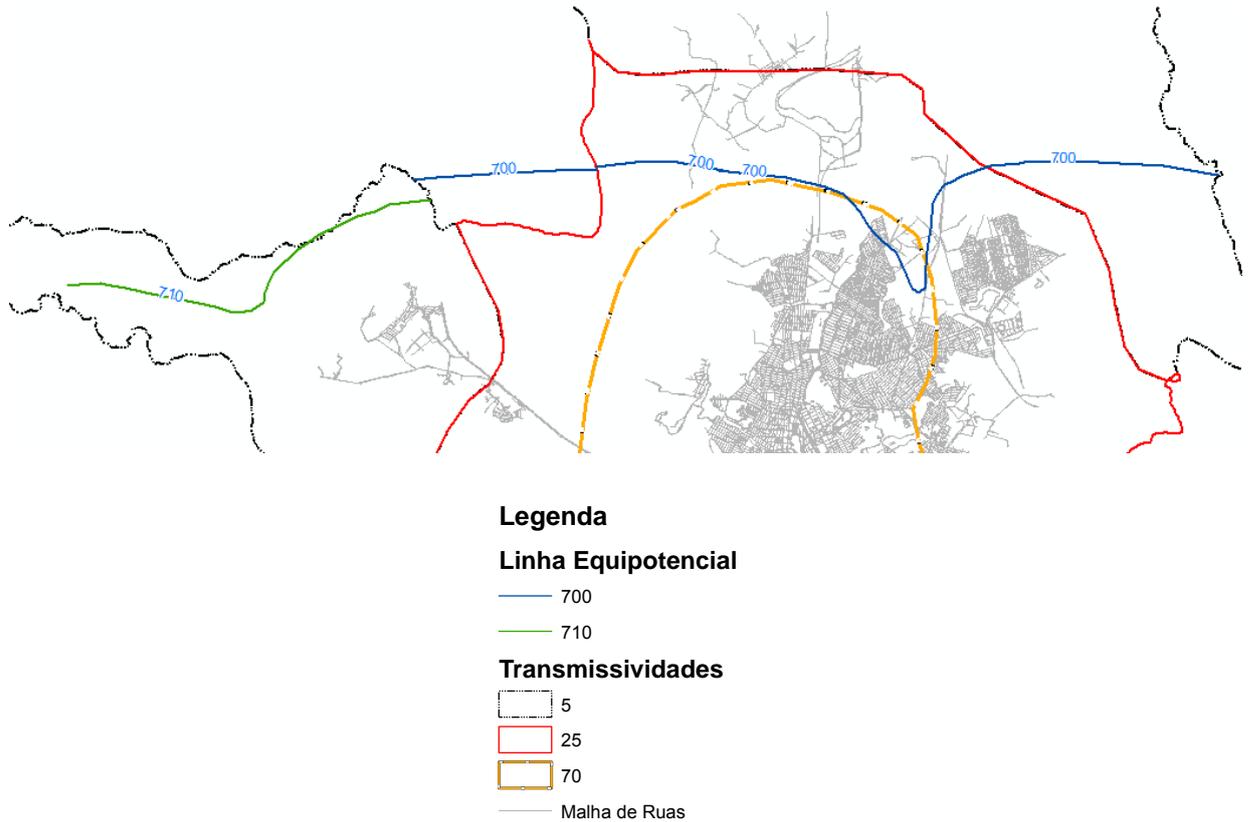


Figura 7.15 Equipotenciais do cálculo da frente de escoamento do SACSL

O total de $Q_{\text{trecho 1}}$ e $Q_{\text{trecho 2}}$, somada a vazão explotada pelos poços, resulta na quantidade total de água aportada no aquífero à montante da frente de fluxo calculada, resultando, aproximadamente, ao volume de recarga da área de estudo.

Para o cálculo da vazão explotada foi adotado o valor de $71,79 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, conforme reserva disponível calculada no item 7.3.1, correspondendo a $2,28 \text{ m}^3/\text{s}$. Desse modo, a recarga calculada com base na Lei de Darcy é de $5,50 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondendo a $172,97 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$.

A comparação dos resultados dos dois métodos obteve uma variação de apenas 14%, conferindo confiabilidade às reservas renováveis calculadas. Variações de ordem são plenamente aceitáveis, diante das incertezas dos reais valores de algumas variáveis utilizadas nos cálculos e da escassez de dados sobre a hidrogeologia. Diante dos valores obtidos, optou-se pela adoção da média dos resultados dos dois métodos e, desse modo, a recarga da área estudo está estimada em $160 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ ou aproximadamente $5 \text{ m}^3/\text{s}$.



7.3.4 POTENCIALIDADE E RECURSOS EXPLOTÁVEIS

As potencialidades ou recursos mobilizáveis podem ser definidos como o volume hídrico extraído anualmente do aquífero, incluindo eventualmente, uma parcela das reservas permanentes, e que não produza um efeito indesejável de qualquer ordem (TODD, 1959). A definição desse efeito é algo complexo, passando por questões de toda a natureza, desde aspectos hidráulicos, assim como por aspectos sociais, econômicos e legais. Os efeitos indesejáveis podem ser classificados (COSTA, 1998):

De ordem econômica:

- Rebaixamentos que inviabilizam o uso econômico da água.

De caráter hidrogeológico:

- Exaustão do aquífero (dano ao reservatório para qualquer uso);
- Inviabiliza o uso das captações existentes por limite das câmaras de bombeamento;
- Provoca o acesso ao aquífero de água de qualidade inaceitável; e
- Provoca recalque do terreno, que prejudica estradas, prédios, tubulações, etc.

Conflito de uso (social, legal ou ambiental):

- Prejudica usuários de poços, o equilíbrio do meio ambiente que depende das descargas de rios e de fontes, ou de lagoas.

Em termos conceituais e analíticos, com base nas estimativas de reserva renovável e volumes explorados (recursos disponíveis), a potencialidade do SACSL poderia ser definida, no limite, como toda a recarga, ou seja, $160 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ e os recursos exploráveis como sendo a diferença entre a potencialidade e o volume explorado, ou seja, cerca de $88 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, indicando um comprometimento de 45% da potencialidade. No entanto, no presente estudo, a potencialidade não deve ser considerada em valor absoluto, como ocorre em diversos trabalhos dessa natureza.

O SACSL, principal manancial subterrâneo e detentor das maiores potencialidade hídricas de Sete Lagoas, possui seus limites além deste município, de onde provavelmente recebe contribuições que não puderam ser mensuradas com os dados disponíveis. É possível,



inclusive, que o SACSL receba contribuições do ACBH, também não passíveis de medição. Desse modo, a potencialidade e mesmo as reservas renováveis podem ser superiores às definidas neste estudo com base nos dados disponíveis.

Assim, a discussão da potencialidade, neste estudo, baseou-se em efeitos indesejáveis potencialmente relacionados com o uso intenso da água subterrânea, tendo como limite da potencialidade os volumes explorados na área de influência de alguns efeitos conhecidos. Os efeitos indesejáveis conhecidos no município e que podem ter relação com o uso intenso da água subterrânea são os abatimentos de terrenos cársticos ocorridos em diversas localidades na zona urbana de Sete Lagoas; queda de níveis de água e de produtividade de poços; e possíveis interferências a ecossistemas aquáticos superficiais, principalmente as diversas lagoas que ocorrem no município.

Este estudo suporta a ideia que sejam as melhores medidas para o momento: i) ampliar o controle e fiscalização com vistas à obtenção de mais e melhores dados para refinar os cálculos do balanço hídricos; e ii) restringir com base nos volumes explorados com potenciais efeitos indesejáveis. Existem diversos setores no município sem qualquer captação das águas subterrâneas e que podem e devem ser considerados como áreas para o suprimento das demandas futuras ou mesmo para substituírem captações de locais intensamente explorados.

Os capítulos relacionados às áreas suscetíveis a abatimentos cársticos e contribuição à gestão dos recursos hídricos subterrâneo trazem as discussões acerca dos limites que nortearão as potencialidades os recursos exploráveis em Sete Lagoas.

8 VULNERABILIDADE NATURAL E RISCO À CONTAMINAÇÃO DO SACSL

Este capítulo apresenta o método e os resultados da caracterização da vulnerabilidade natural à contaminação do SACSL e dos riscos à contaminação com base na avaliação e classificação de atividades com potencial gerador de carga contaminante, conforme método *POSH* (FOSTER et al., 2006).

A temática abordada neste capítulo está relacionada ao aspecto qualitativo das águas subterrâneas condicionada por fatores naturais, bem como por influência de atividades antrópicas.



8.1 VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS DO SACSL

A determinação da vulnerabilidade está relacionada à capacidade de atenuação da zona não saturada, por meio da avaliação e integração de diferentes atributos litológicos e hidrogeológicos. A literatura especializada sinaliza três conjuntos de métodos que podem ser utilizados para avaliar a vulnerabilidade de um aquífero: métodos que empregam modelos de simulação; métodos estatísticos ou de monitoramento; e métodos de índices e superposição.

No caso deste estudo, optou-se pelo método de índices e superposição, que se baseia na análise de alguns parâmetros do aquífero, classificando cada característica de acordo com faixas de valores (parâmetros) e distribuídos espacialmente. Os parâmetros individualmente classificados são sobrepostos para compor o mapa geral de vulnerabilidade. Como exemplos, podem-se citar os seguintes métodos: GOD (FOSTER, 1987); DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987); SINTACS (CIVITA, 1994) e EPIK (DOERFLIGER & ZWAHLEN, 1995).

Os aquíferos cársticos tendem a ser mais vulneráveis à contaminação devido à alta permeabilidade e aos aspectos geomorfológicos, pois a recarga efetiva pode ocorrer em abatimentos topográficos, como sumidouros, dolinas, que atuam em escalas variadas de alguns metros a quilômetros.

A metodologia adotada para a cartografia de vulnerabilidade à poluição foi o método COP (VÍAZ *et al.*, 2006). O COP consiste na multiplicação de três fatores: Concentração de fluxo (Fator C), Camadas de cobertura (Fator O) e Precipitação (Fator P) (**Figura 8.1**).

Fator O: considera as características físicas e as espessuras das camadas acima da zona saturada. Para tanto, são avaliados dois parâmetros: solo [O_s] e as camadas litológicas não saturadas [O_L]. O critério de quantificação do [O_s] é a relação entre espessura e textura do solo, que parte do pressuposto que a influência na capacidade de infiltração é dada pela granulometria predominante, enquanto que o [O_L] é dado pelo tipo de rocha e o grau de fraturamento (ly), assim como a espessura de cada camada (m) e as condições de confinamento (cn).

A partir da classificação da litologia correspondente, é calculado o Índice de Camada, e em seguida, o valor de [O_L], dados pelas seguintes fórmulas, respectivamente:

$$\text{Índice de camada} = ly \cdot m$$

$$[O_L] = \text{Índice de camada} \cdot cn$$



A somatória dos valores calculados para $[O_s]$ e $[O_L]$ resulta no índice O, que classifica o valor de proteção em Muito Baixa, Baixa, Moderada, Alta e Muito Alta (**Figura 8.1**).

Fator C: é um modificador do fator O. Representa o potencial de a água ignorar a proteção das camadas acima da zona saturada, além de levar em consideração a influência de dolinas e/ou sumidouros na direção do escoamento superficial próximo ou *in situ* a essas camadas. A determinação de C considera dois cenários:

Cenário 1: representa a situação em que a área de captação é coberta por uma camada pouco permeável, na qual o escoamento superficial flui para o centro da dolina. Este cenário considera quatro variáveis: a área de influência da dolina e/ou sumidouro (dh), a distância do centro da dolina e/ou sumidouro até o ponto de início da drenagem conectada a dolina, e sua área de influência (ds), além da inclinação do terreno (s) e da vegetação (v). A relação da inclinação com a vegetação fornece o valor sv, que indica que quando a inclinação aumenta e a vegetação é escassa, a vulnerabilidade aumenta. O fator C para o cenário 1 é dado pela equação:

$$C = dh \cdot ds \cdot sv$$

Cenário 2: classifica as áreas que não apresentam características do cenário 1, ou seja, onde ocorre infiltração de forma difusa. A quantificação do índice C para o cenário 2 é avaliada pela combinação de três fatores: característica da superfície (relação entre permeabilidade e feições cársticas) – “sf”, e pela relação (sv) entre inclinação do terreno (s) e vegetação (v). A equação que descreve o índice C para o cenário 2 é:

$$C = (sf) \cdot (sv)$$

O índice C fornece a redução da proteção das áreas avaliadas nos cenários 1 e 2.

Fator P: apresenta a relação entre a quantidade de precipitação $[Pq]$ e a distribuição temporal da precipitação $[PI]$, dada pela função:

$$\text{Distribuição Temporal} = \frac{\text{Precipitação (mm/ano)}}{\text{Nº de dias chuvosos}}$$

O índice P fornece a redução da proteção, e é calculado segundo a equação:

$$P = [Pq] \cdot [PI]$$



Após a quantificação dos fatores “C”, “O” e “P”, calculam-se as classes de vulnerabilidade por meio da equação:

$$\text{COP Index} = C \cdot O \cdot P$$

O valor do COP classifica a vulnerabilidade do aquífero em: Muito Alta, Alta, Moderada, Baixa e Muito Baixa. A partir da aplicação do método, foi elaborado o Mapa de Vulnerabilidade Natural à contaminação das águas do SACSL.

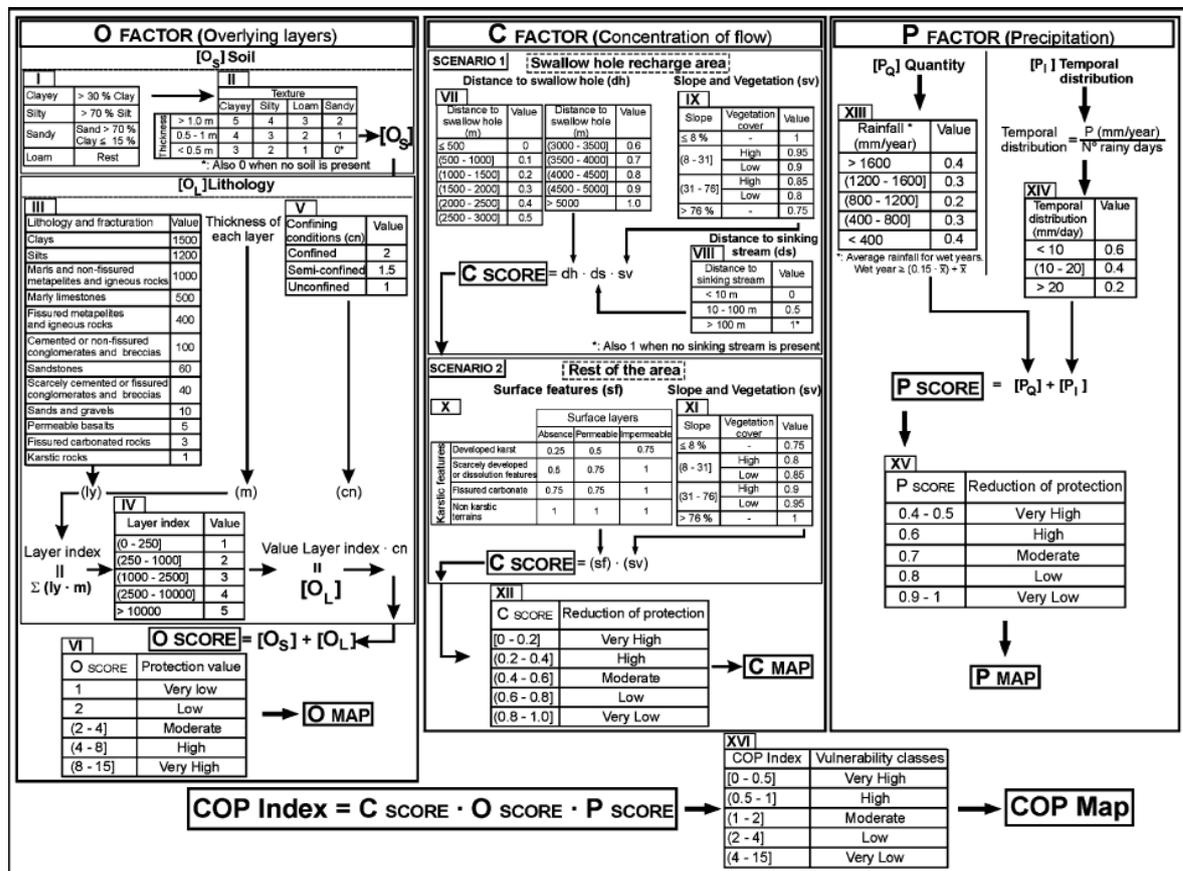


Figura 8.1 Diagrama do método COP (VÍAZ et al., 2006).



8.1.1 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO COP

Neste tópico serão descritos os passos para a determinação dos fatores que compõem o método COP, bem como as características que motivaram a quantificação de cada índice que leva à determinação dos fatores

Determinação do Fator O (Camadas Sobrepostas)

O método COP possui índices pré-determinados que são utilizados e/ou adaptados a partir das interpretações sobre as características locais dos parâmetros de interesse do método.

Em função da heterogeneidade do comportamento hidrogeológico do SACSL na área de estudo, foi necessário estabelecer subdivisões da área de estudo em zonas que se basearam nos tipos de solo associados às litologias aflorantes e na estimativa das espessuras desse solo com base na resistência mecânica e interpretação sobre a gênese das diferentes litologias. Posteriormente, as diferentes zonas foram associadas ao índice de declividade do terreno.

Não se assumiu a geração de solo a partir da Formação Sete Lagoas, pois o processo de dissolução é quase que completo nos minerais que a compõem.

A litologia assume valor crescente de proteção de acordo com a diminuição da permeabilidade, assim como exemplo o filito da Formação Serra de Santa Helena (**Tabela 8.1**).

Associado o índice de litologia com a espessura real de cada camada litológica, se alcançam o índice de camada. A partir desse índice, realiza-se sua associação junto à caracterização de confinamento ou não confinamento do aquífero; este é multiplicado pelo índice de camada, estabelecendo-se assim, o índice referente à litologia (O_L).

A profundidade estimada das litologias da área de base para o topo é:

- Complexo Belo Horizonte: composto por rochas ígneas de espessura desconhecida. Assumiu-se o valor maior que 1.000 metros, embora este valor seja aplicável apenas no cálculo do método.



- Formação Sete Lagoas (Membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo): por serem rochas cársticas, assumiu-se o menor índice de proteção ao aquífero (índice “1”).

O Membro Pedro Leopoldo possui espessuras variáveis. A sul do município, têm-se espessuras pouco representativas, com máximas de até 10 metros. Na região central, sua espessura média é de 40 metros, e ao norte, há espessura média de 100 metros. O Membro Lagoa Santa tem ocorrência local e limitada, com espessuras variável de 40 metros (zona centro sul) a alguns metros (zona centro norte). O comportamento do aquífero também varia de acordo com a zona de ocorrência. Na porção central, o sistema assume o comportamento de aquífero não confinado, contrariamente à situação predominante no sul e norte do município, onde o comportamento é de confinamento.

- Formação Serra de Santa Helena: classificada como metapelito não fissurado. Embora a formação esteja fraturada, os planos de fraturamento parecem não ser efetivos à recarga, dado o seu preenchimento por veios pegmatíticos.

A espessura da Formação Serra de Santa Helena varia, com média de 10 metros, na região sul, 40 metros, na porção central e oeste, e de 100 metros na porção norte. Como apontado acima, a litologia possui baixa permeabilidade, sendo classificada como um aquíclode, assumindo assim, elevada importância na proteção natural do SACSL.

- Depósitos cenozoicos: possuem duas granulometrias distintas, definidas, de acordo com os processos de deposição.

Sequências de tálus, orientadas por fluxos gravitacionais, como resultado de declividades topográficas acentuadas, ou fluxos fluviais, nos quais assumem caráter de grãos arenosos grossos a seixos, com pequeno grau de proteção ao aquífero subjacente; e sequências sedimentares deposicionais, características de áreas de pouca declividade nas quais os processos de sedimentação similares ao flúvio-deltáicos são dominantes. Localizam-se na área central do município (área urbanizada). São sedimentos predominantemente siltosos.

A somatória dos índices solo $[O_s]$ associado à litologia $[O_L]$, determina o Fator O (Camadas de Sobreposição). A seguir são apresentadas as **Tabelas 8.1 a 8.4** que demonstram os índices adotados para a determinação do Fator O.



A **Tabela 8.1** sintetiza os valores adotados para a determinação do índice $[O_s]$ e a **Figura 8.2** apresenta a distribuição desse índice geograficamente na área de estudo.

Tabela 8.1 Valores utilizados para o índice de Solo do Fator O $[O_s]$

Litologias		Solo		Índice O_s
		Granulometria	Espessura	
1. Depósitos cenozoicos	1.1. Área Central e Oeste	Silte	> 1 metro	4
	1.2. Área Norte	Areia	>1 metro	2
2. Formação Serra de Santa Helena	2.1.a Área Sul	Argila	< 0,5 metro	3
	2.1.b Área Central ⁽¹⁾		< 0,5 metro	3
	2.1.c Área Norte		> 0,5 metro	5
3. Formação Sete Lagoas	3.1. Mb. Lagoa Santa ⁽²⁾	Areia	Sem solo	0
	3.2. Mb. Pedro Leopoldo ⁽²⁾	Marga	Sem solo	0
4. Complexo Gnáissico-Migmatítico Belo Horizonte		Argila	< 0,5 metro	3

⁽¹⁾ Serra de Santa Helena; e ⁽²⁾ Área de afloramento

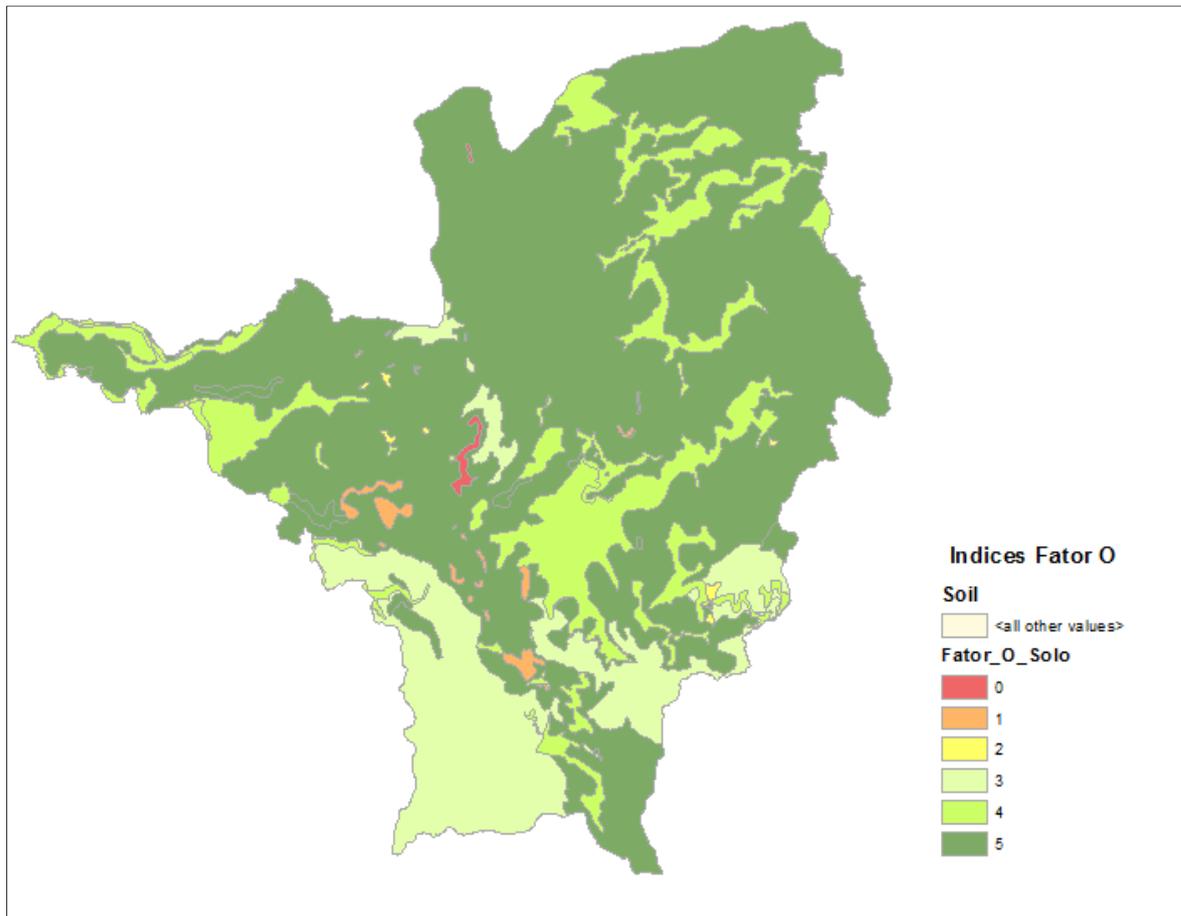


Figura 8.2 Distribuição dos Índices O_s (Fator O)



As **Tabelas 8.2 a 8.4** apresentam os valores atribuídos aos atributos que compõem o índice [O_L] também utilizado na determinação do Fator O, demonstrado na **Figura 8.3** que apresenta distribuição geográfica do Fator O calculado a partir dos índices de solo e litologia.

Tabela 8.2 Índices utilizados para o Fator Rocha (O_L) – Litologia *versus* espessuras.

Litologias		Litologia e Estrutura <i>versus</i> Espessura Relativa da Camada			Índice de Camada (III x IV)
		III - Litologia e Fraturamento	Índice Parcial	IV - Espessura de Camadas (m)	
1. Depósitos cenozoicos	1.1. Área Central e Oeste	Areias e Seixos	10	10	100
	1.2. Área Norte		10	40	400
2. Formação Serra de Santa Helena	2.1.a Área Sul	Pelitos não fissurados	1.000	20	20.000
	2.1.b Área Central		1.000	40	40.000
	2.1.c. Área Norte		1.000	100	100.000
3. Formação Sete Lagoas	3.1.a. Mb. Lagoa Santa- Áreas Planálticas	Rochas Cársticas	1	20	20
	3.1.b. Mb. Lagoa Santa - Flancos de Serra		1	20	20
	3.2.a. Mb. Pedro Leopoldo - Área Sul		1	20	20
	3.2.b. Mb Pedro Leopoldo - Área Central		1	40	40
	3.3.c. Mb. Pedro Leopoldo - Área Norte		1	100	100
4. Complexo Gnáissico-Migmatítico Belo Horizonte		Rochas Ígneas Fissuradas	400	20.000	8.000.000

(1) Áreas planálticas; (2) flancos da serra de Santa Helena, (3) Área sul do município; (4) Área Central e Oeste do Município, (5) Norte do Município.



Tabela 8.3 Índices utilizados para o Fator Rocha (O_L) – Condições de confinamento.

Litologias de Avaliação		Índice de Camada (Layer Index) versus Condições de confinamento (cn)	
		V - Condições de confinamento	Valores
1. Depósitos cenozoicos	1.1. Área Central e Oeste	Não Confinados	1
	1.2. Área Norte		1
2. Formação Serra de Santa Helena	2.1.a Área Sul	Confinado	2
	2.1.b Área Central		2
	2.1.c. Área Norte		2
3. Formação Sete Lagoas	3.1. Mb. Lagoa Santa	Não Confinado	1
	3.2.a. Mb. Pedro Leopoldo - Área Sul	Não Confinado	1
	3.2.b. Mb. Pedro Leopoldo - Área Central	Não Confinado	1
	3.3.c. Mb. Pedro Leopoldo - Área Norte	Confinado	2
4. Complexo Gnáissico-Migmatítico Belo Horizonte		Confinado	2

Tabela 8.4 Tabela de classificação final para o Fator O.

Litologias Avaliadas		O Soil (Os)	O Lithology (Ol)	O Score ⁽¹⁾	Valor de Proteção ⁽²⁾
1. Depósitos cenozoicos	1.1. Área Central e Oeste	3	1	4	Baixo
	1.2. Área Norte	5	2	7	Alto
2. Formação Serra de Santa Helena	2.1.a Área Sul	5	5	10	Muito Alto
	2.1.b Área Central (topo da Serra)	3	5	8	Alto
	2.1.c. Área Norte	5	5	10	Muito Alto
3. Formação Sete Lagoas	3.1.a. Mb. Lagoa Santa - Áreas Planálticas	0	1	1	Muito Baixo
	3.1.b. Mb. Lagoa Santa - Flancos de Serra	0	1	1	
	3.2.a. Mb. Pedro Leopoldo - Área Sul	0	1	1	
	3.2.b. Mb. Pedro Leopoldo - Área Central	0	1	1	
	3.3.c. Mb. Pedro Leopoldo - Área Norte	0	1	1	
4. Complexo Gnáissico-Migmatítico Belo Horizonte		3	5	8	Alto



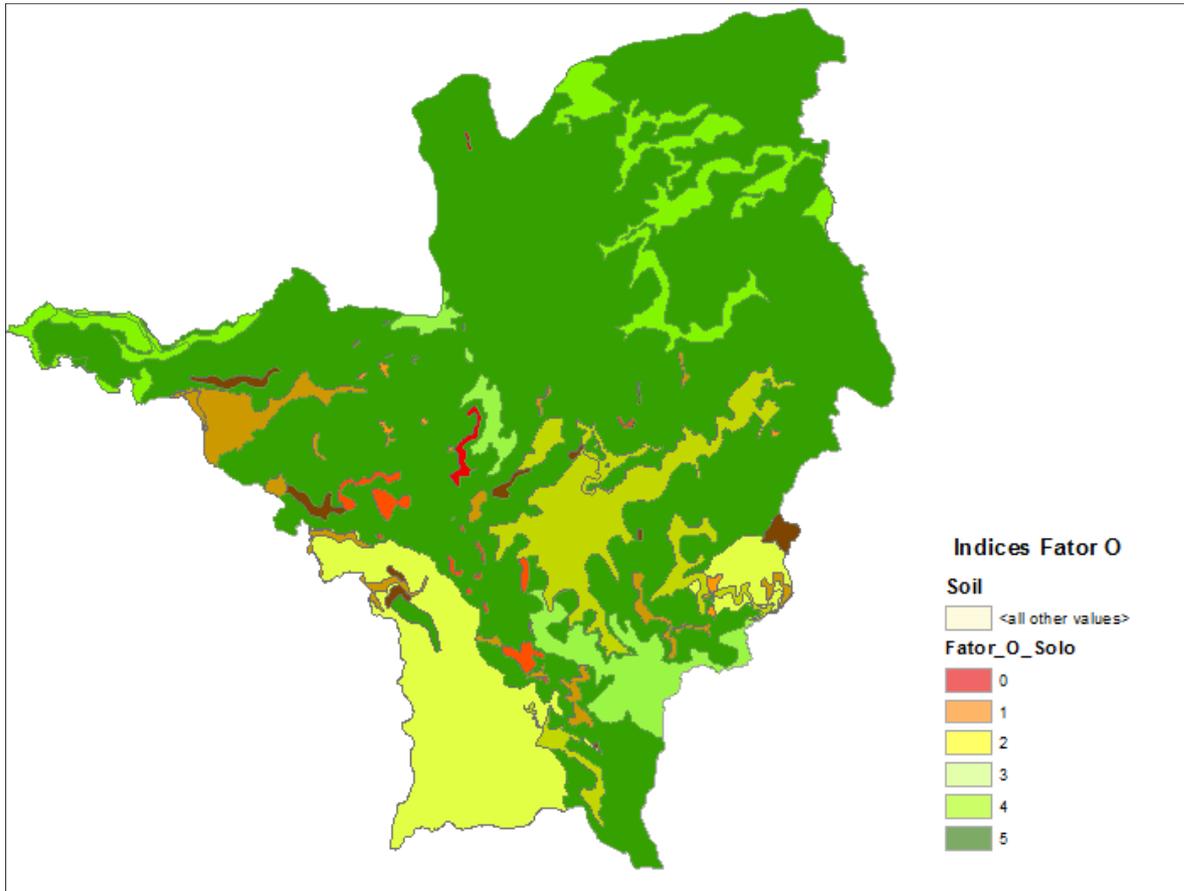


Figura 8.3 Distribuição geográfica do Fator O (Método COP)

Determinação do Fator C (Concentração de Fluxo)

O Fator C faz referência direta à recarga do aquífero associado às ocorrências litológicas e, desse modo, foram subdivididos dois cenários: Cenário 01 - áreas de recarga direta; e Cenário 02 - áreas de recarga indireta e/ou sem recarga (“Restante de Área”).

Ao se avaliar as variáveis contidas dentro da primeira situação (Cenário 01), assumiu-se que os afloramentos correspondentes à Formação Sete Lagoas são áreas de recarga naturais. Dessa forma, para todas as áreas de afloramentos de calcários, assumiu-se distância “zero”.

O “Cenário 02” é produto da multiplicação dos fatores X (Feições de Superfície) e o Fator XI (Declividade e Vegetação) que determinam a redução da taxa de proteção natural do aquífero. Para tanto, foram estabelecidas as seguintes relações e considerações:



- 1 Terrenos não cársticos em áreas de baixa declividade (menor que 8%), são definidas como “áreas de redução da proteção muito baixas”. O fator “cobertura vegetal” deve ser considerado irrelevante. É o que se observa na Formação Serra de Santa Helena e depósitos cenozoicos, ao norte do município; os quais foram descritos como camadas protetoras do SACSL;
- 2 Sedimentos não cársticos relacionados a áreas de elevada declividade (variações entre 31% e 76%): assume-se baixa concentração da vegetação, que se relaciona a depósitos cenozoicos com feições de tálus e também a rochas filíticas da Formação Serra de Santa Helena nos flancos da serra homônima;
- 3 Sistemas carbonáticos com feições de dissolução pouco desenvolvidas relacionadas a declividades médias (variando entre 8% a 31%): ocorrem na porção oeste do município, em afloramentos de calcários micríticos da Formação Sete Lagoas – Membro Pedro Leopoldo, associados à cobertura vegetal (em elevadas ou baixas concentrações);
- 4 Carste desenvolvido em áreas de baixa declividade (menor a 8%): base da serra de Santa Helena e porção central do município.
- 5 Determinação de áreas com carste desenvolvido: representadas por afloramentos de rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas – Membro Lagoa Santa, associado às áreas de média a elevada declividade (variando dentre 8% a 76%), associados à elevada cobertura vegetal, fato que favorece índices de dissolução, diminuindo a proteção natural na região caracterizada e conhecida como “Complexo Rei do Mato”, destacado pelo sistema de dutos e cavernas muito desenvolvido.

Determinação do Fator P (Precipitação)

O fator P é de caráter mais quantitativo e utiliza os índices de precipitação da área. Primeiramente, considera como a primeira variável as normais climatológicas. Para tanto, o espaço amostral considerado é de 30 anos (1961 a 1991) da estação da EMBRAPA (**Tabela 8.5**).

Para a aplicação do índice, foi necessário o cálculo de dias efetivos de chuva, estimado em aproximadamente 103 dias de chuva efetiva, com um intervalo de 13 dias entre cada evento, com um montante de 1.338,10 mm. De acordo com a metodologia, tal média corresponde a um índice moderado de chuvas para o município.



Tabela 8.5 Dados de precipitação média no município de Sete Lagoas (1961 a 1991).

Mês	Precipitação Média	Dias de Chuva
JAN	266,6	17,1
FEV	173,6	11,9
MAR	148,8	11,4
ABR	57	5,6
MAI	21,7	3,2
JUN	9	2,2
JUL	9,3	2,2
AGO	9,3	2,2
SET	36	4,2
OUT	99,2	9,0
NOV	210	15,6
DEZ	297,6	18,1
Soma	1338,1	102,7
Média	13,0	

8.1.2 CARTOGRAFIA DE VULNERABILIDADE NATURAL DO SACSL

A partir da determinação dos fatores “C”, “O” e “P”, conforme apresentando acima, e aplicadas as fórmulas de sobreposição dos índices e fatores, foi obtido o mapa da vulnerabilidade natural à contaminação do SACSL, demonstrado na **Figura 8.4**.

A descrição dos índices de vulnerabilidade apresentados na **Figura 8.4** merecem as seguintes considerações:

- Para o domínio de rochas gnáissico-migmatíticas do Complexo Belo Horizonte, o qual está associado ao Sistema Aquífero Fissural, o índice de vulnerabilidade natural é “moderada”, resposta a camada de argissolo de pequena espessura e em associação com está associado ao domínio cristalino;
- Na área planáltica da serra de Santa Helena, o SACSL possui vulnerabilidade natural “moderada”, tanto na porção central, quanto na porção setentrional do município, e é a resposta ao pressuposto da serra ter um solo de pouca espessura;
- Com relação às áreas que ocorrem os depósitos cenozoicos, as diferenças de vulnerabilidade do SACSL estão vinculadas aos diferentes tipos granulométricos que compõe esses depósitos, de forma que ao norte, a mesma é considerada como de vulnerabilidade “baixa”. No entanto, a porção central e oeste da área apresenta “alta” vulnerabilidade, uma vez que os depósitos cenozoicos estão dispostos diretamente sobre níveis carbonáticos carstificados;
- As áreas que afloram as rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas foram classificadas como sendo de “muito alta” vulnerabilidade natural.



8.2 CADASTRO E CLASSIFICAÇÃO DE FONTES POTENCIAIS DE CONTAMINAÇÃO

As atividades produtivas, em decorrência do manuseio e lançamento de efluentes líquidos, ou pela disposição inadequada de resíduos sólidos e consequentes vazamentos, podem gerar carga contaminante pontual poluindo o solo ou subsolo.

Quantidades relativamente pequenas de compostos químicos mais tóxicos e persistentes são capazes de gerar grandes plumas de contaminação da água subterrânea, particularmente em sistemas aquíferos caracterizados por altas velocidades de fluxo (FOSTER *et al.*, 2006), especialmente em aquíferos cársticos como o de Sete Lagoas. Portanto, determinadas atividades produtivas representam a maior ameaça aos aquíferos. A determinação das fontes potenciais de contaminação se refere à avaliação do risco a contaminação e de proteção da qualidade da água subterrânea, considerando quais atividades se desenvolvem numa determinada área, associados a um, ou vários tipos, específicos de poluentes.

Uma das formas simplificadas de classificar as fontes potenciais de carga contaminante no subsolo, de acordo com o método *POSH* (FOSTER *et al.*, 2006), é avaliar a probabilidade da presença de substância poluente associada com o tipo de atividade antropogênica e a provável sobrecarga hidráulica com base no uso da água.

O método *POSH* (siglas em inglês de *pollutant origin, surcharge hydraulically*) classifica as fontes de contaminação pontuais em três índices qualitativos: elevado, moderado e reduzido potencial de gerar carga contaminante ao subsolo. A **Figura 8.5** apresenta a categorização das fontes de contaminação pontuais de acordo com o método *POSH*.



POTENCIAL DE GERAR CARGA CONTAMINANTE NO SUBSOLO	FONTES DE CONTAMINAÇÃO				
	deposição de resíduos sólidos	áreas industriais*	lagoas de águas residuais	outras (urbanas)	mineração e exploração de petróleo
Elevado	resíduo industrial tipo 3, resíduo de origem desconhecida	indústria tipo 3 ou qualquer atividade que manuseie >100 kg/d de produtos químicos perigosos	todos os resíduos industriais tipo 3, qualquer efluente (exceto esgoto residencial) se a área >5 ha		operações em campos de petróleo, mineração de metais
Moderado	chuva >500 mm/a com resíduos residenciais/ agroindustriais/ industriais tipo 1, ou todos os demais casos	indústria tipo 2	esgoto residencial se a área >5 ha, demais casos não relacionados acima ou abaixo	postos de gasolina, vias de transporte com tráfego regular de produtos químicos perigosos	algumas atividades de mineração/ extração de materiais inertes
Reduzido	chuva <500 mm/a com resíduos residenciais/ agroindustriais/ industriais tipo 1	indústria tipo 1	águas residuais residenciais, mistas, urbanas, agroindustriais e de mineração de não metálicos	cemitérios	
<p>* solos contaminados de indústrias abandonadas devem ter a mesma classificação que a da própria indústria</p> <p>Indústrias Tipo 1: madeiras, manufaturas de alimentos e bebidas, destilarias de álcool e açúcar, processamento de materiais não metálicos</p> <p>Indústrias Tipo 2: fábricas de borracha, fábricas de papel e celulose, indústrias têxteis, fábricas de fertilizantes, usinas elétricas, fábricas de detergente e sabão</p> <p>Indústrias Tipo 3: oficinas de engenharia, refinarias de gás/petróleo, fábricas de produtos químicos/farmacêuticos/plásticos/pesticidas, curtumes, indústrias eletrônicas, processamento de metal</p>					

Figura 8.5 Categorização das fontes de contaminação pontuais, de acordo com o método *POSH* (Foster *et al.*, 2006).

Os índices qualitativos são resultado da somatória de probabilidades da geração de efluentes e/ou líquidos gerados a partir de processos produtivos e que possam atingir o aquífero. A **Figura 8.6** expõe o resumo das características químicas e dos índices de probabilidade de gerar carga para atividades industriais de diversos setores.



TIPO INDUSTRIAL	Índice de Risco Mazurek (1-9)	uso relativo da água	carga de salinidade	carga de nutrientes	carga orgânica	hidrocarbonetos	patógenos fecais	metais pesados	orgânico sintético	Índice de Poluição Potencial da Água Subterrânea (1-3)
Ferro e Aço	6	**	•	•	**	**	•	**	**	2
Processamento de Metal	8	*	•	•	•	•	•	***	***	3
Engenharia Mecânica	5-8	*	•	•	•	***	•	***	**	3
Metais Não-Ferrosos	7	*	•	•	•	•	•	***	•	2
Minerais Não-Metálicos	3-4	**	***	•	•	•	•	•	•	1
Refinarias de Gás e Petróleo	7-8	*	•	**	***	***	•	•	**	3
Produtos Plásticos	6-8	**	***	•	**	**	•	•	***	3
Artefatos de Borracha	4-6	*	**	•	**	•	•	•	**	2
Produtos Químicos Orgânicos	3-9	**	**	•	**	***	**	**	***	3
Produtos Químicos Inorgânicos	6-9	**	**	•	•	•	•	***	•	3
Farmacêuticos	6-9	***	***	**	***	•	**	•	***	3
Madeira	2-4	*	**	•	**	•	•	•	**	1
Papel e Celulose	6	***	•	**	**	•	•	•	**	2
Sabão e Detergentes	4-6	**	**	•	**	**	**	•	•	2
Têxteis	6	***	**	**	***	•	•	•	**	2
Curtume	3-8	**	***	**	**	•	•	**	***	3
Alimentos e Bebidas	2-4	**	**	***	***	•	***	•	•	1
Pesticidas	5-9	**	**	•	•	•	•	•	***	3
Fertilizantes	7-8	*	***	***	•	**	•	•	**	2
Açúcar e Alcool	2-4	**	***	***	***	**	•	•	•	2
Usina Termoelétrica	-	***	•	•	•	***	•	***	**	2
Elétricos e Eletrônicos	5-8	*	•	•	•	***	•	**	***	3

• reduzida } probabilidade de concentrações problemáticas de efluentes e/ou líquidos de processos
 •• moderada
 ••• elevada

Figura 8.6 Resumo das características químicas e dos índices de risco para atividades industriais (FOSTER *et al.*, 2006).



As principais fontes pontuais com potencial de gerar carga contaminante foram cadastradas e classificadas com base no método POSH, a partir de informações cedidas pelo Departamento de Imposto sobre Serviços da Prefeitura de Sete Lagoas e pelo IGAM. A depuração e atualização de alguns dados foi realizada a partir do Google *Street View*® e por meio da análise de dados em campo.

A estruturação do cadastro das fontes pontuais com potencial de gerar carga contaminante contou também com dados sobre a posição geográfica e a operação com os dados do cadastro foi efetuada em SIG com uso do aplicativo *ArcGis* 10.0. O resumo das informações do cadastro de fontes pontuais com potencial de gerar carga contaminante está disponibilizado no **Anexo VIII** deste relatório. A **Figura 8.7** apresenta a distribuição das fontes potenciais de contaminação, classificadas de acordo com o método POSH.

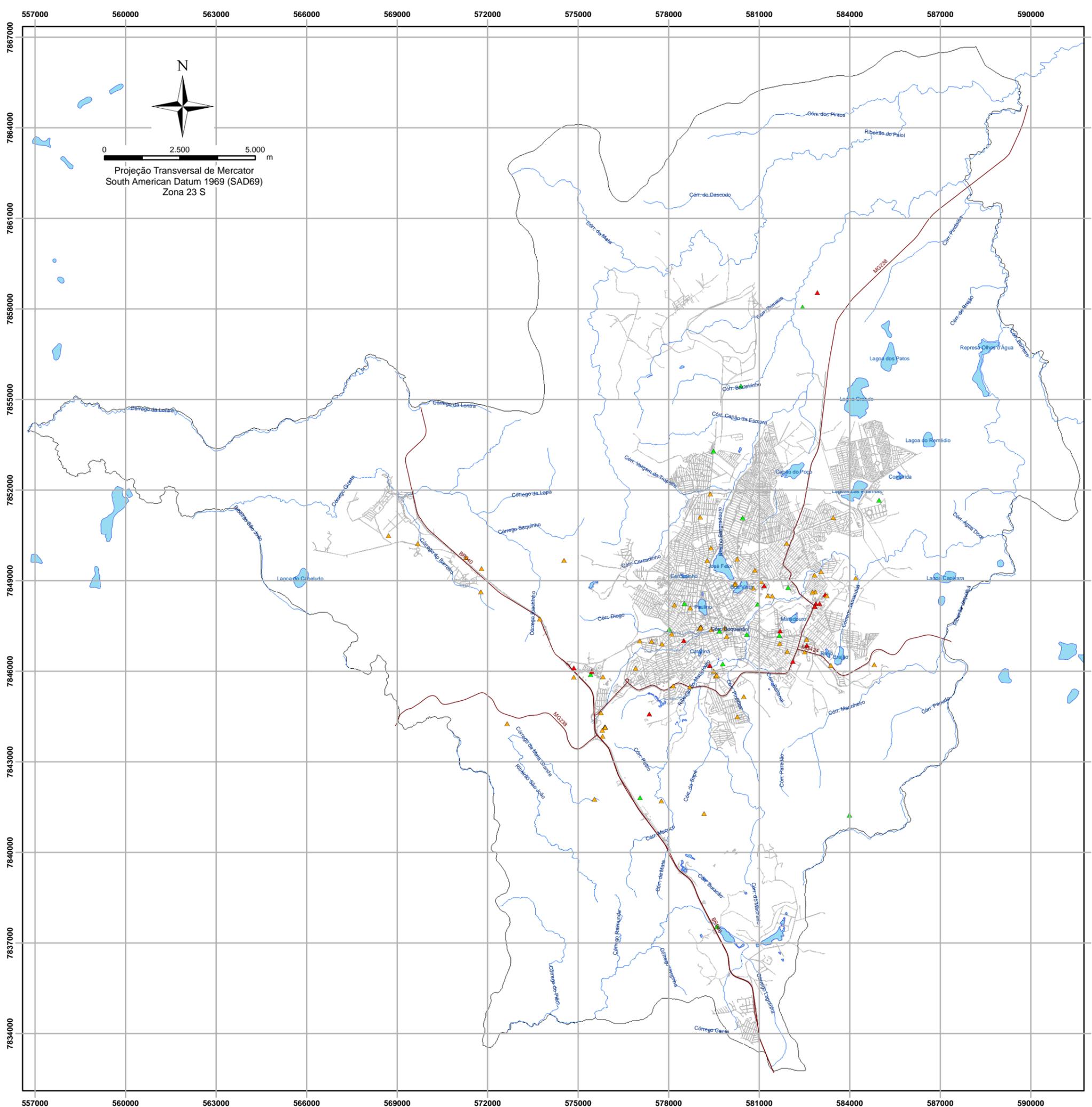
A partir da classificação *POSH* das fontes potenciais de contaminação, foi possível estabelecer porcentagem de cada classe das fontes de contaminação pontuais. As siderúrgicas representam 20% do total das atividades industriais conhecidas em Sete Lagoas. Considerada como a principal atividade industrial do município, representa 18% da capacidade de produção de ferro gusa em todo o país. Ao longo da rodovia BR-040, estão distribuídas, principalmente essas atividades. As siderúrgicas foram classificadas como Indústrias Tipo 2 com moderado potencial de gerar carga contaminante no subsolo.

Os postos de gasolina correspondem a 34% do total de atividades com potencial moderado de gerar carga contaminante. Fetter (1988) descreve que os postos de gasolina são responsáveis por um grande número de casos de contaminação, embora atinjam menores áreas. A principal fonte de contaminação do solo e da água nos postos de gasolina são tanques subterrâneos. Os 37% restantes são compostas por indústrias de diversos setores, entre eles fertilizantes, mineração de materiais inertes, produção têxtil entre outros.

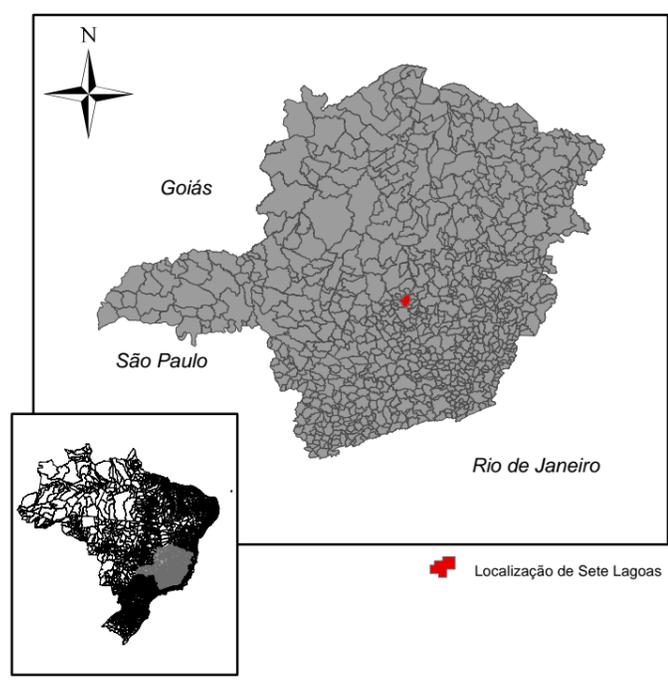
As fontes de contaminação pontuais classificadas em reduzido potencial são indústrias de bebida, alimentos e cerâmica, em geral, localizadas no perímetro urbano.

As atividades industriais, categorizadas como elevadas, apresentam atividades associadas com processamento de metal e curtume e são representadas por indústrias de menor porte. Essas fontes se distribuem, prioritariamente, na porção sudeste da área urbana.






 0 2.500 5.000 m
 Projeção Transversal de Mercator
 South American Datum 1969 (SAD69)
 Zona 23 S



Legenda
Carga Contaminante (POSH)

-  Elevado
-  Moderado
-  Reduzido
-  Lagoas
-  Rodovias
-  Malha de Ruas
-  Drenagem
-  Limite Municipal

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas

CONTRATANTE:		 Serviço Autônomo de Água e Esgoto
PROJETO:		
TÍTULO:		ESTUDO HIDROGEOLÓGICO
ELABORADO:		Figura 8.7 Localização das fontes potenciais de contaminação classificadas segundo método POSH
CONTRATO:		Daniela Barbatí Osório
ESCALA:		3988
DATA:		1:125.000
		DEZ/2013


AMBIENTAL & ENGENHARIA

Neste estudo não foram representadas em mapa as classificações das fontes de contaminação difusas. O método POSH classifica as práticas agrícolas e saneamento in situ (fontes de contaminação difusa) de acordo com o potencial de gerar carga contaminante. No cenário de Sete Lagoas, a cobertura da rede de esgoto é superior a 75%, enquanto que as áreas de agricultura 0,025% da área total do município (Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE). Desta forma, a classificação das fontes difusas resultou no reduzido potencial de gerar carga contaminante (método POSH).

Deve-se salientar, entretanto, que apesar do baixo índice de carga contaminante relacionado às fontes difusas por esgotamento sanitário, segundo o método POSH, este estudo obteve alguns resultados analíticos com indícios de alteração da qualidade natural das águas por nitrato e contaminação por nitrito. A análise a esse cenário sugere que, embora a cobertura de esgotamento sanitário seja de certo modo abrangente, diversos fatores podem favorecer a infiltração de esgotos e a consequente alteração da qualidade das águas, tais como: vazamentos da rede coletora de esgoto; infiltrações por fossas anteriores à implantação do sistema coletor; baixa aderência da população à rede coletora com continuidade do uso de fossas, entre outras razões.

8.3 AVALIAÇÃO DO RISCO À CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Os aquíferos, em sua maior parte, são abastecidos pela água que se infiltra na superfície do terreno. Em decorrência disso, as atividades humanas desenvolvidas na superfície podem afetar nocivamente a qualidade da água subterrânea. O perigo de contaminação da água subterrânea é descrito por meio da interação entre as características naturais dos estratos que compõe a zona não saturada e a carga contaminante (FOSTER *et al.* 2002). Nesse sentido, o risco a contaminação é expresso pela acessibilidade dos contaminantes ao aquífero, ou seja, a relação das características intrínsecas do aquífero e o potencial de determinadas atividades antropogênicas de gerar carga contaminante.

A correlação entre o potencial de gerar contaminante com a vulnerabilidade natural do aquífero em se contaminar conferem diferentes níveis de risco à contaminação. Os maiores riscos de contaminação estão associados às fontes com elevado potencial de carga contaminante posicionadas em locais com elevada vulnerabilidade e, inversamente, os

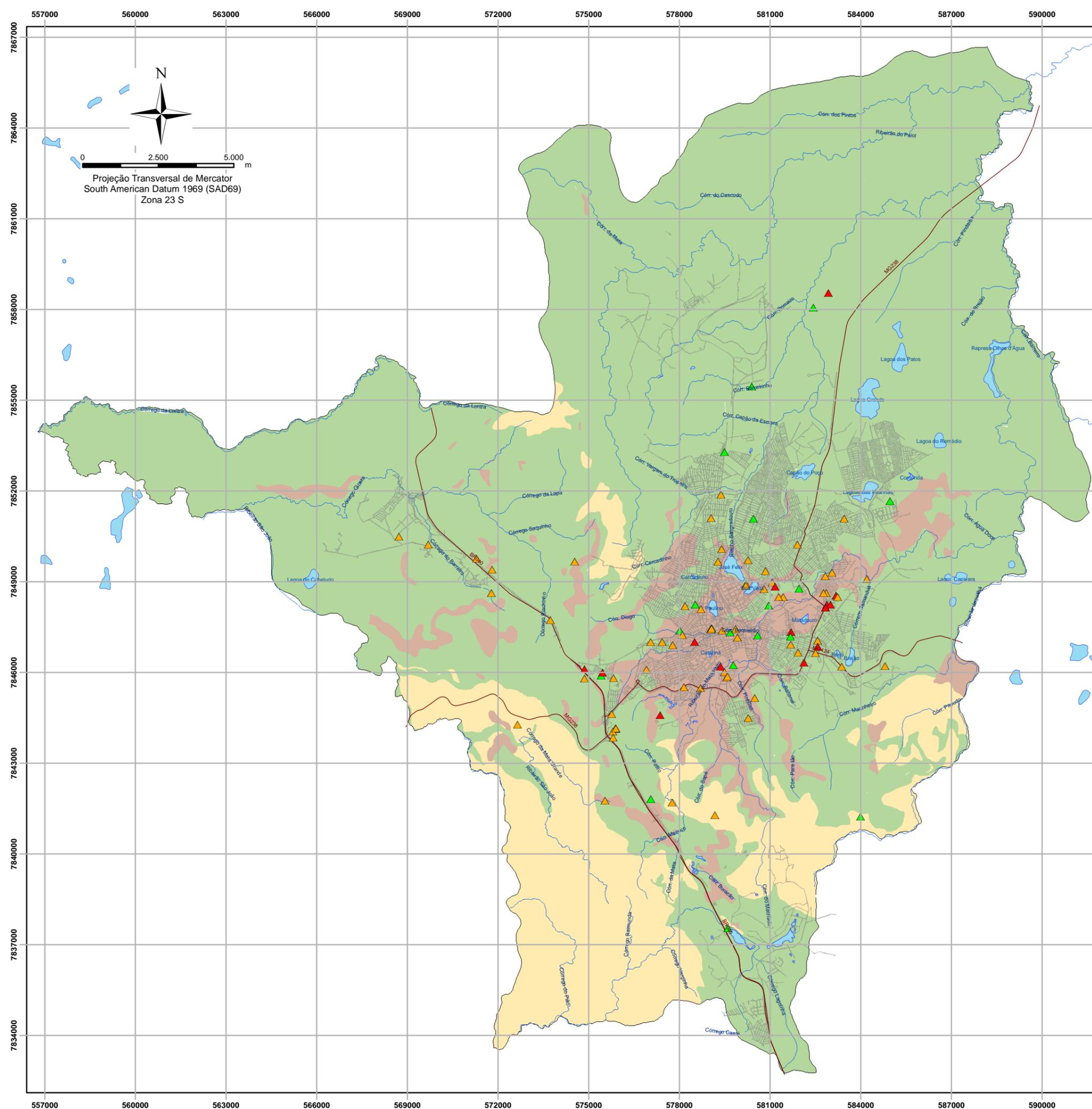


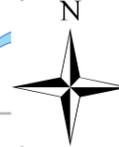
menores riscos estão associados às fontes de baixo potencial de carga contaminante em locais de baixa vulnerabilidade do aquífero.

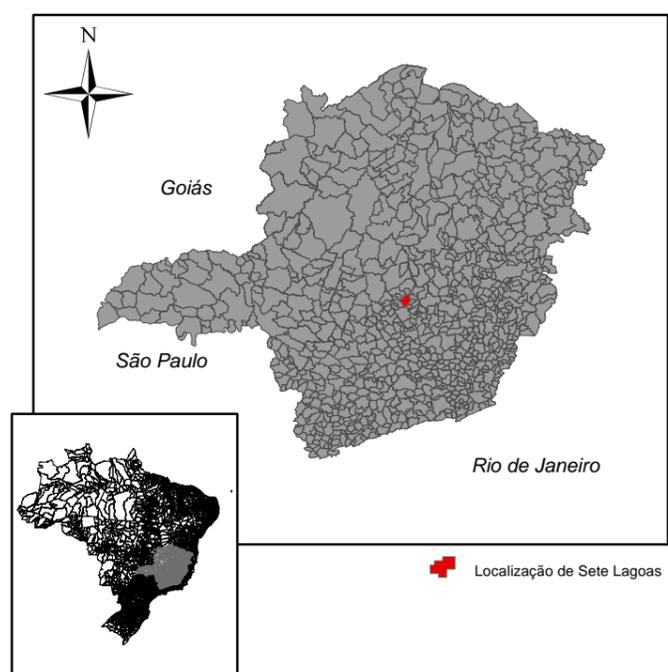
A avaliação do risco à contaminação do aquífero foi determinada a partir da integração dos mapas de vulnerabilidade natural do aquífero (**Figura 8.5**) e da distribuição das fontes pontuais com potencial de gerar carga contaminante (**Figura 8.7**). A **Figura 8.8** apresenta o Mapa do risco à contaminação das águas subterrâneas em Sete Lagoas.

Em análise à **Figura 8.8**, nota-se que o risco de contaminação da água subterrânea é maior na porção central do município, devido à sobreposição dos fatores relacionados à ocorrência de substrato mais vulnerável a contaminação, associado à concentração de fontes pontuais de contaminação com elevado potencial de gerar carga contaminante.






 0 2.500 5.000 m
 Projeção Transversal de Mercator
 South American Datum 1969 (SAD69)
 Zona 23 S



- Legenda**
- Vulnerabilidade Natural (Método COP)
- Baixa
 - Moderada
 - Muito Alta
- Carga Contaminante (POSH)
- Elevado
 - Moderado
 - Reduzido
- Lagoas
 - Rodovias
 - Malha de Ruas
 - Drenagem
 - Limite Municipal

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas

CONTRATANTE:		 SAAE Serviço Autônomo de Água e Esgoto
PROJETO:		
TÍTULO:		ESTUDO HIDROGEOLÓGICO
ELABORADO:		Figura 8.8 Mapa do risco à contaminação das águas subterrâneas em Sete Lagoas.
CONTRATO:		Daniela Barbatí Osório
ESCALA:		3988
DATA:		1:125.000
		DEZ/2013


Servmar
 AMBIENTAL & ENGENHARIA

9 AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DE FEIÇÕES CÁRSTICAS EM SETE LAGOAS

A avaliação hidrogeológica de feições cársticas, no presente estudo, objetivou avaliar possíveis correlações entre a captação das águas subterrâneas e ocorrências de abatimento de terrenos registradas no município de Sete Lagoas.

A fase inicial desses trabalhos contou com o levantamento de informações sobre as ocorrências cársticas na área de estudo, indistintamente, sem seleção quanto os prováveis fatores geradores da ocorrência. Nessa fase, foram utilizados procedimentos de identificação por aerofotointerpretação, mapeamento de campo, levantamento bibliográfico e matérias relacionadas à cobertura jornalística.

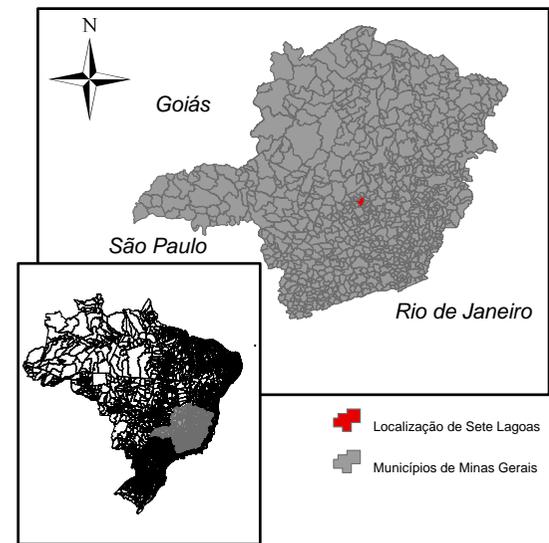
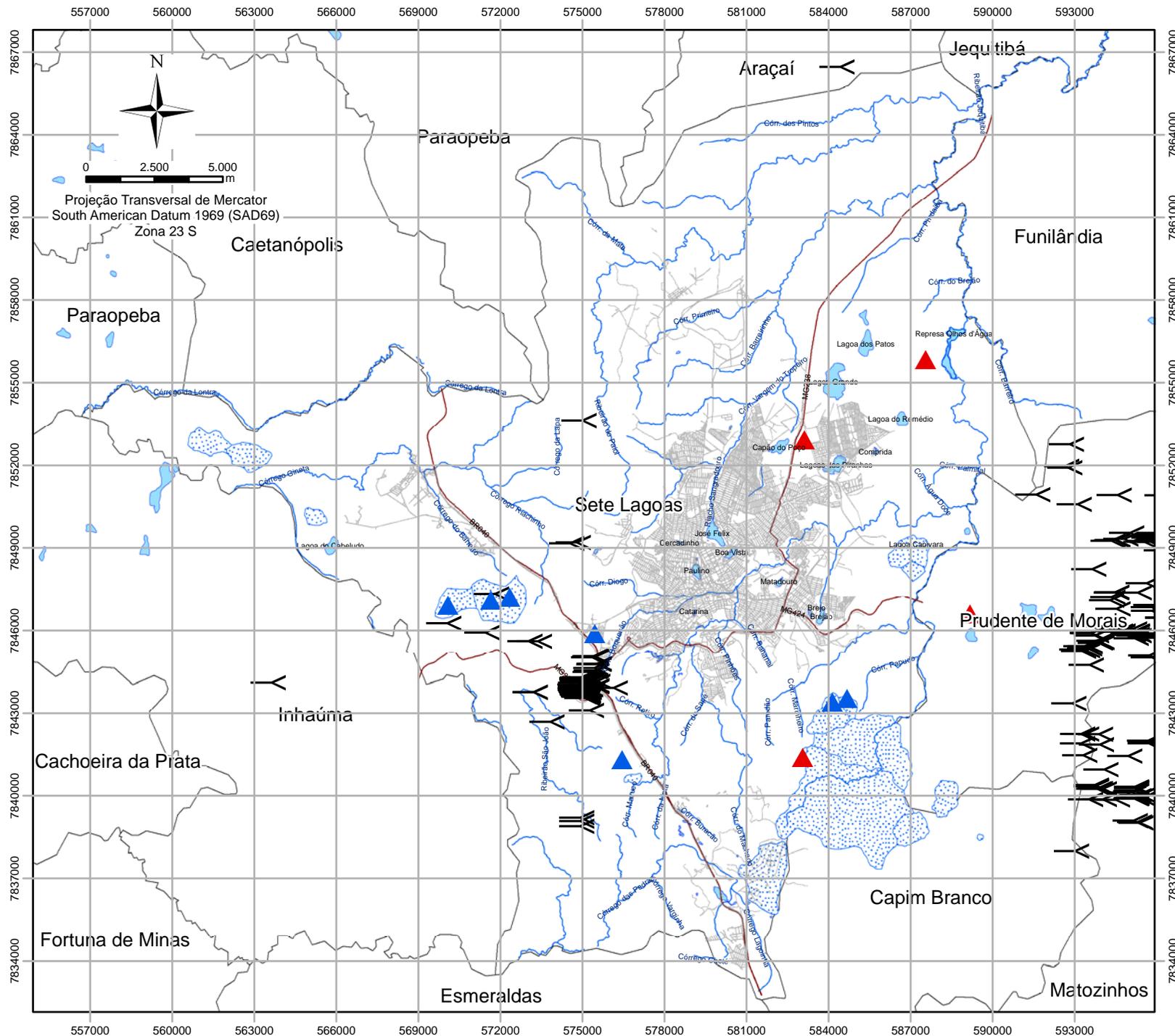
O mapeamento geológico-estrutural e a delimitação das áreas de ocorrência das unidades carbonáticas nortearam o trabalho de pesquisa e levantamento dos registros de interesse. As feições geomorfológicas de áreas cársticas são condicionadas pelo grau de dissolução da rocha e, pelo volume e composição química de água associada. Neste contexto, os abatimentos de terrenos situados sob domínios de rochas carbonáticas são consequências da evolução de cavidades no subsolo.

As atividades de campo e aerofotointerpretação permitiram a identificação de feições como dolinas, cavernas, sumidouros e surgências. Algumas dessas feições estão relacionadas na **Figura 9.1** e demonstram, pela localização em áreas pouco ocupadas que podem ocorrer de maneira natural, independentemente de influência antrópica.

Alguns tipos de dolina, cuja formação se deu naturalmente por processos atuantes nos terrenos cársticos, se assemelham aos abatimentos de terrenos em áreas cársticas cujas causas estão relacionadas a fatores por influência antrópica. Os casos mais comuns são os de colapso de “teto” de cavidades em subsuperfície que provocam depressões nos terrenos em superfície. A depender das dimensões e profundidade da cavidade subterrânea e da espessura do teto, os abatimentos podem ser de grandes proporções e com ocorrência repentina.

Cabral *et al.* (2006) defendem que diversos abatimentos são resultados do rebaixamento excessivo do nível d'água que, em alguns casos podem estar relacionados à atividades antrópicas, tais como construção civil e exploração de água subterrânea. Nesses casos, os distúrbios provocados pela interferência humana podem induzir e/ou acelerar os fenômenos cársticos.





Legenda

- ▲ Sumidouro
- ▲ Dolina
- Caverna
- Malha de Ruas
- Rodovias
- Drenagem
- Bacias Fechadas
- Limite Municipal
- Lagoas

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas

CONTRATANTE:		SAAE Serviço Autônomo de Água e Esgoto	
PROJETO:		ESTUDO HIDROGEOLOGICO	
TÍTULO:		Figura 9.1 Mapa de feições cársticas	
ELABORADO:		Daniela Barbatl Osório	
CONTRATO:	3988	Servmar AMBIENTAL & ENGENHARIA	
ESCALA:	1:200.000		
DATA:	DEZ/2013		

O mapeamento geológico-estrutural reconheceu que as áreas com coberturas cenozoicas estão associadas a locais com maior susceptibilidade a abatimentos, pois representam regiões que no passado geológico sofreram subsidência. Esses baixos estruturais que formaram essas pequenas bacias deposicionais, se não estiveram associadas a feições cársticas, pelo menos, associam-se a ocorrências tectônicas que favorecem o potencial de gerar feições cársticas. Ressalta-se que essas bacias possuem os elementos essenciais para a evolução das feições cársticas que são: estruturas tectônicas, água como veículo de transporte dos sedimentos depositados e matéria orgânica que favorece a geração de ácidos húmicos que intensificam a dissolução das rochas carbonáticas.

A caracterização de litologias carbonáticas com processos evoluídos de carstificação, também podem indicar locais com susceptibilidade de abatimentos, pois, em geral, possuem dutos e cavidades desenvolvidos. Entretanto, essas litologias ocorrem em uma extensa área do município e, muitas vezes, com feições de paleocarste, pois se encontram já exposta em superfície, sob condições vadasas. Informações de subsuperfície, nos registros históricos de perfuração e filmagens de poços, trazem evidências de feições cársticas evoluídas nas áreas de rochas carbonáticas nas regiões recobertas com os sedimentos cenozoicos.

As áreas de afloramento da Formação Sete Lagoas mostraram evidência de dissolução da rocha carbonática, preferencialmente, nos planos de acamamento e secundariamente nos planos de fraturamento, que induzem o desenvolvimento de cavidades e rotas de fluxo preferencial da água subterrânea. Os depósitos cenozoicos, compostos por material inconsolidado, dispostos diretamente sobre essa Formação favorecem a percolação de água, por sua vez os processos de carstificação. As áreas delimitadas no mapa geológico (**Figura 6.10**) correspondentes aos afloramentos da Formação Sete Lagoas e aos Depósitos cenozoicos correspondem a 2,2 % e 26%, respectivamente, da área total do município.

A **Figura 9.2** apresenta a delimitação das áreas de depósitos cenozoicos e os afloramentos da Formação Sete Lagoas, consideradas, neste estudo, como os locais com susceptibilidade à ocorrência de abatimentos. Esses locais correspondem a aproximadamente 27% da área do município de Sete Lagoas.

Os levantamentos aos registros bibliográficos permitiram compilar 17 ocorrências de abatimento de terreno em Sete Lagoas. Essas ocorrências estão listadas na **Tabela 9.1**, georreferenciadas e apresentadas na **Figura 9.2**. Nota-se que há fortíssima correlação das ocorrências com a área susceptível a abatimentos delimitada por fatores geológicos.

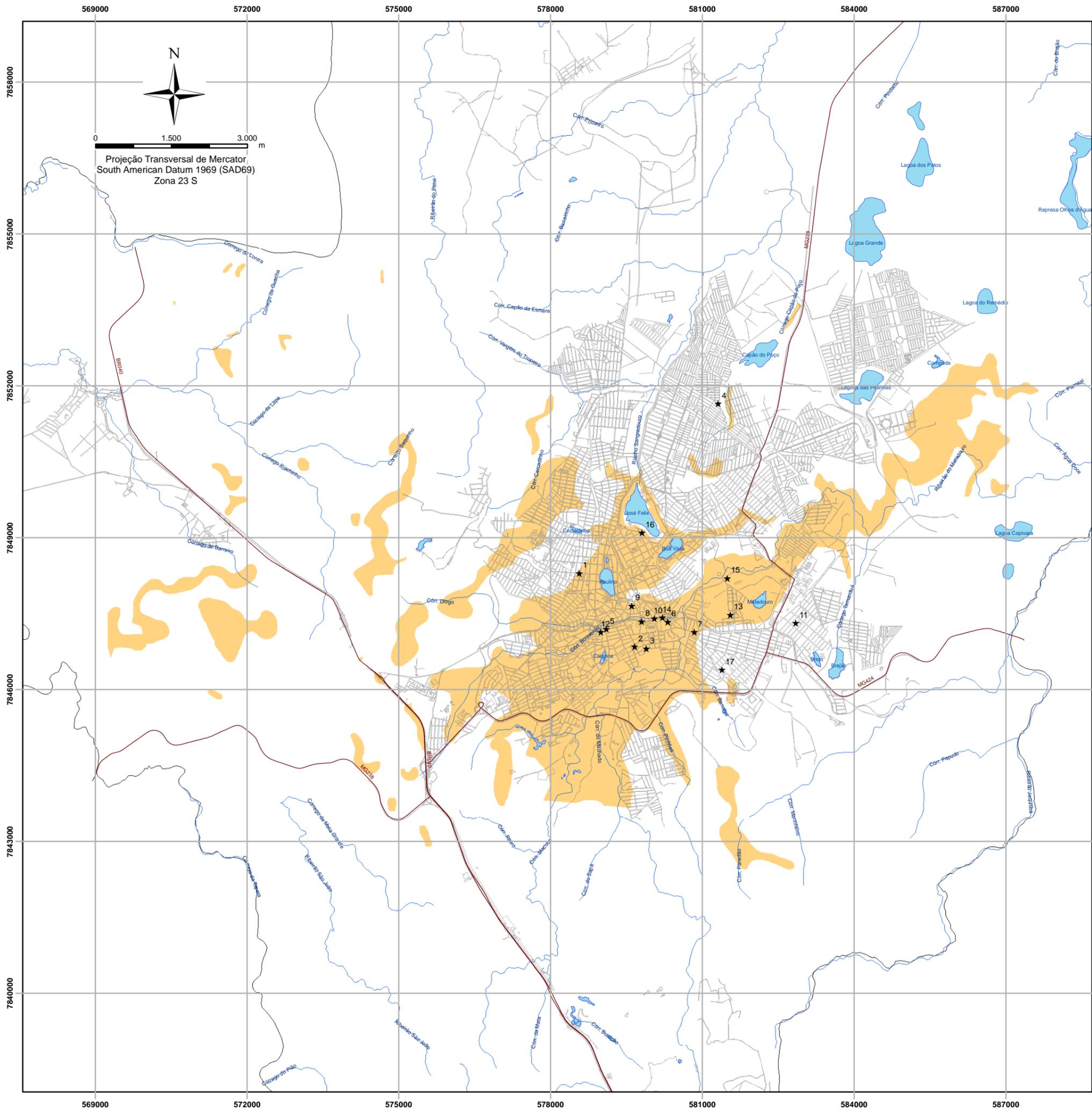


Tabela 9.1 Registros de abatimentos de terreno no município de Sete Lagoas.

Item	Coord. UTM		Local	Ano
	X	Y		
1	578550	7849160	Cruzamento das Ruas Tupiniquim e Nestor Foscolo	1988
2	579646	7847709	Rua Coronel Américo Teixeira Guimarães (entre as Ruas João L. Junior e Ricarte Normand)	1990
3	579874	7847667	Rua Dr. José Antônio Chamon (próximo à Rua Avelino Macedo)	1994
4	581294	7852509	Rua Cuba (próximo a Rua Maria Estela de Sousa)	1995
5	579084	7848057	Avenida Renato Azeredo (próximo à Praça da Rodoviária)	1998
6	580300	7848200	Avenida Renato Azeredo (próximo à Rua Joaquim Madaleno)	1999
7	580823	7847995	Rua Platina (próximo à Rua Equador)	2000
8	579784	7848208	Rua Teófilo Otoni (próximo a avenida Renato Azeredo)	2000
9	579588	7848516	Rua Doutor Chassim (próximo à Itambé)	2000
10	580035	7848264	Avenida Renato Azeredo (próximo ao Posto GM)	2001
11	582832	7848173	Rua Joaquim Vicente Ferreira (entre as Ruas Eponina S. Santos e João Capistrano)	2002
12	578978	7847999	Avenida Divino Padrão (próximo a Avenida Renato Azeredo)	2003
13	581535	7848340	Rua Araçatuba (Praça José Ribeiro Sobrinho)	2006
14	580193	7848281	Avenida Renato Azeredo, 2423 (Colégio Sinhá Andrade)	2007
15	581480	7849060	Avenida Renato Azeredo (próximo as siderúrgicas)	2008
16	579788	7849961	Rua José Felix	-
17	581369	7847252	Rua Heitor Lanza Neto	-

(-) Sem Dado






 0 1.500 3.000 m
 Projeção Transversal de Mercator
 South American Datum 1969 (SAD69)
 Zona 23 S


 Goiás
 São Paulo
 Rio de Janeiro
 Localização de Sete Lagoas

Legenda

- ★ Registro de Abatimento
- Área com susceptibilidade a abatimento de terreno
- Lagoas
- Rodovias
- Malha de Ruas
- Drenagem
- Limite Municipal

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento
 da Prefeitura de Sete Lagoas

CONTRATANTE:		 Serviço Autônomo de Água e Esgoto
PROJETO:		
TÍTULO:		ESTUDO HIDROGEOLÓGICO Figura 9.2 Áreas com susceptibilidade a abatimento de terreno e localização de ocorrências
ELABORADO:		Daniela Barbatí Osório
CONTRATO:	3988	 AMBIENTAL & ENGENHARIA
ESCALA:	1:75.000	
DATA:	DEZ/2013	

As prováveis causas de algumas ocorrências foram discutidas em estudos, sendo destacado que há casos não correlacionados à influência antrópica como, por exemplo, defende Silva (1988) em relação à ocorrência de colapso de terreno, no cruzamento das ruas Tupiniquim e Nestor Foscolo (item 1 da **Tabela 9.1**).

Nos relatórios elaborados pela empresa Engeo Sociedade Civil Ltda. relativos aos abatimentos na Rua Doutor Chassim, em 2000 (item 9 da **Tabela 9.1**), e na Rua Joaquim Vicente Ferreira, em 2002 (item 11 da **Tabela 9.1**), as causas dos abatimentos de terreno foram associadas à intensa exploração das águas subterrâneas, utilizando dados sobre queda de níveis de água como evidência para essa associação.

As ocorrências de abatimentos na região central de Sete Lagoas foram discutidas por Botelho (2008) em um contexto que avaliou a gestão dos recursos hídricos no município. Neste trabalho, o autor correlaciona os abatimentos à exploração das águas subterrâneas, em diversos casos, justificados pelo adensamento de poços no entorno das ocorrências.

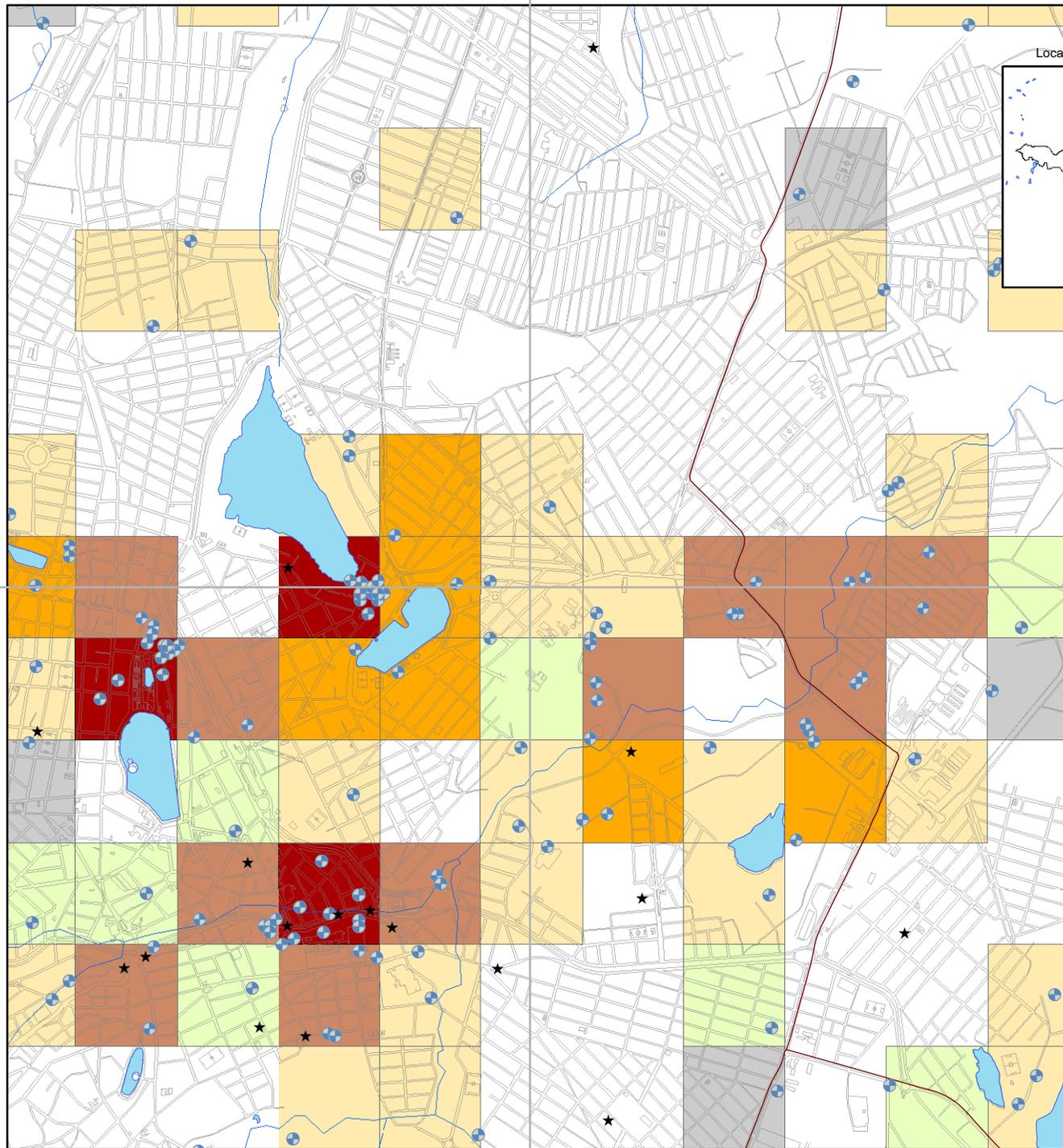
O autor supracitado analisa criticamente os estudos específicos sobre o abatimento dizendo que, em poucos casos, são aplicados métodos geofísicos para a avaliação das extensões das cavidades que estão relacionadas aos abatimentos. Neste sentido, vale destacar que foram encontrados registros de trabalhos utilizando métodos geofísicos nas ocorrências de abatimentos do Cruzamento das Ruas Tupiniquim e Nestor Foscolo (SILVA, 2008); da Rua Coronel Américo Teixeira Guimarães, entre as Ruas João L. Junior e Ricarte Normand (CPRM, 2011); e na Rua Cuba, nas proximidades com a Rua Maria Estela de Sousa (CPRM, 1995).

O presente estudo propõe um método próprio para avaliar a potencial correlação entre os abatimentos de terreno registrados em Sete Lagoas e a exploração das águas subterrâneas. Salienta-se que este estudo realizou essa análise dos casos de abatimento com foco na obtenção de ferramental em subsídio à gestão dos recursos hídricos no município.

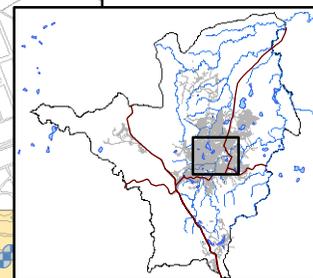
O método de avaliação adotado buscou correlacionar a intensidade de exploração com as ocorrências de abatimento de terreno registradas e a delimitação de susceptibilidade a abatimentos discutida anteriormente. A **Figura 9.3** apresenta um recorte da zona urbana do município na qual estão inseridas as quadrículas de 500 x 500 m com a indicação das respectivas faixas de volume explorado, a rede de poços produtores de água (públicos e particulares) e as ocorrências de abatimento registradas (**Tabela 9.1**).



581000



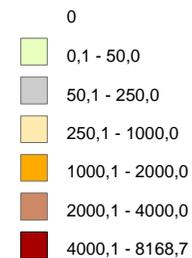
Localização do detalhe do mapa



Localização de Sete Lagoas

Legenda

Somatória dos volumes (m³) diários captados nos aquíferos



- ★ Registro de Abatimento
- Poços Cadastrados
- Rodovias
- Lagoas
- Malha de Ruas
- Drenagem
- Limite Municipal

Nota: Área da quadricula unitária corresponde a 500 x 500 metros (0,25 km²)

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas, BOTELHO (2008), SILVA (1988) e CPRM (2011)

CONTRATANTE:		
PROJETO:		
TÍTULO:		ESTUDO HIDROGEOLÓGICO
ELABORADO:		Daniela Barbatí Osório
CONTRATO:	3988	
ESCALA:	1:30.000	
DATA:	DEZ/2013	

581000

7849000

7849000

A avaliação realizada neste estudo, tendo como base a análise à **Figura 9.3**, considera que as ocorrências de abatimento de terreno em Sete Lagoas possuem origem relacionada tanto a fatores naturais do ambiente cárstico quanto de possíveis influências antrópicas relacionadas ao uso intenso das águas subterrâneas.

Os abatimentos identificados como 4, 7, 11, 13 e 17 visivelmente não possuem relação com captações das águas subterrâneas. Embora possam existir poços clandestinos, desconhecidos dos cadastros de poços existentes, é pouco provável que esses poços possuam vazões compatíveis com as explotadas pelos poços públicos e outros particulares de grande vazão. Em geral, grandes usuários de água não são alheios aos mecanismos de gestão dos recursos hídricos, embora, por vezes, não estejam plenamente regularizados.

A discussão acima permite estabelecer que o município de Sete Lagoas possui susceptibilidade natural a abatimentos de terrenos, com casos que ocorreram e ocorrerão independentemente de influência antrópica relacionada à exploração das águas subterrâneas. Nota-se pela **Figura 9.2** que o abatimento 11 não está inserido nas áreas delimitadas como susceptíveis a abatimentos, ou seja, o ambiente cárstico, em diversas condições, tem potencialidade de ocorrer abatimentos de terrenos.

As ocorrências identificadas como 3, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 14 e 16 estão localizadas em regiões com as maiores taxas de exploração (**Figura 9.3**), cujas quadrículas que estão inseridas ou no seu entorno possuem taxas de exploração acima de 2.000 m³/dia. Nesses casos, possivelmente, a exploração das águas subterrâneas desencadearam ou aceleraram os processos de abatimento de terreno. Não se pode descartar que, talvez, essas ocorrências aconteceriam naturalmente, entretanto, a forte correlação entre esses abatimentos e as mais elevadas taxas de exploração conferem correlação aos fatos.

Os abatimentos identificados como 1, 2 e 15 estão em áreas com taxas de exploração intermediárias a baixas, porém próximos a locais com elevadas taxas de abatimento. Nestes casos, não é possível confirmar ou descartar a correlação direta com a exploração das águas subterrâneas. Essas situações trazem dúvidas se os efeitos de elevadas taxas de exploração possam ocorrer a distâncias maiores; ou se taxas menores de exploração também possam provocar abatimentos; ou se são casos, assim como os descritos anteriormente (4, 7, 11, 13 e 17), ocorrem naturalmente sem influência da exploração das águas subterrâneas.



Deve-se salientar, entretanto, que o ambiente cárstico é extremamente heterogêneo quanto à evolução das feições cársticas e, conseqüentemente, à susceptibilidade de ocorrer abatimentos. A região ao norte da lagoa Paulino apresenta as maiores taxas de exploração de todo o município com valor de aproximadamente 8.200 m³/dia na quadrícula de coloração escura adjacente à lagoa. Neste local não há qualquer ocorrência de abatimento, mesmo com taxas de exploração duas ou três vezes superiores que as regiões que apresentaram casos de abatimento.

A discussão acima permite traçar as seguintes considerações acerca do uso das águas subterrâneas em Sete Lagoas, sob a ótica da susceptibilidade de abatimentos de terrenos:

- O uso da água subterrânea não deve ser condenado sob a justificativa de prevenção a abatimentos de terrenos, pois os mesmos poderão ocorrer independentemente da suspensão do uso desse recurso hídrico;
- Devido às características do ambiente cárstico, a determinação de uma taxa máxima de exploração como prevenção aos abatimentos poderá limitar o acesso e uso da água subterrânea como fonte de suprimento às demandas locais e, ao mesmo tempo, não assegurar definitivamente a possibilidade de ocorrência de abatimentos;
- Ainda que uma taxa de exploração segura possa ser definida, a melhor prevenção é o monitoramento com base nos aspectos de queda dos níveis de água do aquífero e de instrumentação de controle geotécnico.

A partir da avaliação hidrogeológica relacionada às ocorrências de abatimento de terreno, este estudo sugere que a prevenção a este tipo de desenvolvimento de feições cársticas deve ser pautada em estudo técnico de risco geológico-geotécnico de detalhe, considerando a aplicação de métodos geofísicos de investigação com foco na identificação de regiões com desenvolvimento de cavidades e na definição de instrumentação de monitoramento geotécnico.

O monitoramento dos níveis de água nos poços mais produtivos, sobretudo nos poços do SAAE também fornecerá importantes informações para o conhecimento e controle de possíveis ocorrências de abatimento de terreno.

Deve-se ressaltar que este estudo não tinha como objetivo a elaboração da carta de risco geológico-geotécnico associada às potenciais ocorrências de abatimentos cárstico, embora o resultado ora alcançado possa subsidiar futuros trabalhos dessa natureza.



10 GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

A discussão apresentada neste capítulo, à luz do conhecimento adquirido com a avaliação hidrogeológica e com o balanço hídrico realizados neste trabalho, busca fornecer subsídios à gestão dos recursos hídricos subterrâneos, tanto na ótica do SAAE, usuário e dependente das águas subterrâneas, quanto ao órgão gestor, responsável pela fiscalização e controle para o manejo sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

Este estudo não teve o objetivo, tão pouco a pretensão, de abarcar todas as possibilidades de discussão sobre o tema em favorecimento à gestão dos recursos hídricos. Entretanto, compilou os principais resultados alcançados neste estudo para embasar algumas contribuições aos processos de operação e controle das captações subterrâneas do SAAE e aos mecanismos de controle para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos de Sete Lagoas.

10.1 CONTRIBUIÇÕES À GESTÃO EMPRESARIAL DO SAAE COM FOCO NO USO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

O SAAE é o maior usuário dos recursos hídricos subterrâneos em Sete Lagoas, sendo responsável por captar aproximadamente 47% de todo o volume explotado dos aquíferos no município. Enquanto usuário e dependente das águas subterrâneas, o SAAE possui importante papel na gestão desses recursos hídricos, considerando que deve buscar o uso sustentável do recurso para:

- perpetuar a fonte de suprimento de seu produto de venda;
- garantir a qualidade e quantidade de suas fontes de captação;
- diminuir custos operacionais com aumento da eficiência nas captações de água;
- controlar riscos de desabastecimento, evitando desgastes na imagem, perdas de receita e custos extras de suprimentos emergenciais.

O SAAE, ainda, como autarquia da administração pública municipal deve ter suas operações em consonância com as legislações existentes, nessa matéria de recursos hídricos e meio ambiente, devendo atender os fundamentos de preservação dos recursos naturais para garantir um meio ambiente equilibrado e qualidade de vida aos munícipes.



Neste contexto, este relatório traz algumas considerações e recomendações à gestão empresarial do SAAE com foco no uso sustentável dos recursos hídricos subterrâneos e na melhoria de processos relacionado à operação das fontes de captação das águas subterrâneas.

10.1.1 ANÁLISE DOS ASPECTOS E IMPACTOS NA OPERAÇÃO DOS POÇOS

Os levantamentos sobre o sistema de administração e operação de recursos hídricos subterrâneos do SAAE identificaram que os principais problemas são: o gerenciamento de dados, sejam estes dados pretéritos sobre o sistema (poços, linhas, engenharia de novas infraestruturas) ou atuais (particularmente as renovações de outorga e concessão de novas outorgas), e uma estrutura organizacional da autarquia que dificulta o fluxo de informação técnica entre departamentos. Como consequência, o planejamento de ações para a prevenção de falhas do sistema não é possível, assim como uma visualização integral de médio e longo prazos sobre os riscos ao abastecimento. A atuação frente aos problemas operacionais das captações subterrâneas vem sendo realizada de maneira reativa e corretiva, sem contar com um planejamento de ações preventivas.

Os principais impactos relacionados com o atual modelo de gestão empresarial das captações de água subterrâneas são:

- Falta de atendimento a requisitos legais, sobretudo relacionado a outorga dos poços;
- Episódios de desabastecimento ocasionados por paralisações de poços devido à falta de manutenção preventiva e por recurso disponível limitado;
- Equipe técnica desprovida de profissionais com conhecimento em hidrogeologia;
- Falta de conhecimento sobre as potenciais ameaças às fontes de captação subterrânea que podem levar ao desabastecimento.



10.1.2 PROPOSTAS DE AÇÕES PARA A GESTÃO DAS CAPTAÇÕES

SUBTERRÂNEAS

Este tópico elenca um conjunto de propostas de ações com foco na melhoria da gestão empresarial do SAAE relacionada ao uso das águas subterrâneas com base na avaliação dos aspectos e impactos relatados anteriormente. Desse modo, as proposições foram agrupadas em aspectos voltados à implementação de um núcleo com foco na gestão de recursos hídricos e em ações práticas para a melhoria na operação dos poços.

Deve-se salientar que para, o aspecto de atendimento ao requisito legal da outorga de uso das águas subterrâneas, este estudo organizou os dados dos poços de modo a facilitar a apresentação das informações necessárias ao processo de outorga, conforme disposto nas fichas de dados dos poços (**Anexo IV**). Os resultados alcançados deverão subsidiar o órgão gestor dos recursos hídricos no Estado de Minas Gerais (IGAM) a conceder a outorga dos poços, conforme será apresentado adiante e também nas conclusões deste relatório.

Sugestões implementação do núcleo de gestão de recursos hídricos do SAAE

As prerrogativas e passos para a criação de um Núcleo de Gestão de Recursos Hídricos (NGRH) são:

- **Estrutura.** Criar dentro do organograma da autarquia um núcleo de pessoas com perfil técnico, vinculadas contratualmente ao SAAE que seja identificada como o núcleo de gestão de recursos hídricos e se reporte diretamente ao Diretor Presidente do SAAE.
- **Perfil.** O núcleo deve ser interdisciplinar e interdepartamental, como mínimo representando o operacional, a engenharia, comunicações e o financeiro.
- **Missão.** As prerrogativas do núcleo devem ser definidas de acordo com o princípio de garantir a quantidade e qualidade sustentável da água subterrânea para o município de Sete Lagoas tendo como base técnica inicial este estudo hidrogeológico.
- **Educação.** Sendo um núcleo técnico a Diretoria deve estimular e fornecer os recursos necessários para executar uma política de educação contínua de seus membros rumo a excelência técnica na gestão de recursos hídricos.
- **Primeiros passos.** O NGRH deve ter como primeira missão uma avaliação crítica e revisão de todos os procedimentos técnicos dos sistemas de captação,



abastecimento e distribuição de água, incluindo os aspectos relacionados à contratação de fornecedores de maneira a garantir a qualidade na execução de tarefas para manutenção e/ou ampliação do sistema. Posteriormente os procedimentos devem ser escritos e validados internamente, tendo em vista futuras revisões rumo à melhora contínua dos mesmos. Outro aspecto a ser avaliado pelo núcleo é de que forma instrumentalizar o SAAE para aplicação dos métodos definidos nos procedimentos, especialmente aqueles relacionados à manutenção e monitoramento dos poços.

- Ferramenta. A ferramenta de gestão é o sistema geográfico de informações (SIG). O controle de dados, as rotinas e as tarefas definidas pelo núcleo de gestão assim como os objetivos devem estar registrados no próprio SIG.
- Operação do SIG e configuração mínima. A operação de entrada de dados do SIG necessita da dedicação exclusiva de um técnico especializado. Há uma configuração mínima para operar um sistema SIG que necessita de software e equipamentos apropriados e deverão ser adquiridos pelo SAAE.

Sugestões de implantação de SIG com foco na eficiência operacional dos poços

O gerenciamento de dados necessita da sistemática que a ferramenta do SIG proporciona. A estrutura básica da ferramenta, desenhada para o estudo, tem seu foco na organização de dados dos poços do SAAE e nos mapas temáticos do projeto. Uma das características fundamentais da ferramenta é que é possível a sua ampliação e adaptação de acordo com as necessidades gerenciais da operação, neste sentido recomenda-se que o SIG seja usado inicialmente para:

- O controle das rotinas de operações e manutenções nos poços;
- A inserção de novos dados e mudanças percebidas na infraestrutura quando realizada qualquer operação importante de manutenção nos poços;
- O registro de parâmetros hidráulicos resultantes da execução de testes em poços novos ou na troca de bombas em poços preexistentes;
- O cadastramento de poços novos instalados;
- O controle semestral de atualização de dados no IGAM;
- A verificação da execução de monitoramentos diversos (campanhas analíticas, medição de níveis de água) e de seus resultados gráficos e cartográficos;
- O controle dos prazos para a mitigação de riscos poço a poço;



- A caracterização e registro de mudanças no uso e ocupação do solo no entorno próximo dos poços e nas áreas de influencia dos mesmos, além de seu lançamento de dados em base cartográfica;
- A inclusão cartográfica das infraestruturas de abastecimento e distribuição que estão sendo mapeados pelo SAAE;
- Os registros de falhas e de ocorrências relacionadas à qualidade e quantidade de água no sistema ou nos poços para controle estatístico e cartográfico;
- O registro de ocorrências de abatimento oficialmente registradas;
- O registro atualizado dos planos de mitigação de riscos à operação do sistema (PMRO) que o NGRH debate periodicamente.

A **Tabela 10.1** mostra a proposta para um plano de mitigação de ameaças para a melhora operacional do sistema. As colunas em vermelho indicam graus de atenção, sendo o vermelho o mais alto e verde o mais baixo.



PLANO DE MITIGAÇÃO DE RISCOS À OPERAÇÃO DO SISTEMA (PMRO) (Versão V0 - 17/05/2013)								Revisão NGRH: Julho 2013	
Problemática		Ações de controle							
Questão	Risco	Departamento / Equipe	Estratégia da ação/Ações	Duração	Custos Aproximados R\$	Início	Conclusão	Status	Avaliação Crítica (Data)
AÇÕES EM ANDAMENTO									
criação do núcleo de gestão de recursos hídricos Criar um núcleo dentro da estrutura do SAAE para dar continuidade à gestão de recursos hídricos e mitigação de riscos. Sugere-se o nome de NGRH - Núcleo de Gestão de Recursos Hídricos	ALTO. Sem uma equipe responsável por isso não será implementada a gestão de recursos hídricos	Dir. Pres. Ananias	1- Debater organograma e aprovar 2- Propor projeto e estrutura organizacional à câmara municipal do município 3- Implementar mudança	6 meses	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	jun/13	out/13		Jul-13
CADASTRO SIAGAS O cadastro de todos os poços no sistema SIAGAS necessita das fichas de todos os poços do SAAE. Foram organizadas e entregues na forma de relatório parcial 09/04/2013 pela SERVIMAR.	ALTO. Não cumprimento implica no descumprimento do TAC assinado com o IGAM e risco da renovação de concessões de outorga.	Cristina Fátima	Revisar, aprovar e encaminhar oficialmente ao SIAGAS	6 meses	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	jun/13	out/13		Jul-13
REGULARIZAÇÃO DE OUTORGA Com as fichas dos poços no formato exigido pelo IGAM e o estudo hidrogeológico a ser entregue em 17/05/2013 o SAAE está em condições de iniciar o processo de renovação de Outorga. Contatos como IGAM iniciados em 09/04/2013	ALTO. Desabastecimento	Cristina Fátima	1- Debater passos e estratégia com IGAM 2- Proceder com a solicitação 3- Usar o SIG como plataforma de controle de outorga para o NGRH	1 ano	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	jun/13	out/13		Sep-13
AÇÕES USANDO A FERRAMENTA SIG									
Questão	Risco	Departamento / Equipe	Estratégia da ação/Ações	Duração	Custos R\$ e/ou Horas/homem	Início	Conclusão	Status	Avaliação Crítica (Data)
CADASTRAMENTO DE NOVOS POÇOS Qualquer novo poço instalado deve ser cadastrado no SIG seguindo o modelo de ficha definido nos procedimentos internos do SAAE devidamente assinados pelo geólogo responsável pela perfuração e instalação.	ALTO. Sem organizar dados de infraestruturas novas não pode ser feita a gestão	Operacional e NGRH (Lider)	0- O NGRH do SAAE deve definir procedimentos mínimos de manutenção e criar checklist e indicadores 1- Verificar que fornecedor, ou operacional, seguiram à risca procedimento SAAE de perfuração de poços e perfil descritivo e construtivo. 2- Avaliação crítica de qualidade de dados 3 - Repasse de dados para o técnico SIG	Ação Permanente	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	jun/13	Ação Permanente		Jul-13
CONTROLE DE MONITORAMENTO E POTENCIOMETRIAS (Vazões, NA's e ND's). O controle dos níveis estáticos e dinâmicos dos poços do SAAE ao longo do tempo são os dados mínimos que devem ser monitorados. A integração dos níveis estáticos entre poços devem mostrar direções de fluxo, eventuais interferências e confirmar ou não rebaixamentos locais dos níveis de água.	MÉDIO. A longo prazo a ausência destes dados ameaça várias questões de gestão: influencias entre poços, comprovação de diminuição de níveis de água na área urbana, eventualmente influencia da super-exploração em abatimentos de terreno, ou as vazões seguras de exploração.	Operacional e NGRH (Lider)	1- leitura crítica do plano de monitoramento de NA e ND proposto pela SERVIMAR 2- Monitoramento piloto 3- Avaliação crítica do Piloto 4- Ajustes 5- Implementação 6- Lançamento no SIG 7- Em agosto avaliar a necessidade de compra de medidores de NA dedicados	1 ano	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	ago/13	2014		Aug-14
CONTROLE DE MANUTENÇÃO DOS POÇOS As diferenças de idade entre poços, seu uso, as especificidades construtivas implicam em um universo variado de estados de conservação, eficiência até acessos.	ALTO. Há uma alta dependência de água subterrânea na cidade, a ausência de programas sistemáticos de manutenção e controle preventivo provocam a maioria de problemas de abastecimento	Operacional e NGRH (Lider)	0- O NGRH do SAAE deve definir procedimentos mínimos de manutenção e criar checklist e indicadores 1- Verificar que depto. operacional, seguiu procedimento SAAE de manutenção de poços. 2- Avaliação crítica de qualidade de dados fornecidos pelo Operacional 3 - Repasse de dados para o técnico SIG e lançamento por poço.	Ação Permanente	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	jun/13	Ação Permanente		Aug-13
CONTROLE DE TRANSFERENCIA DE DADOS AO SISTEMA SIAGAS Consiste em atualizar o cadastro nacional com novos poços, mas também os antigos.	BAIXO. Não é imediato e não impossibilita nenhum processo legal. Longo prazo afeta relações institucionais e com poder público.	NGRH	1- Atualizar pessoas de contato para facilitar fluxo de informações 2- Incluir dentro do procedimento de cadastro de poços novos no SIG um item específico para verificação de cadastro no SIAGAS 3-Executar o cadastro	Término Indefinido (período de verificação semestral)	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	nov/13	Ação Permanente		Dec-13
ATUALIZAÇÃO FOTOGRÁFICA POÇOS E ACESSOS. Para planejamento de atividades de qualquer natureza é necessário saber do estado atual dos poços e da facilidade de acessos.	MÉDIO. O seu não cumprimento não interfere no abastecimento, ou cria riscos imediatos. Prejudica o planejamento e retarda processos. A longo prazo pode induzir riscos ao desabastecimento e qualidade por falta de manutenção.	Operacional e NGRH (Lider)	1- Reunião para definir poços prioritários e cronograma 2- Execução 3- Atualizar fotos dos poços no SIG	Ação Permanente	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	jun/13	Ação Permanente		Sep-13
TOPOGRAFIA DOS POÇOS: ESTAÇÃO TOTAL. Necessárias para obter precisão no monitoramento de NA e ND	BAIXO. Longo prazo não haverá como ter certeza dos mapas potenciométricos no tempo afetando as decisões gerenciais e de planejamento de longo prazo.	Operacional e NGRH (Lider)	1- Se for uma tarefa a ser executada pelo SAAE precisa montar um projeto e treinar pessoas para o uso da estação total disponível no SAAE 2- Se não for equipe interna será externa. Necessário abrir processo licitatório 3- Os dados topográficos devem ser lançados no ambiente SIG no fim	3 meses	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	A definir	Dez -2013		Jan-14
PLANO DE MONITORAMENTO. Desenhar um plano de monitoramento de acordo com as necessidades legais e de gestão da qualidade da água dos poços.	MÉDIO. A situação de conforto quanto à qualidade da água não exige implementação imediata de plano. A longo prazo aumentam os riscos à qualidade.	NGRH / DIR	1- Debater internamente situação dos poços em termos de qualidade 2- Decidir quanto à frequência, parâmetros e montar um plano 3- Orçar 4 - Lançar o plano em SIG para controle	1 mês	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	jun/13	41456		Aug-13
MAPAS DE T, Q/S E K DE ÁREAS SEM DADOS. Implica em desenhar um plano de ensaios hidráulicos em poços adicionais, especialmente na região periférica do município para calcular os parâmetros necessários e refinar configuração de mapas de Favorabilidade e Vulnerabilidade.	MÉDIO. Requer recursos para subcontratar a execução e fazer os cálculos dentro do âmbito do estudo hidrogeológico e a ferramenta de gerenciamento SIG. A longo prazo aumentam os riscos de voltar a uma gestão reativa apenas.	NGRH / DIR	1- Debater quais áreas precisam de refinamento 2- Controlar as ações pensadas (cumprimento no tempo) para estas áreas em ambiente SIG 2- Conseguir recursos	1 ano	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	jul/13	2014		Sep-13
LANÇAMENTO DE DADOS Q E NA'S RIOS JEQUITIBA E PARAPEBA. Criação no SIG de banco de dados para lançamento de dados de vazão e níveis de água superficiais dos rios principais de Sete Lagoas que em longo prazo indiquem a relação de crescidas com mudanças nos NA dos poços.	BAIXO. Necessário desenhar um programa que implique outras partes interessadas. Necessário articular. A longo prazo aumentam os riscos de julgar a situação de recursos hídricos do município com critérios ultrapassados.	NGRH	Necessário desenhar um programa que implique outras partes interessadas. Necessário articular participação junto a universidade, EMBRAPA e outros	Indefinido	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	-	-		-
CARACTERIZAÇÃO DO ENTORNO (USO E OCUPAÇÃO). Ao redor do poço, além da área de influência. Sugeridos 1Km ao redor do poço.	ALTO. Serve para identificar ameaças nas proximidades aos poços e é necessária a reavaliação a cada ano das mudanças de uso e ocupação. Risco de acontecer problemas de qualidade por atividades próximas não controladas.	NGRH / DIR	1- Treinamento de equipe interna para identificar ameaças à qualidade 2- Executar piloto e lançar em SIG 3- Planejar tarefa para todo o município	2 anos	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	ago/13	2015		Sep-13
DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA DOS POÇOS E COMPRENSÃO DO ENTORNO. Necessário estimar as áreas de influência direta de todos os poços do SAAE e mapear o uso e ocupação do solo dentro dessas áreas.	ALTO. Requer recursos para subcontratar a execução e fazer os cálculos dentro do âmbito do estudo hidrogeológico e a ferramenta de gerenciamento SIG. Risco de acontecer problemas de qualidade por atividades próximas que estariam dentro da área de influência.	NGRH / DIR	1- Debater planejamento para executar 2- Conseguir recursos 3- Orçar 4- Contratar 5- Executar projeto e lançar dados em SIG	2 anos	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	set/13	2015		Sep-13
CADASTRO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E ESGOTO. O Sistema está sendo mapeado desde 2010. Precisa ser feita a digitalização do que já foi mapeado até agora no SIG para associar eventuais mudanças de qualidade da água dos poços a vazamentos da rede.	MÉDIO	NGRH	1- Coordenar com a área de planejamento do Município compartilhamento de dados 2-Digitalizar no sistema SIG	1 mês	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	jun/13	41456		Aug-13
REVALIAÇÃO MAPAS DE VULNERABILIDADE E FAVORABILIDADE A reavaliação acontecerá com a adição de novo conhecimento hidrogeológico, geológico ou de qualquer outra natureza que tenha alguma influência nos critérios de elaboração dos mapas de favorabilidade e vulnerabilidade alcançados.	BAIXO. É aperfeiçoamento contínuo do conhecimento. Tanto mais aperfeiçoado	NGRH / DIR	1- Vigiar produção de novos dados 2-Promover a compilação de conhecimento 3- Diálogo com o meio acadêmico para produzir conhecimento 4- Divulgação do conhecimento	Ação Permanente	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	jun/13	-		Jun-14
ATUALIZAÇÃO DE ALERTAS PARA CADA POÇO. Definir dentro do SIG, em particular nas fichas dos poços os critérios individualizados de gestão, com níveis de alerta e datas que serão monitoradas permanentemente para mitigação.	ALTO. Num universo de 105 poços há riscos permanente de de diversa natureza, de curto, médio e longo prazos e de alto, médio e baixo grau de atenção.	NGRH / DIR	1- Avaliar poço a poço as ameaças. Lançar em SIG 2 -Debater poço a poço o planejamento de ações. Lançar em SIG 3- Conseguir recursos 4- Orçar 5- Contratar	Ação Permanente	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	jun/13	-		Jul-13
ATUALIZAÇÃO DOS MAPAS DE EXPLOTAÇÃO X CONSUMO POR ZONA Integrar dados de consumo no SIG	MÉDIO. A longo prazo sem considerar o consumo aumentam os riscos de afetar o julgamento de ações que preservem a quantidade de água.	NGRH	Integrar os dados no SIG.	1 mês	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	jun/13	jun-13		Aug-13
LANÇAMENTO DE NOVAS ÁREAS DE ABATIMENTO. Uma das grandes questões do município. O abatimento deve ser monitorado com método e sistematicamente a fim de gerar dados a médio e longo prazo e criar indicadores.	ALTO. Grupos interessados podem associar erroneamente a exploração de poços a abatimentos, ou podem estar acontecendo abatimentos em áreas próximas a poços importantes. Necessário entender o fenômeno e no mínimo monitorar o que acontece.	NGRH	1- Abrir o debate e estimular junto aos órgãos competentes a criação de projetos de monitoramento de abatimentos 2- Coordenar compartilhamento de dados sobre abatimentos 3-Digitalizar no sistema SIG	1 ano	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	jun/13	2014		Sep-13
LANÇAMENTO EM MAPA DE OCORRÊNCIAS DE DESABASTECIMENTO E QUEIXAS SOBRE A QUALIDADE Podem trazer pistas e indicações de problemas com o aquífero ou os poços.	MÉDIO. É um dado que sustenta outros indicadores.	NGRH	1- Coordenar com a área de Comunicação 2- Criar projeto 3- Alimentar o SIG	Ação Permanente	Definir custos em R\$ e/ou horas-homem na revisão do plano em Junho 2013	jun/13	-		Sep-13

10.2 CONTRIBUIÇÕES PARA A GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS NO MUNICÍPIO DE SETE LAGOAS

Os resultados alcançados neste estudo acerca da geologia, hidrogeologia e do uso da água subterrânea em Sete Lagoas permitiram o reconhecimento de aspectos que podem contribuir com a gestão dos recursos hídricos no município. Desse modo, serão apresentadas algumas discussões e propostas de gestão com foco no aproveitamento sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

Deve-se postular que este estudo, embora tivesse diversos objetivos específicos, foi motivado principalmente para avaliar o cenário de exploração das águas subterrâneas nos aquíferos cársticos, frente ao potencial de ocorrências de abatimento de terrenos.

Os resultados ora alcançados serão discutidos com foco na caracterização das potencialidades hídricas subterrâneas associadas à prevenção do favorecimento de feições cársticas de abatimentos de terrenos das reservas exploráveis em Sete Lagoas.

Este tópico se propõe também a fornecer subsídio ao órgão gestor estadual dos recursos hídricos, IGAM, na avaliação e concessão das outorgas de uso das águas a serem requisitadas pelo SAAE para a regularização das fontes de captação de água subterrânea da autarquia municipal de abastecimento público de água.

Previamente às análises específicas sobre potencialidade hídrica em Sete Lagoas, deve-se considerar que, pelo balanço hídrico efetuado neste estudo, a reserva renovável foi estimada em 160×10^6 m³/ano (5,0 m³/s) e, se considerada como potencialidade hídrica, possui com comprometimento de 45% com base nos recursos disponíveis calculados em 72×10^6 m³/ano (volumes explorados). Desse modo, os recursos exploráveis são da ordem de 88×10^6 m³/ano (2,8 m³/s), anualmente renovados. Estes resultados de potencialidade e reservas exploráveis são considerados subestimados, sendo que parcelas de contribuições advindas de áreas externas do município e do ACBH não foram mensuradas pelos dados disponíveis e também por provável valor superestimado do volume explorado, conforme discutido no item 7.3.1.

Diante das discussões sobre o balanço hídrico, o cenário de captação das águas subterrâneas em Sete Lagoas é bastante confortável, indicando que as águas subterrâneas tem potencial para continuar suprindo a demanda atual e futura. Entretanto, o modelo de uso das águas subterrâneas atualmente instalado necessita de melhor gerenciamento e, provavelmente, adequações, sobretudo na melhor distribuição dos poços.



Os aspectos técnicos que embasam a discussão acerca das potencialidades hídricas, da prevenção ao favorecimento de feições cársticas de abatimento de terreno e de regularização (outorga de uso das águas) das captações subterrâneas de Sete Lagoas estão representados na **Figura 10.1**. Nesta, estão representadas as quadrículas de 500x500m com as respectivas indicações de faixas de volume de exploração, os poços cadastrados em Sete Lagoas identificados como público ou particular com a indicação da situação de outorga e as ocorrências de abatimento de terreno registradas.

Em análise à **Figura 10.1** é possível notar ao adensamento de poços coincidindo com as quadrículas com elevadas taxas de exploração que, em alguns casos, coincide com ocorrências de abatimento de terreno. Esse cenário leva à proposição de que as áreas (quadrículas) com vazões de exploração superiores a 2.000 m³/dia sejam gerenciadas sob condições especiais pelo órgão competente. A seguir são apresentadas algumas propostas condicionantes para serem aplicadas nesses locais.

As propostas de medidas para aplicação nas quadrículas com vazão de exploração superior a 2.000 m³/dia são:

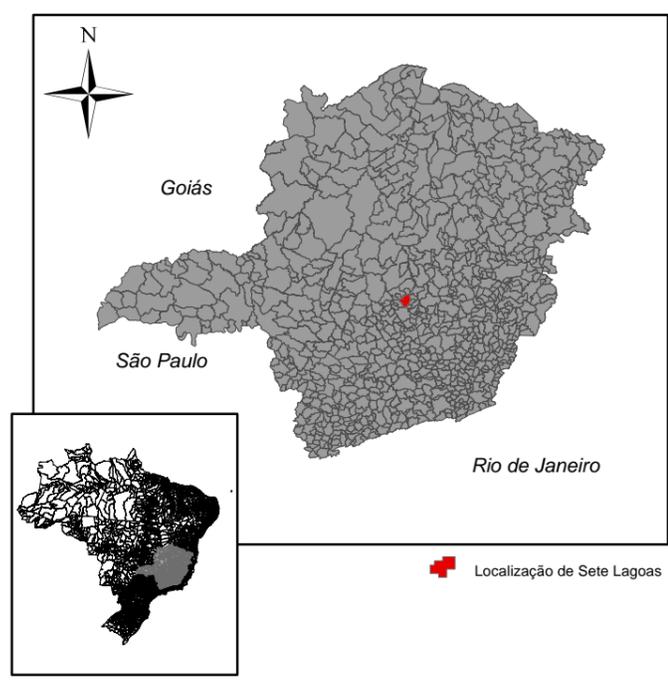
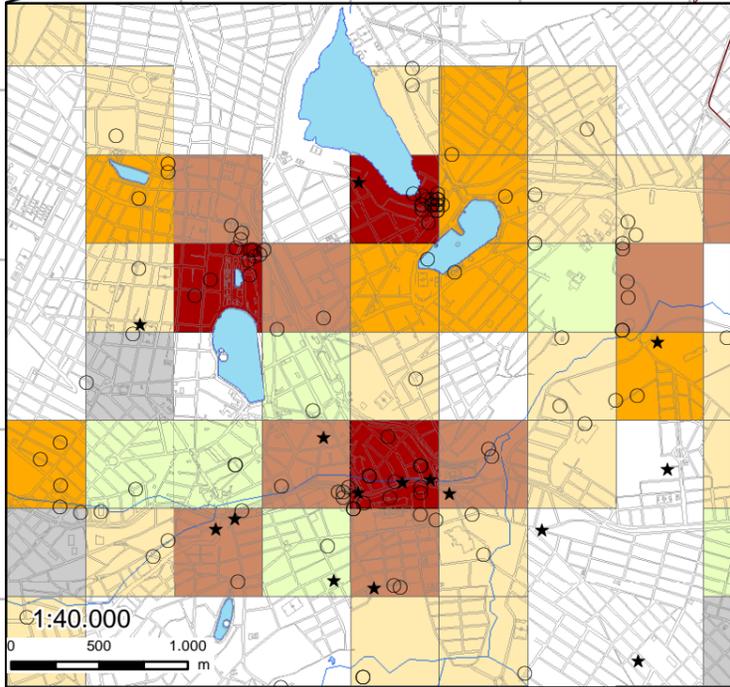
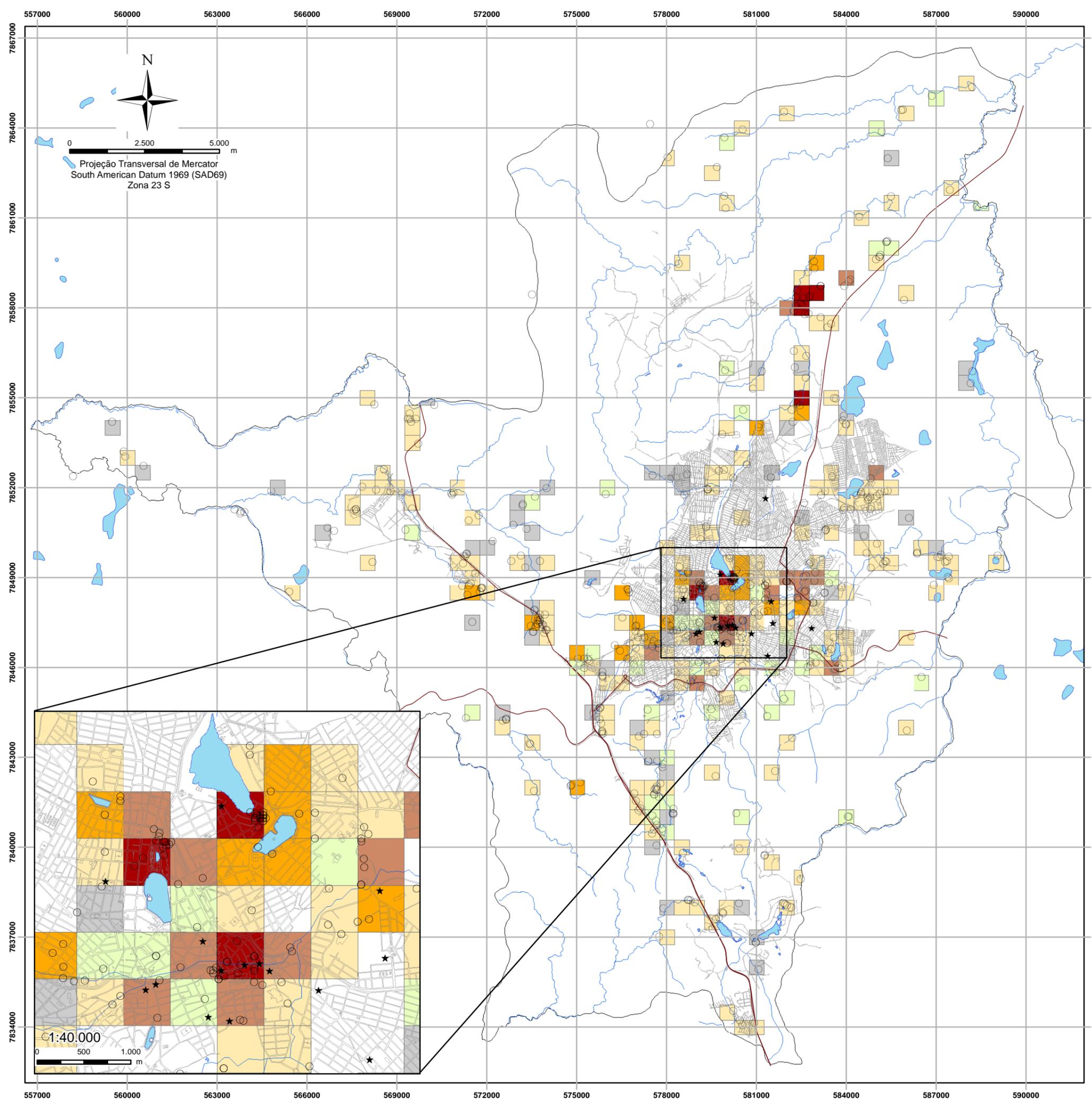
1 Condições gerais

- O órgão gestor competente deverá providenciar / solicitar recadastramento detalhado de usuários com foco na atualização de dados dos poços cadastrados e o reconhecimento de poços clandestinos;
- O órgão gestor competente deverá exigir aos usuários (público e particulares) com prazo determinado para a instalação de hidrômetro individual por poço;
- O órgão gestor competente deverá solicitar ao SAAE que proceda com a leitura mensal dos hidrômetros, a partir das quais, o SAAE poderá efetuar a cobrança pelo serviço de coleta e tratamento de esgoto, e informe mensalmente, ao órgão gestor dos recursos hídricos, o consumo individual por usuário;
- O órgão gestor dos recursos hídricos deverá consistir um banco de dados atualizados dos usuários cadastros e prover com a alimentação contínua das vazões efetivamente exploradas;
- O órgão gestor competente deverá, a partir da ampliação dos dados de usuários e das efetivas vazões de captação, contratar estudo para atualizar (validar ou revisar) as estimativas ora alcançadas;



- O órgão gestor competente deverá cancelar ou não renovar a outorga de usuários que não efetuaram atendimento às condicionantes específicas exigidas para essas áreas.
- 2 Condições específicas aos poços do SAAE (abastecimento público)
- O órgão gestor competente deverá conceder outorga a todos os poços do SAAE, independentemente da vazão requerida, mediante comprovação de adequação construtiva do poço a partir de relatório técnico construtivo ou de perfilagem ótica;
 - O órgão gestor competente deverá solicitar o cumprimento às proposições gerais apresentadas acima;
 - A emissão da outorga dos poços do SAAE deverá apresentar as seguintes condicionantes para os poços que estiverem situados em áreas com vazão de exploração superior a 2.000 m³/dia e situadas em local com susceptibilidade de abatimento de terreno, com estabelecimento de prazo de atendimento: providenciar medição ininterrupta do nível dinâmico dos poços com uso de transdutores de pressão; apresentar plano de ampliação das captações com vistas à operação dos poços em regime máximo de 18 h/dia;
- 3 Condições específicas aos poços particulares (qualquer finalidade de uso)
- O órgão gestor competente deverá solicitar o cumprimento às proposições gerais apresentadas acima;
 - O órgão gestor competente deverá condicionar a emissão e/ou renovação de outorga priorizando o uso para o abastecimento, em conformidade com o Art. 3º da Política Estadual de Recursos Hídricos e, desse modo, mediante consulta ao SAAE sob a capacidade de atendimento ao usuário particular interessado, deverá cancelar ou não renovar as outorgas de uso das águas subterrâneas de poços particulares que estejam competindo com os poços do SAAE e superando a vazão de 2.000 m³/dia na quadrícula;
 - O órgão gestor competente, mediante a necessidade de emitir outorgas de uso da água subterrânea para poços particulares que superem o volume de exploração de 2.000 m³/dia da quadrícula, deverá exigir estudo técnico que comprove a capacidade hídrica local, bem como os aspectos de risco geológico-geotécnico, a ser realizado e custeado pelo usuário particular interessado.





Legenda

Somatória dos volumes (m³) diários captados nos aquíferos

- 0
- 0,1 - 50,0
- 50,1 - 250,0
- 250,1 - 1000,0
- 1000,1 - 2000,0
- 2000,1 - 4000,0
- 4000,1 - 8168,7
- Cadastro de Poços
- ★ Registro de Abatimento
- Lagoas
- Rodovias
- Malha de Ruas
- Drenagem
- Limite Municipal

Nota: Área da quadricula unitária corresponde a 500 x 500 metros (0.25 km²)

Base de Dados: Núcleo de Geoprocessamento da Prefeitura de Sete Lagoas

CONTRATANTE:		
PROJETO:		
TÍTULO:		ESTUDO HIDROGEOLÓGICO
ELABORADO:		Daniela Barbatí Osório
CONTRATO:	3988	
ESCALA:	1:125.000	
DATA:	DEZ/2013	

Em relação à análise da **Figura 10.1**, pode-se traçar as seguintes considerações:

- A região com os maiores índices de ocorrência de abatimento de terreno com provável influência de exploração de poços possui captação feita por usuários particulares, sendo que, parte desses não possui outorga de uso, de acordo com o banco de dados compilado de registros existentes;
- De modo geral, as áreas (quadrículas) com valores exploração acima de 4.000 m³/dia e, em diversos casos, com exploração acima de 2.000 m³/dia apresentam algum tipo de efeito indesejável provavelmente associado ao uso intenso das águas subterrâneas, tais como, abatimento de terreno, queda de níveis de água, perda de produtividade de poços ou rebaixamento de nível de corpos hídricos superficiais.

Diante dessas constatações, pode-se estabelecer empiricamente, na falta de dados mais consistentes para produzir valores absolutos da capacidade dos aquíferos, que a potencialidade hídrica do SACSL, em Sete Lagoas, está em torno destes valores, ou seja, o órgão gestor dos recursos hídricos poderá atuar com uma previsão de outorga dentro desse limite. A medida que a gestão dos recursos hídricos propiciar mais e melhores dados, esses valores deverão ser confirmados em estudos futuros.

Entretanto, complementa-se que o ideal é buscar melhor distribuição das captações subterrâneas, evitando-se que esses valores de captações ocorram em grandes áreas contíguas. Destaca-se que em diversas regiões do município as potencialidades estão integralmente explotáveis, conforme pode ser observado na **Figura 10.2** que apresenta os mapas das zonas explotáveis do município de Sete Lagoas.

O mapa das zonas explotáveis constitui uma ferramenta multifuncional de tomada de decisão para a gestão e uso dos recursos hídricos subterrâneos. Os órgãos gestores de recursos hídricos poderão subsidiar as decisões de outorga com base nessa cartografia. Os gestores municipais de planejamento poderão nortear o zoneamento de uso e ocupação do solo com base na proteção dos principais mananciais subterrâneos. Os grandes usuários de água, sobretudo o SAAE, poderão planejar seus alvos de prospecção para futuras captações subterrâneas e, desse modo, projetar as estruturas dos reservatórios e das redes de distribuição de água. Enfim, diversos gestores públicos e privados poderão subsidiar suas decisões estratégicas, gerenciais e de planejamento com este produto cartográfico.



Este mapa foi elaborado com o objetivo de indicar as áreas mais propícias para a captação de água subterrânea no município de Sete Lagoas. No mapa são delimitadas as zonas com diferentes potencialidades hídricas, associando outros fatores que influenciam na qualidade ou quantidade da água, assim como os riscos de abatimentos do terreno. As zonas foram definidas através do cruzamento dos mapas de favorabilidade hídrica (**Figura 7.6**), da vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas (**Figura 8.4**), das vazões de exploração (**Figura 7.13**) e das áreas com susceptibilidade a abatimento de terreno (**Figura 9.2**).

O mapa das zonas explotáveis apresenta-se subdividido em quatro zonas em domínios hidrogeologicamente distintos. O domínio do SACSL abrange as zonas 1, 2 e 3 e o domínio do ACBH corresponde à zona 4. No mapa das zonas explotáveis (**Figura 10.2**) também estão delimitadas as quadrículas com vazões de exploração acima de 2.000 m³/dia que correspondem à regiões sem recursos explotáveis ou seja, a potencialidade hídrica está plenamente disponível para consumo. A descrição das características de potencialidade hídrica, vulnerabilidade, susceptibilidade a abatimentos de terrenos serão apresentadas a seguir:

Zona 1

Inserida no domínio do SACSL, corresponde à região com muito alta favorabilidade hídrica (poços com vazões de 80 a 190 m³/h e vazões específicas em torno 30 m³/h/m). Situa-se na área central do município, abrangendo quase que a totalidade da zona urbana. Apesar da elevada potencialidade hídrica, corresponde à região de maior recurso disponível, estimando-se que 80% de todo o volume explotado do SACSL são captados dessa zona. Em função da diferença entre os fatores de vulnerabilidade e susceptibilidade a abatimentos, essa zona foi subdividida em duas subzonas:

- Subzona 1A - apresenta baixa vulnerabilidade natural à contaminação e pouca ou nenhuma susceptibilidade de riscos de abatimentos do terreno. Nesta subzona ocorrem pontualmente algumas áreas cujas potencialidades hídricas estão totalmente comprometidas, conforme assinalam as quadrículas com vazões de exploração superiores a 2.000 m³/dia;
- Subzona 1B – possui muito alta vulnerabilidade natural à contaminação e susceptibilidade ao abatimento de terreno, pois está associada às áreas de ocorrência dos depósitos cenozoicos e dos afloramentos das rochas calcárias da



Formação Sete Lagoas. Esta subzona é que está com maior nível de comprometimento das potencialidades, sendo delimitadas diversas áreas (quadrículas) com vazões de exploração superiores a 2.000 m³/dia.

Zona 2

Inserida no domínio do SACSL, com alta favorabilidade hídrica (poços com vazões médias de 60 m³/h e vazões específicas médias de 10 m³/h/m). Em grande parte, envolve a Zona 1, e abrange uma parte do setor leste da sede municipal. Mesmo não possuindo as vazões de transmissividades da zona 1, possui elevado potencial para a captação de água, pois apresenta menor urbanização e maior extensão territorial. Esta zona também foi subdividida em duas subzonas, devido à diferenças entre os fatores de vulnerabilidade e susceptibilidade a abatimentos:

- Subzona 2A – apresenta baixa vulnerabilidade natural à contaminação e pouca ou nenhuma susceptibilidade de riscos de abatimentos do terreno. No setor norte dessa subzona, são visualizadas áreas (quadrículas) com vazões de exploração superiores a 2.000 m³/dia, indicando regiões com potencialidade plenamente comprometida.
- Subzona 2B - possui muito alta vulnerabilidade natural à contaminação e susceptibilidade ao abatimento de terreno, pois está associada às áreas de ocorrência dos depósitos cenozoicos e dos afloramentos das rochas calcárias da Formação Sete Lagoas. Isoladamente, na região limítrofe com a Zona 1, ocorrem áreas (quadrículas) com vazões de exploração superiores a 2.000 m³/dia, indicando regiões com potencialidade hídrica plenamente comprometida.

Zona 3

Inserida no domínio do SACSL, apresenta moderada favorabilidade hídrica (poços com vazões de 5 a 30 m³/h e vazões específicas médias de 4 m³/h/m), baixa vulnerabilidade natural à contaminação e pouca ou nenhuma susceptibilidade de abatimentos do terreno pela captação da água subterrânea. Esta zona está associada às porções de ocorrência da Formação Sete Lagoas sotopostas às rochas da Formação Serra de Santa Helena, predominantemente nas regiões norte e nordeste e noroeste do município.



Zona 4

Inserida do domínio do ACBH, apresenta baixa favorabilidade hídrica, (poços com vazões máximas de $10 \text{ m}^3/\text{h}$, vazões médias de $5 \text{ m}^3/\text{h}$ e vazões específicas médias de $0,2 \text{ m}^3/\text{h/m}$). Está situada na parte sul do município, correspondente com a na área de afloramento do embasamento cristalino. Apresenta baixa a moderada vulnerabilidade natural à contaminação e nenhuma susceptibilidade a abatimento de terreno. As potencialidades hídricas são baixas, mas pouco comprometidas, podendo atender as demandas de pequenos usuários e alternativas individuais de abastecimento.

As quadrículas apresentadas na **Figura 10.2** correspondendo a vazões superiores a $2.000 \text{ m}^3/\text{dia}$ não devem ser consideradas áreas com recursos exploráveis, haja vista que representam locais com potencialidades totalmente comprometidas pelas captações atualmente em operação. Aliás, em alguns casos, com valores bem superiores aos $2.000 \text{ m}^3/\text{dia}$, considerados limite para condições de controle de uso sugeridas neste estudo. Nessas áreas, este estudo sugere que sejam implementadas as medidas de controle indicadas no início deste capítulo.

11 CONCLUSÕES

O estudo conclui que há abundante oferta de água subterrânea em Sete Lagoas, relacionada ao Sistema Aquífero Cárstico de Sete Lagoas (SACSL) com favorabilidade hídrica média a muito elevada, alta potencialidade e grande volume de recursos exploráveis. De acordo com o balanço hídrico efetuado neste estudo, a reserva renovável foi estimada em $160 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ ($5,0 \text{ m}^3/\text{s}$), com apenas 45% da potencialidade hídrica comprometida pelas captações subterrâneas que totalizam cerca de $72 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, restando recursos exploráveis da ordem de $88 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ ($2,8 \text{ m}^3/\text{s}$), anualmente renovados.

A análise às ocorrências de abatimento de terreno, somada à compressão obtida com o levantamento geológico permitiram delimitar áreas com susceptibilidade natural a abatimentos de terreno. A avaliação aos casos de abatimento de terreno constataram situações provável relação com as captações subterrâneas, assim como, sem qualquer relação à exploração dos aquíferos.

A avaliação hidrogeológica acerca da susceptibilidade de abatimentos do terreno conclui que uso da água subterrânea não deve ser condenado sob a justificativa de prevenção a



abatimentos de terrenos, pois os mesmos poderão ocorrer independentemente da suspensão do uso desse recurso hídrico. Entretanto, medidas de controle e monitoramento devem ser práticas nas áreas com altas vazões de captação e susceptibilidade de abatimento, visando evitar o favorecimento de evolução dessas feições cársticas por consequência da exploração das águas subterrâneas.

A distribuição das vazões de exploração das águas subterrâneas na área de estudo, calculadas com base no cadastro de poços de Sete Lagoas, demonstrou correlação de áreas com vazões superiores a 2.000 m³/dia a efeitos indesejáveis como abatimentos de terrenos, queda de níveis de água do aquífero, diminuição da produtividade de poços e interferências com corpos hídricos superficiais. Essa avaliação permitiu estabelecer valores dessa ordem como o limite das potencialidades hídricas do SACSL, a partir do qual foram sugeridas medidas de controle adicionais e condicionantes nas emissões de outorga.

O estudo comprova a existência de recursos explotáveis suficientes para permitir a concessão de outorga a todas as captações subterrâneas do SAAE, mediante condições específicas apenas relacionadas às áreas indicadas em que a somatória de vazões dos poços superar o limite de potencialidade do SACSL.

A área central do município apresentou favorabilidade hídrica muito alta, com vazões médias de 150 m³/h para os poços existentes. Entretanto, nas áreas de ocorrência dos sedimentos cenozoicos e nos afloramentos de calcário, a vulnerabilidade natural à contaminação é alta, assim como os riscos de abatimentos do terreno são maiores, devido ao processo de carstificação. Circundando a área central, foi definida uma zona de alta favorabilidade hídrica, com vazão média dos poços de 60 m³/h. Nos limites norte e oeste do município, no aquífero cárstico, a favorabilidade é moderada, com vazões médias de 30 m³/h e no aquífero cristalino, ao sul do município e estreita faixa a sudoeste/oeste, a favorabilidade hídrica é baixa, com vazão média de 6 m³/h.

A organização das informações sobre poços em um sistema geográfico de informações (SIG) permitiu criar um banco de dados dos poços de produção de água no município de Sete Lagoas, com base nos cadastros de poços do SAAE, SIAM e SIAGAS, totalizando 545 registros de poços que, somados, explotam cerca de 72.000.000 de m³/ano.

O mapeamento geológico de detalhe trouxe novas e importantes contribuições à geologia e à compreensão hidrogeológica local de Sete Lagoas:



- Estratigraficamente se confirmam as relações clássicas, onde o embasamento cristalino formado por rochas do Complexo Belo Horizonte sustentam a porção do Grupo Bambuí local (sequência de meta-sedimentos antigos) composto por duas formações principais: Formação Sete Lagoas (Inferior) e Formação Serra de Santa Helena (superior). A Formação Sete Lagoas está subdividida localmente em Membro Pedro Leopoldo (Inferior) e Membro Lagoa Santa (Superior) e as rochas que as compõem são carbonáticas. A denominação proposta neste relatório para o Sistema Aquífero Cárstico Sete Lagoas (SACSL) se refere ao conjunto de rochas carbonáticas carstificadas do Membro Pedro Leopoldo;
- O novo mapa geológico do município mostrou a redução de afloramentos de rochas constituintes da Formação Sete Lagoas para 3% em área, sendo que anteriormente a sua ocorrência era de 23%;
- As relações de contato litológico são contínuas, predominantemente dúcteis, e geram estruturas na forma de dobras suaves, diferentemente da ideia clássica de cavalgamentos de empurrão. A consequência desta abordagem é uma previsibilidade maior da distribuição em subsuperfície das formações de interesse, particularmente o Sistema Aquífero Cárstico Sete Lagoas (SACSL);
- Os dois grandes domínios aquíferos de relevância para o sistema de abastecimento do município são o domínio cristalino e o domínio aquífero carbonático;
- O domínio aquífero cristalino é recarregado diretamente pela precipitação que se infiltra verticalmente pelas fraturas subverticais, fraturas que conjugadas com outras podem transmitir lateralmente certa quantidade ao domínio aquífero carbonático em contato N-NE;
- Independentemente da possibilidade de um aporte a partir domínio cristalino o modelo conceitual hidrogeológico para o domínio aquífero carbonático pressupõe que a recarga acontece de duas maneiras: a partir das áreas de afloramento do SACSL e a partir do domínio poroso;
- Nas áreas de afloramento do SACSL, de duas formas: como infiltração direta da precipitação, e como infiltração indireta de águas que escoam superficialmente (como por exemplo, em locais aflorantes do SACSL, na base da Serra de Santa Helena);
- Através do domínio poroso a água de precipitação se infiltra verticalmente pela zona não saturada até o contato com o SACSL;



- O SACSL tem caráter livre nas áreas onde aflora, é confinado quando se desenvolve por baixo das rochas da Formação Santa Helena e semiconfinado na região central onde tem contato com a cobertura cenozoica;
- O grau de carstificação é a característica mais determinante dentro do domínio aquífero carbonático para o armazenamento da água e do potencial produtivo, as características geológico-estruturais e as observações diretas feitas com as perfilagens óticas indicam que o grau de carstificação diminui em profundidade e o SACSL tende a ocorrer em maiores profundidades na direção norte;
- A estruturação do domínio aquífero carbonático na forma sistemas de dobras suaves sugere que a sudoeste da Serra de Santa Helena a porção do SACSL (que está em posição estratigráfica inferior) deve entrar em contato com o Complexo Belo Horizonte. Esta faixa de contato confere ao SACSL um importante potencial aquífero;
- Não há indicações claras da participação do aquífero cárstico na descarga em grande escala dentro das bacias hidrográficas onde o município se situa, com exceção de pequenas descargas no sopé da Serra de Santa Helena. É mais provável que as descargas ocorram em um âmbito regional dentro do contexto da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, mas fora do município;
- Os maiores valores vazão específica nos poços do SAAE acontecem nos poços que operam na porção central do município, com valores médios entre 50 e 80 m³/h/m.

A avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação indicou que na área central do município se combinam os fatores que mais elevam o grau de vulnerabilidade, pois os depósitos cenozoicos são um meio de boa condutividade hidráulica em contato direto com o SACSL. Ao mesmo tempo a área central do município se caracteriza pela concentração de indústrias, comércios e residências com potencial de contaminação. Estes dois elementos, a vulnerabilidade natural à contaminação e concentração de atividades potencialmente contaminantes, compõem um cenário de elevado risco à contaminação na área urbana central de Sete Lagoas. Também com alto grau de vulnerabilidade são as áreas de afloramento do SACSL, por estarem diretamente expostas à influência de ações antrópicas oriundas do uso e ocupação do solo, os afloramentos do SACSL são áreas que necessitam especial proteção e atenção do gestor público.

Os resultados analíticos indicaram que, no geral, as águas são de boa qualidade natural e adequada para o abastecimento humano. Das 56 amostras analisadas, 07 apresentaram restrição quanto ao uso para o consumo humano para o nitrito (Poços: PT-18 e PT-24) e



ferro (Poços: PT-45, PT-47, PT-57, PT-77 e PT-89), sendo necessário o monitoramento destes parâmetros no tempo.

Embora o nitrato não supere os valores máximos permitidos pela legislação em nenhum dos poços, a avaliação das concentrações e a sua distribuição espacial permitiu estabelecer uma provável origem antrópica para as ocorrências de nitrato superiores a 10 mg/L, devido a correlação com as áreas de alta densidade demográfica e de antigo histórico de ocupação. O monitoramento da evolução das concentrações de nitrato no tempo e sua distribuição no espaço devem pautar questões como o planejamento do uso e ocupação do solo no município.

As águas subterrâneas do município são águas duras a pouco duras, mas com pouco potencial para a incrustação nos poços e nas tubulações. A classificação hidrogeoquímica das águas é predominantemente bicarbonatada e está de acordo com o perfil hidrogeoquímico esperado para o domínio aquífero carbonático, no entanto a presença de águas bicarbonatadas enriquecidas em Na^{++} K^{+} e Mg^{++} pode ser indicativo de mistura de águas associadas às zonas de contato litológico entre formações pelito-carbonáticas (Sete Lagoas, Serra de Santa Helena e depósitos cenozoicos) e às rochas cristalinas do embasamento (Complexo Belo Horizonte)

12 RECOMENDAÇÕES

Os conhecimentos adquiridos neste trabalho permitiram elencar algumas recomendações a diferentes atores interessados nos resultados ora alcançados.

Ao SAAE recomenda-se:

Propiciar a criação de um grupo gestor multidisciplinar relacionado à temática dos recursos hídricos subterrâneos com foco na elaboração de processos e procedimentos que busquem o uso sustentável do recurso para:

- perpetuar a fonte de suprimento de seu produto de venda;
- garantir a qualidade e quantidade de suas fontes de captação;
- diminuir custos operacionais com aumento da eficiência nas captações de água;
- controlar riscos de desabastecimento, evitando desgastes na imagem, perdas de receita e custos extras de suprimentos emergenciais.



Incluir, no quadro de efetivo e/ou consultores, profissionais com conhecimento em hidrogeologia visando ao planejamento e ações que visem à otimização de recursos e redução dos custos da operação dos poços e minimize os riscos de desabastecimento.

Esse núcleo irá requerer de infraestrutura mínima para o seu funcionamento, profissionais qualificados com conhecimento sobre o sistema de captação, tratamento, reservação e distribuição de água pública, equipamentos de monitoração e softwares.

Implementar um programa específico de monitoramento permanente dos níveis estáticos e dinâmicos dos poços do SAAE, igualmente em relação ao monitoramento hidroquímico que deve ser pensado em função da potencialidade à contaminação. Além dos poços com concentrações acima dos padrões para o ferro e nitrito, deve haver uma priorização de ações de monitoramento em áreas de alta vulnerabilidade natural em combinação com a carga contaminante.

Estabelecer diálogo com IGAM, SUPRAM, CPRM e o SIAGAS para a disponibilização permanente de informação, como troca de dados, consultas entre as áreas de planejamento urbano e a outorga de poços, e a definição de uma rede de monitoramento, entre outros.

Ao IGAM recomenda-se:

Em relação às áreas definidas no mapa das zonas exploráveis com vazão de exploração superior a 2.000 m³/dia, recomenda-se a implementação de medidas de controle adicionais, a saber:

Condições gerais

- O órgão gestor competente deverá providenciar / solicitar recadastramento detalhado de usuários com foco na atualização de dados dos poços cadastrados e o reconhecimento de poços clandestinos;
- O órgão gestor competente deverá exigir aos usuários (público e particulares) com prazo determinado para a instalação de hidrômetro individual por poço;
- O órgão gestor competente deverá solicitar ao SAAE que proceda com a leitura mensal dos hidrômetros, a partir das quais, o SAAE poderá efetuar a cobrança pelo serviço de coleta e tratamento de esgoto, e informe mensalmente, ao órgão gestor dos recursos hídricos, o consumo individual por usuário;
- O órgão gestor dos recursos hídricos deverá consistir um banco de dados atualizados dos usuários cadastros e prover com a alimentação contínua das vazões efetivamente exploradas;



- O órgão gestor competente deverá, a partir da ampliação dos dados de usuários e das efetivas vazões de captação, contratar estudo para atualizar (validar ou revisar) as estimativas ora alcançadas;
- O órgão gestor competente deverá cancelar ou não renovar a outorga de usuários que não efetuaram atendimento às condicionantes específicas exigidas para essas áreas.

Condições específicas aos poços do SAAE (abastecimento público)

- O órgão gestor competente deverá conceder outorga a todos os poços do SAAE, independentemente da vazão requerida, mediante comprovação de adequação construtiva do poço a partir de relatório técnico construtivo ou de perfilagem ótica;
- O órgão gestor competente deverá solicitar o cumprimento às proposições gerais apresentadas acima;
- A emissão da outorga dos poços do SAAE deverá apresentar as seguintes condicionantes para os poços que estiverem situados em áreas com vazão de exploração superior a 2.000 m³/dia e situadas em local com susceptibilidade de abatimento de terreno, com estabelecimento de prazo de atendimento: providenciar medição ininterrupta do nível dinâmico dos poços com uso de transdutores de pressão; apresentar plano de ampliação das captações com vistas à operação dos poços em regime máximo de 18 h/dia;

Condições específicas ao poços particulares (qualquer finalidade de uso)

- O órgão gestor competente deverá solicitar o cumprimento às proposições gerais apresentadas acima;
- O órgão gestor competente deverá condicionar a emissão e/ou renovação de outorga priorizando o uso para o abastecimento, em conformidade com o Art. 3º da Política Estadual de Recursos Hídricos e, desse modo, mediante consulta ao SAAE sob a capacidade de atendimento ao usuário particular interessado, deverá cancelar ou não renovar as outorgas de uso das águas subterrâneas de poços particulares que estejam competindo com os poços do SAAE e superando a vazão de 2.000 m³/dia na quadrícula;
- O órgão gestor competente, mediante a necessidade de emitir outorgas de uso da água subterrânea para poços particulares que superem o volume de



exploração de 2.000 m³/dia da quadrícula, deverá exigir estudo técnico que comprove a capacidade hídrica local, bem como os aspectos de risco geológico-geotécnico, a ser realizado e custeado pelo usuário particular interessado;

O monitoramento dos níveis de água nos poços mais produtivos, sobretudo nos poços do SAAE também fornecerá importantes informações para o conhecimento e controle de possíveis ocorrências de abatimento de terreno.

À Administração Pública Municipal recomenda-se:

Considerar a delimitação das áreas de susceptibilidade de abatimento de terreno na revisão do plano diretor municipal, apenas em caráter provisório. Em relação à potencialidade de ocorrência de abatimento de terreno, este estudo recomenda que a prevenção a este tipo de desenvolvimento de feições cársticas deve ser pautada em estudo técnico de risco geológico-geotécnico de detalhe, considerando a aplicação de métodos geofísicos de investigação com foco na identificação de regiões com desenvolvimento de cavidades e na definição de instrumentação de monitoramento geotécnico.

Utilizar os resultados deste trabalho em subsídio aos futuros estudos de cartográfica de risco geológico-geotécnico associado às potenciais ocorrências de abatimentos cárstico.

Utilizar os resultados deste trabalho em subsídio ao planejamento e ordenamento do uso e ocupação do solo com foco na proteção da qualidade dos mananciais subterrâneas, principalmente às reservas exploráveis.

Incorporar profissionais de geologia e/ou hidrogeologia no quadro técnico, efetivo ou consultivo, da Secretaria de Planejamento e/ou de Secretarias responsáveis pelas matérias de meio ambiente e recursos hídricos com foco na atuação dos aspectos relacionados aos riscos geológico-geotécnicos de terrenos cársticos e na exploração das águas subterrâneas.



13 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLER, L. et al. A standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings, US EPA Report 600/2- 87/035, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, Oklahoma, 1987.

ANDREO, B. et al. Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos. Boletín Geológico y Minero. Universidade de Málaga, 2004.

ASSAD, E. D.; CASTRO, L. H. R. Análise Frequencial da Pluviometria para a Estação de Sete Lagoas, MG. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, 26(3):397-402, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA. Estudos hidrogeológicos. Disponível em: <http://www.abas.org/estudos_termos.php>. Acesso em: 26 mar. 2013.

ATKINSON, T.C. Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britains), J. Hydrol. 35, 1977. p. 93-110.

AULER, A.; FARRANT, A. R. A brief introduction to karst and caves in Brazil. Proc. University of Bristol Speleological Society, 1996, 20 (3), p. 187-200.

AVELLAR, G. de; SILVA, A. F. Novas trilhas no sertão – história da pesquisa agropecuária em Sete Lagoas: das origens à Embrapa. In: Estação Climatológica. Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas, 2000. p. 51-53.

BACK, W. Origin of hydrochemical facies in groundwater in the Atlantic coastal plain. Proceedings, International Geological Congress (Copenhagen), 1960. p:87-95.

BACK, W., R.N. CHERRY, & B.B. HANSHAW. Chemical equilibrium between water and minerals of a carbonate aquifer. National Speleological Society Bulletin, 1996. p. 119-26.

BAKALOWICZ, M. Karst groundwater: a challenge for new resources. Hydrogeology Journal. v. 13, p. 148–160, 2005.

BATISTA, R. C. R. Caracterização Hidrogeológica do Entorno do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS), em Sete Lagoas, MG. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia da UFMG. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Dissertação de Mestrado, 2009. p. 128.



BEAR, J.; TSANG, C. F.; DE MARSILY, G. Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock, Academic Press, San Diego, 1993. p. 560.

BERNARDES, Jr. C et. al. Remedial action for na industrial open dump-proposed activities and prospectives. Water Science and Tecnology, v. 24, n. 11, p. 271-281, 1991.

BERTOLO, R. A. Hidrodinâmica e hidrogeoquímica da zona não saturada do aquífero Adamantina em Urânia (SP). Tese-Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

BERTOLO, R.; HIRATA, R. C. A e FERNANDES, A. Hidrogeoquímica das águas minerais envasadas do Brasil. Revista Brasileira de Geociências. 37(3): 515-529, 2007.

BONACCI, O.; LJUBENKOV, I.; ROJE-BONACCI, T. Karst flash floods: an example from Dinaric karst (Croatia). Natural Hazards and Earth System Sciences 6, 2006. p.195-203.

BONACCI, O.; PIPAN, T.; CULVER, D.C. A framework for karst ecohydrology. Environmental Geology, v. 56, Issue 5, p.891-900, 2008.

BOTELHO, L. A. L. A. Gestão dos Recursos Hídricos em Sete Lagoas: uma abordagem a partir da evolução espaço temporal da demanda e da captação de água. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. 2008. 130 p.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Política Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/l9433.htm>. Acesso em: 22 mar. 2013

BRASIL. Lei nº 10.432, de 20 de dezembro de 2006. Disponível em < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10432.htm>. Acesso em: 22 mar. 2013.

CABRAL, J. Informações básicas para a gestão territorial – Zoneamento Geotécnico e aptidão dos terrenos do Município de Sete Lagoas. Projeto Vida. CPRM. Belo Horizonte, 1994.

CABRAL, J.J.S.P.; SANTOS, S.M.; FILHO, I.D.S.P. Bombeamento Intensivo de Água Subterrânea e Riscos de Subsidência do Solo. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 11, p. 147-157. 2006.



CAGNON, F. A. Origem e Hidroquímica do Nitrato nas Águas Subterrâneas do Aquífero Adamantina em Urânia, SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M.V. Introdução à Ciência da Geoinformação. Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>. Acesso em: fev. 2013.

CARVALHO, C. T. A Presença de Ferrobactérias em Poços Profundos no Estado de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. 1995.

CETESB. Guia de Coleta e Preservação de amostras de água. São Paulo, 150p. 1988.

CHAVES, R. M. Mapeamento da Vegetação e Uso do Solo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jequitibá. Monografia (Especialização). Departamento de Cartografia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005. 38 p.

CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL DA BACIA DO RIO PARAÓPEBA. Disponível em: <<http://www.aguasdoparaopeba.org.br/>>. Acesso em: 18 fev. 2013.

CIVITIA, M. La carte della vulneribilità deli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica. Bologna: Pitagora Editrice, 1994. 325 p.

CLEARY, R. W. Águas Subterrâneas. Princenton Groundwater Inc.: Clean Environment Brasil, 1989. 117 p. Disponível em: <<http://www.clean.com.br/cleary.pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2012.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAL (CPRM). Informações básicas para a gestão territorial: região de Sete Lagoas – Lagoa Santa. Belo Horizonte, v.1, 1994.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAL (CPRM). Informações básicas para a gestão territorial: região de Sete Lagoas – Lagoa Santa. Belo Horizonte, v.5, 1994.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAL (CPRM). Relatório final: mapeamento geológico: região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia. Belo Horizonte: CPRM, 2003 – CD-ROM.



COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAL (CPRM) Projeto Sete Lagoas – Abaeté. Programa Geologia do Brasil. Departamento de Geologia, Superintendência Regional de Belo Horizonte, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2010. 160 p.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. Resolução CNRH nº 15, de 11 de janeiro de 2001. Brasil.

COSTA, W. D. Avaliação de reservas, potencialidade e disponibilidade de aquíferos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, (10: 1998: São Paulo), Anais... São Paulo, ABAS, 1998.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAL (CPRM). 06 mapas geológicos, escala 1:100.000 (Série Programa Geologia do Brasil) versão impressa em papel e em meio digital, textos e mapas. Belo Horizonte, 2009. 160p.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. Hidrologia subterrânea. Barcelona: Ediciones Omega S.A., 1976. v. 2. 1157p.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. Hidrologia subterrânea. Tomo I e II, Ediciones Omega, S.A, Barcelona, 2001. 2350 p.

CUSTÓDIO E LLAMAS, 1983. Disponível em: <http://www.bdt.d.ufpe.br/tedeSimplificado//tde_busca/arquivo.php?cArquivo=1071> Acesso em: 20 fev.2013.

DALY, D.; WARREN, W. Mapping groundwater vulnerability: The Irish perspective. Geological Society Special Publication, v. 130, 1998. p. 179-190.

DOERFLIGER, N.; JEANNIN, P. Y.; ZWAHLEN, F. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of desining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). Environmental Geology, v. 39, n. 2, 1999.

DOERFLIGER, N.; ZWAHLEN, F. EPIK: a new method for outlining of protection areas: a water vulnerability assessment in karstic environment. In: Proceedings of 5th International Symposium on karst waters and environmental impacts. Antalya, Balkema, Rotterdam. 1995. p. 117-123.

DRISCOLL, G. Groundwater and Wells. 2.ed. St. Paul: Johnson Division, 1987. 1088 p.



DUNHAM, R. J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W. E. (ed.), Classification of carbonate rocks: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1962.

EMBRY, A.F.; KLOVAN, J.E. A Late Devonian Reef Tract on Northeastern Banks Island, N.W.T. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, v. 19, 1971. p-730-781.

FEITOSA, F. A. C. et. al. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812 p.

FETTER, C.W. Applied hydrogeology. Nova York: Macmillan Publishing Company, 1988.

FETTER, C.W. Applied Hydrogeology. 4 ed. New Jersey, Prentice Hall, 2001. 691 p.

FOLK, R.L. Practical petrographic classification of limestones. American Association of Petroleum, Geologists Bulletin, v. 43, 1959. p. 1-38.

FOSTER, M. D.; CREASE, R. I. Nitrate pollution of chalk ground water in east yorkshire: a hydrogeological appraisal. In: NITRATE POLLUTION IN EUROPE. Water Information Center. New York: Water Information Center, Post Washington, 1972. p. 269-271.

FOSTER, S. S. D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants, 38., 1987, Noordwijk. Proceedings and Information of the International Conference held in the Netherlands. Noordwijk: TNO Committee on Hydrological Research, 1987. p. 69-86.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data. Lima: WHO/PAHO/HPE/CEPIS, 1987. 87 p.

FOSTER, S.S.D., HIRATA, R., GOMES, D., D'ELIA, M. e PARIS, M. Groundwater Quality Protection: A Guide of Water Service Companies, Municipal Authorities and Environment Agencies. The International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank, Washington, DC. 2002.

FORD, D.C.; WILLIAMS, P.W. Karst geomorphology and hidrology. United Kingdom: Wiley, 2007.

GALDINO, I. G. A Gestão da Qualidade no Sistema de Saneamento Básico da Empresa SAAE, no Ano de 2007. Trabalho de Conclusão de Curso. Administração da Unidade



Acadêmica de Ensino de Ciências Gerenciais, Centro Universitário de Sete Lagoas, 2007. 46 p.

GOLDSCHIEDER, N. The PI method: a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Zeitschrift Fur Angewandte Mathematik Und Mechanik*, v. 463, 2000. p. 157-166.

GOLDSCHIEDER, N. Hydrogeology and vulnerability of karst systems: examples from the Northern Alps and Swabian Alb. Karlsruhe: *Schr Angew Geol Karlsruhe*, 2002. 236 f. (Ph.D. Thesis).

GOLDSCHIEDER, N. Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany. *Hydrogeology Journal*, v. 13, 2005. p. 555-564.

GONÇALVES, G.R. Elementos da Fotogrametria Analítica. Departamento de Matemática, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2006.

GUIMARÃES, D.P et. al. Expansão Urbana da Cidade de Sete Lagoas entre 1949 e 2010. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, Curitiba, 2011.

VESTENA, L. R.; KOBAYAMA, M.; SANTOS, L. J. C. Considerações sobre Gestão Ambiental em Áreas Cársticas. *Revista RA EGA*.6, 2002. p. 81-93.

HARDT, R. Sistema Cárstico e Impactos Antrópicos: Considerações sobre o manejo. In: SIMPÓSIO DE PÓS- GRADUAÇÃO DO ESTADO DE SÃO PAULO. I. Rio Claro. 2008.

HEATH, Ralph C. Hidrologia Básica de Água Subterrânea. North Carolina: Dept. of natural Resource and community development, 1982. 81 p.

HEWLETT, J. D.; NUTTER, W. L. An outline of forest hydrology. Athens. University of Georgia Press, 1969. 137 p.

HUNTOON, P.W. Is it appropriate to apply porous media groundwater circulation models to karstic aquifers? In: El-Kadi, A.I., (Ed.), *Groundwater Models for Resources Analysis and Management*, Pacific Northwest/Oceania Conference, Honolulu, HI, 1994. p. 339–358.

KARMANN, I. Ciclo da Água: água subterrânea e sua ação geológica. In: Teixeira, W.; Toledo, M. C. M.; Fairchild, T. R.; Taioli, F. (Org.). *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p.113-127.



KIRÁLY, L. La notion d'unité hydrogéologique dans le Jura (essai de définition). Thèse en hydrogéologie, Université de Neuchâtel, 1978. 216 p.

KOHLER, H.C. et al. Os Diferentes níveis de seixos nas "Formações Superficiais" da região de Lagoas Santa/MG,. In: Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Geologia, Ouro Preto, 1976. p. 343-347

KLIMCHOUK, A. B. et al. Speleogenesis: evolution of karst aquifers. Huntsville: Natl. Speleol. Soc., 2002. 49 p., 356 illustrations.

LIMA, L. A. et al. Anuário do Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio de Janeiro, v. 32 – 2, 2009. p. 51-61.

LINSLEY, R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. Hydrology for engineers. 2 ed. McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y, 1975.

LOCZY, L.; LADEIRA, E.A. Geologia Estrutural e Introdução a Geotectônica. Editora Edgard Bluchner Ltda, 1976.

LOWE, D. J. Development os speleogenetic ideas in the 20th century. The early approach. In: Klimchouk A., Ford D. C., Palmer A. N. and Dreybrodt W. (Eds.), Apreleogenesis. Evolution of karst aquifers. Huntsville: National Speleological Society, 2000. p 30-38.

MAGALHÃES, P.C. Hidrologia superficial, In: Engenharia Hidrológica, R.J., ABRH, ed. UFRJ, 1989. p. 218-221.

MARCHESE, H.G. Estromatolitos "gymnosolenidos" enel lado oriental de Minas Gerais, Brasil. Revista. Brasileira de Geociências, v. 4, 1974. p. 257-271.

MCNEELY, R. N.; NEIMANIS, V. P.; DWYER, L. Water Quality Sourcebook: A Guide to Water Quality Parameters. Ottawa, Canadá, 1979. 89 p.

MILANOVIC, P.T. Karst Hydrogeology, Water Resources Publications, Littleton, CO, 1981. 443 p.

MIMI, Z. A., ASSI, A. Intrinsic vulnerability, hazard and risk mapping for karst aquifers: a case study. Journal of Hydrology, v. 364, 2009. p. 298-310

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria N0 1.469 - Controle e Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano e seu Padrão de Potabilidade. Fundação Nacional de Saúde, 2000.



MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria nº 2914. Brasília, 12 de dezembro de 2011.

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DEVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE. Nitrates et autres macropolluants dans les eaux: Contamination des eaux souterraines par les nitrates. 2013. Disponível em: < <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/2000/0/contamination-eaux-souterraines-nitrates.html>> . Acesso em: 01 out. 2013.

MOTA, F.S.D.A. Aspectos Agro-meteorológicos da Água na atmosfera. In: Meteorologia Agrícola, Balanço Hídrico, 1986. p.243-309.

NEUMAN, S.P. Stochastic continuum representation of fractured rock permeability as an alternative to the REV and fracture network concepts. In: Custodio, E., Gurgui, A., Lobo Ferreira, J.P. (Eds.), NATO Advanced Workshop on Advances in Analytical and Numerical Groundwater Flow and Quality Modelling, NATO ASI Series, Series C: Mathematical and Physical Sciences, v. 224. Reidel Publications, Dordrecht, 1987.p. 331–362.

OLIVEIRA, F.A.R. Investigação Geofísica. CPRM. 2011.

PANKOW, J.F. et al. An evaluation of contaminant migration patterns at two waste disposal sites on fractured porous media in terms of the equivalent porous medium (EPM) model. J. Contaminant Hydrol. 1, 1986. p. 65–76.

PANKOW, J. et al. Migration of chlorophenolic compounds at the chemical waste disposal site at Alkali Lake, Oregon. 1, Site description and groundwater flow. Groundwater, v. 22, n. 5, 1984. 22 p.

PESSOA, P. Caracterização Hidrogeológica da Região de Sete Lagoas – MG: Potencialidades e Riscos. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1996.

PESSOA, P. Hidrogeologia dos aquíferos cársticos cobertos de Lagoa Santa, MG. Tese de Doutorado. Programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2005.

PIPER, A.M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Transactions American Geophysical Union 25, 1944. p. 914 – 923.



PROCEL, S. T. G. Contaminação por nitrato no Sistema Aquífero Bauru e sua relação com o crescimento urbano em Presidente Prudente – SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. 120 p.

QUINLAN, J.F. et al. The applicability of numerical models to adequately characterize ground-water flow in karstic and other triple-porosity aquifers. In: Ritchy, J.D., Rumbaugh, J.O. (Eds.), *Subsurface Fluid-Flow (Ground-Water and Vadose Zone) Modeling*, ASTM STP 1288, American Society for Testing and Materials, 1996. p. 114–133.

RAMOS, I. P. et al. Estimacion de la Recarga en la Sierra de la Tramuntana (Mallorca) mediante el método APLIS. In: SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA. IX. 2008. Elche. p. 59-71.

RAVBAR, N.; KOVAČIČ, G. Karst Water Management in Slovenia in the Frame of Vulnerability Mapping. *Acta Carsologica*, 35/2, Ljubljana, 2006. p. 73–82.

REGORY, K. J.; WALLING, D. E. *Drainage basin form and process: a geomorphological approach*. London: Edward Arnold, 1973. 458 p.

ROSA FILHO, E. F. et al. Áreas de vulnerabilidade à contaminação de aquífero cárstico causada pela exploração de poços tubulares (estudo de caso de Almirante Tamandaré-PR, Brasil). *Revista Latino-Americana de Hidrogeologia*, n.2, 2002. p. 63-69.

SANTOS, R. A.; CRUZ, M. J. M; NASCIMENTO, S. A. M. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Cadernos de Geociências*, n.7, 2010. p. 54-62.

SAUTER, M. Quantification and forecasting of regional groundwater flow and transport in a karst aquifer. Gallusquelle, Malm, SW, Germany. *Tubinger Geowissenschaftliche Arbeiten C13*. 1992. 150 p.

SAX, N. *Dangerous properties of industrial materials*. 6 ed. Nova York: Van Nostrand Reinhold. 1984.

SCANLON, B. R. et al. Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. *Journal of Hydrology* 276, 2003. p. 137–158.

SENTELHAS, P.C. et al. *Balanços hídricos climatológicos de 500 localidades brasileiras*. [S.l.], 2003.



SHEPARD, F.P. Nomenclature based on silt-sand-clay ratios. Journal of Sedimentary Petrology, v. 24, 1954. p. 151-158.

SHUSTER E.T.; WHITE, W.B. Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: A possible means for characterizing carbonate aquifers. Journal of Hydrogeology 14, 1971. p. 93-128.

SILVA, A.B. Abatimento de solo na cidade de Sete Lagoas, Minas Gerais. Revista de Águas Subterrâneas, n.12, 1988. p. 57-66.

SMART, P. L.; HOBBS, S. L. Characterization of carbonate aquifers: A conceptual base. Proceedings of the Environmental Problems in Karst Terranes and Their Solutions Conference, Bowling Green, KY, 1986. p. 1-14.

STIFF, H.A. Jr. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. Journal of Petroleum Technology 3 (10), 1951. p. 15 - 17.

TEIXEIRA, W. et al. Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 568 p.

TERNAN, J.L. Comments on the use of a calcium hardness variability index in the study of carbonate aquifers: with reference to the central Pennines, England, Journal of Hydrogeology 16, 1972. p. 317-321.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. Geogr.Rev, v.38, 1948. p.55-94.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Publications in climatology. Laboratory of Climatology, New Jersey, v.8, 1955. 104 p.

TODD, D. K. Groundwater hydrology. New York: John Wiley & Sons, 1959. 319 p.

TRAVASSOS, L.E.P. Considerações sobre o carste da região de Cordisburgo, Minas Gerais, Brasil. Belo Horizonte: Tradição Planalto, 2010. 102 p. Disponível em: www.tradicaoplanalto.com.br.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Drinking water regulations and health advisories. USEPA, 1995. Disponível em: < www.epa.gov>. Acesso em: 11 abr. 2012.



VARNIER, C. L.; HIRATA, R. Contaminação da Água Subterrânea por Nitrato no Parque Ecológico do Tietê – São Paulo, Brasil. Revista da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, n. 16, 2002. p.77-82.

VESTENA, L. R. Balanço hídrico da bacia do Rio Ribeirão da Onça, no município de Colombo - PR. 103f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

VESTENA, L. R.; KOBIYAMA, M.; SANTOS, L. J. C.; Considerações sobre Gestão Ambiental em Áreas Cársticas. Revista RA EGA.6. 2002. p. 81-93.

VESTENA, L. R.; KOBIYAMA, M. Water balance in karst: Case study of the Ribeirão da Onça Catchment in Colombo City, Paraná State - Brazil, Brazilian Archives of Biology and Technology an International Journal, Curitiba, v. 50, n.5:, 2007. p. 905-912.

VIAS, J.M. et al. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. University of Málaga, Espanha. 2006.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996. 243 p

WHITE, W. B. Conceptual models for limestone aquifers: Groundwater 7 (3), 1969. p. 15-21.

WHITE, W. B. Conceptual models for carbonate aquifers: revisited. In: Dilamarter, R. R. and Csallany, S. C. (Eds.): Hydrologic Problems in Karst Terrains. Western Kentucky University, Bowling Green, KY, 1977. p.176-187.

WHITE, W.B., Analysis of Karst Aquifers, In: Alley W.M. (Ed.) Regional Groundwater Quality. Van Nostrand-Reinhold, New York, 1993. p. 471-489.

WHITE, W. B. Karst Hydrology: recent developments and open questions. Engineering Geology 65, Elsevier, 2002. p. 85-105.

WILLIAMS, P. W. (Editor) Karst Terrains: Environmental changes and human impact. Cremlingen-Destedt: Catena-Verlag, 1993.

WILLIAMS & FORD. World map of carbonate rock outcrops v3.0. University of Auckland: New Zealand, 2008. Disponível em: <http://www.sges.auckland.ac.nz/sges_research/karst.shtm>. Acesso em: 31 mai. 2011.



LEWIN, S.; STEPHENS, C.; CAIRNCROSS, S. Reviewing the health impacts of improvements in water supply. Urban Health Newsletter, 1997. p. 34-47.

WORTHINGTON, S.R.H., DAVIES, G.J., QUINLAN, J.F. Geochemistry of springs in temperate carbonate aquifers: recharge type explains most of the variation. Proceedings 5th Conference on Limestone Hydrogeology and Fissured Media, Neuchatel, Switzerland, 1992. p.341-347.

