



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DOS FATORES CONDICIONANTES DA
FAVORABILIDADE HIDROGEOLÓGICA DO SISTEMA
AQUÍFERO CÁRSTICO-FISSURAL, REGIÃO DE MONTES
CLAROS, MG**

RAFAELA ASSUNÇÃO GURITA

MONOGRAFIA n° 380

Ouro Preto, novembro de 2020

**AVALIAÇÃO DOS FATORES CONDICIONANTES DA
FAVORABILIDADE HIDROGEOLÓGICA DO SISTEMA
AQUÍFERO CÁRSTICO-FISSURAL, REGIÃO DE MONTES
CLAROS, MG.**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. Hermani Mota de Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. MSc. Edison Tazava

MONOGRAFIA

Nº 380

**AVALIAÇÃO DOS FATORES CONDICIONANTES DA
FAVORABILIDADE HIDROGEOLÓGICA DO SISTEMA
AQUÍFERO CÁRSTICO-FISSURAL, REGIÃO DE MONTES
CLAROS, MG**

Rafaela Assunção Gurita

Orientadora

Prof. Dr^a. Maria Augusta G. Fujaco

Co-Orientadores

Prof. Dr. Paulo Henrique Galvão

Dra. Maria Antonieta Alcântara Mourão

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2019/2.

OURO PRETO

2020

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

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

Revisão geral:

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

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

G979a Gurita, Rafaela Assunção.

Avaliação dos fatores condicionantes da favorabilidade
hidrogeológica do sistema aquífero cárstico-fissural, região de Montes
Claros, MG. [manuscrito] / Rafaela Assunção Gurita. - 2020.
78 f.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Augusta Gonçalves Fujaco.

Coorientadores: Dra. Maria Antonieta Alcântara Mourão, Prof.
Dr.

Paulo Henrique Galvão.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Hidrogeologia. 2. Aquíferos. 3. Carste. 4. Recursos hídricos. I.
Fujaco, Maria Augusta Gonçalves. II. Galvão, Paulo Henrique. III. Mourão,
Maria Antonieta Alcântara. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V.
Título.

CDU 556.33

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

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Avaliação dos Fatores Condicionantes da Favorabilidade Hidrogeológica do Sistema Aquífero Cárstico-Fissural, Região de Montes Claros, MG.

AUTORA: RAFAELA ASSUNÇÃO GURITA

ORIENTADORA: Maria Augusta Gonçalves Fujaco

Aprovada em: 30 de novembro de 2020

BANCA EXAMINADORA:

Prof^ª. Dr^ª. Maria Augusta Gonçalves Fujaco



DEGEO/UFOP

Prof^ª. MSc. Estefânia Fernandes dos Santos



DEGEO/UFOP

Pesquisador MSc. Fernando Alves Carneiro



SBG/CPRM

Ouro Preto, 30/11/2020.

Agradecimentos

Agradeço à minha mãe, Daniela, por ser meu maior exemplo de caráter e superação, minha fonte de amor, ternura e, acima de tudo, por ter abdicado de seus sonhos para transformar os meus em realidade. Obrigada, mãe, por me ensinar os verdadeiros valores da vida.

À minha irmã, Risamara, que sempre me incentiva a ser uma pessoa melhor por meio de seus conselhos sábios e afetuosos. Ao meu padrasto, Sérgio, obrigada pelo apoio incondicional ao longo de todos esses anos.

A todos os professores que me ensinaram a ciência geológica, em especial Maria Eugênia, Tazava e Edgar. Ao meu orientador Paulo Galvão, por toda a disponibilidade em me orientar, pelas revisões, incentivo e sugestões dadas. À Maria Augusta, por toda ajuda prestada para o desenvolvimento deste trabalho.

À CPRM, funcionários e colegas de estágio, por todo material fornecido, sugestões e companhia. Ao CNPq, pelo auxílio financeiro durante todo o desenvolvimento do projeto de iniciação científica. À Golder pela confiança e oportunidade do estágio que contribuiu para o meu crescimento pessoal e profissional. Em especial à equipe de hidrogeologia, Fabi, Guilherme, Felipe e Mol, que me aconselham e me inspiram.

À geologia 15.1 e à todas as amigas que a cidade de Ouro Preto me deu, em especial Josi, Pâmela, Júlia, Ninja, Rafael, Giovanna, Nil, companheiros que me proporcionaram momentos únicos.

Por fim, agradeço ao Departamento de Geologia, à Escola de Minas, à Universidade Federal de Ouro Preto e à Fundação Gorceix, por terem me proporcionado um ensino público superior de qualidade durante toda a minha graduação.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ix
SUMÁRIO	xi
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xiii
LISTA DE TABELAS	xv
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 JUSTIFICATIVAS	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.4 LOCALIZAÇÃO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 O CICLO HIDROLÓGICO	5
2.2 BACIAS HIDROGRÁFICAS E HIDROGEOLOGICAS	5
2.3 A ÁGUA SUBTERRÂNEA	7
2.3.1 Conceitos básicos em hidrogeologia.....	7
2.3.2 Distribuição vertical da umidade no subsolo	7
2.3.3 Movimentação da água subterrânea.....	8
2.4 AQUÍFEROS	10
2.4.1 Conceitos básicos em hidrogeologia.....	10
2.4.2 Classificação dos aquíferos.....	10
2.5 HIDROGEOLOGIA DE MEIOS FRATURADOS	12
2.6 HIDROGEOLOGIA DE MEIOS CÁRSTICOS.....	14
2.6.1 O estudo do carste.....	14
2.6.2 O carste e o processo de carstificação.....	15
2.6.3 Recarga e Descarga do aquífero cárstico	16
2.6.4 Feições típicas e relevo	17
2.6.5 Produtividade e locação de poços em rochas carbonáticas.....	19
2.7 MÉTODOS AUXILIARES DE INVESTIGAÇÃO	22
2.7.1 Geoprocessamento	22
2.7.2 Geofísica	22
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	25
3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO	25
3.1.1 Grupo Bambuí	26
3.1.2 Grupo Areado	28
3.1.3 Coberturas Cenozoicas	29

3.2	ARCABOUÇO ESTRUTURAL.....	31
3.3	ASPECTOS FISIOGRAFICOS.....	31
3.3.1	Clima e precipitação	31
3.3.2	Hidrografia.....	32
3.3.3	Vegetação	33
3.3.4	Relevo e Topografia.....	33
3.3.5	Solos	34
3.3.6	Uso e ocupação do solo	36
3.4	CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA LOCAL	37
3.4.1	Domínio Granular	38
3.4.2	Domínio Cárstico-Fissural	39
3.4.3	Domínio Cárstico.....	40
3.4.4	Análise de Produtividade Local.....	41
3.5	GESTÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	43
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
4.1	LEVANTAMENTO DE DADOS	45
4.2	SENSORIAMENTO REMOTO – SIG.....	46
4.2.1	Mapa de lineamentos	47
4.2.2	Mapa de feições cársticas	48
4.2.3	Mapa de recarga.....	48
4.2.4	Mapa de favorabilidade hidrogeológica	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1	MAPA DE LINEAMENTOS	53
5.2	MAPA DE DECLIVIDADE.....	55
5.3	MAPA DE FEIÇÕES CÁRSTICAS.....	57
5.4	MAPA DE RECARGA.....	58
5.5	MAPA DE FAVORABILIDADE HIDROGEOLÓGICA.....	60
6	CONCLUSÃO.....	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
	ANEXOS.....	73

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Localização da área de estudo. Fonte: IGAM (2012).....	4
Figura 2.1 - Representação esquemática dos processos do ciclo hidrológico. Fonte: Bear & Verruijt 1987 <i>in</i> Feitosa <i>et al.</i> (2008).	5
Figura 2.2 - Exemplo de assimetria entre bacias subterrâneas e superficiais. Fonte: Arraes & Campos (2007).	6
Figura 2.3 - Representação esquemática da distribuição vertical da água no solo e subsolo, mostrando as diversas zonas de umidade. Fonte: Feitosa <i>et al.</i> (2008).	8
Figura 2.4 - Carga Hidráulica h , carga de pressão ψ e carga de elevação z para o ponto P (Freeze e Cherry 1979).	8
Figura 2.5 - Área de recarga e fluxo local e regional (modificado de Cleary 1989).	9
Figura 2.6 - Tipos de aquífero em relação a porosidade do meio, com destaque, em vermelho, para os aquíferos cársticos (modificado de Teixeira <i>et al.</i> 2003).	11
Figura 2.7 - Representação esquemática dos diferentes tipos de aquífero, de acordo com o sistema de pressão de suas águas e com a natureza das camadas que os delimitam. Fonte: Feitosa <i>et al.</i> (2008).	12
Figura 2.8 - Elementos do aquífero fissural que condicionam a permeabilidade e a porosidade do meio. Fonte: Costa (2008).	13
Figura 2.9 - Mapa de Potencialidade de Cavernas no Brasil, na escala 1:2.500.000 (Revista Brasileira de Espeleologia – RBEsp, ICMBio 2012).	15
Figura 2.10 - Ilustração esquemática de um aquífero cárstico e as dualidades de recarga, infiltração (difusa e pontual), porosidade e fluxo (matriz e condutos) (modificado de Goldscheider e Drew 2007)...	17
Figura 2.11 - Modelo esquemático (planimétrico) da evolução de dolinas para uma uvala ou depressão composta. Baseado em White (1988) adaptado de Piló (1998).....	18
Figura 2.12 - Modelo esquemático (planimétrico) da evolução de um sistema fluvial para um relevo de depressões compostas (uvalas). Baseado em White (1988) adaptado de Piló 1998.....	18
Figura 2.13 - Sistema cárstico detalhado por meio de diagrama ilustrativo. Fonte: Karmann (2000).	19
Figura 3.1 - a) Mapa simplificado do cráton São Francisco com a localização das cinco folhas geológicas onde localiza-se a área de estudo. Adaptado de Alkmim & Martins-Neto (2001) e Reis <i>et al.</i> (2017).	25
Figura 3.2 - Coluna estratigráfica do Grupo Bambuí. Modificado de Vieira <i>et al.</i> 2007.....	26
Figura 3.3 - Mapa geológico das cinco Folhas Geológicas da bacia hidrogeológica do rio Vieira, com indicação da localização das feições cársticas, como dolinas e sumidouros (Fonte: CECAV, CPRM).	30

Figura 3.4 - Mapas de elevação (a) e padrões de relevo (b), encontrados na área da bacia hidrogeológica do rio Vieira. Fonte: CPRM (2019) e Alos Palsar.	34
Figura 3.5 - Mapa de distribuição dos principais tipos de solos encontrados na Bacia hidrogeológica do rio Vieira (a); classificação hidrológica dos solos (b). Fonte: CPRM (2019).	35
Figura 3.6 - Mapa de uso e ocupação do solo. Fonte: PANM (2019).	37
Figura 3.7 - Mapa de domínios hidrogeológicos (a) e sistemas aquíferos (b) da bacia hidrogeológica do rio Vieira. Fonte: Projeto Águas do Norte de Minas Gerais (2019).	38
Figura 3.8 - Mapa de produtividade aquífera dos domínios hidrogeológicos na área da bacia hidrogeológica do rio Vieira. Fonte: Projeto Águas do Norte de Minas Gerais (2019).	42
Figura 3.9 - Distribuição dos poços, públicos e privados e cadastrados na área de estudo.	43
Figura 3.10 - Zoneamento da exploração do aquífero Bambuí na área piloto da Bacia do Rio do Vieira. Fonte: ANA (2018).	44
Figura 4.1 - Fluxograma exibindo a metodologia do trabalho.	45
Figura 4.2 - Critérios utilizados na metodologia APLIS para elaboração do mapa de recarga.	50
Figura 5.1 - Mapas de densidade gerados a partir dos três tipos de lineamentos da bacia hidrogeológica do rio Vieira.	54
Figura 5.2 - Mapa de declividade da bacia hidrogeológica do rio Vieira, gerado a partir do modelo digital de elevação (MDE) da região.	56
Figura 5.3 - Mapa de densidade de feições cársticas da bacia hidrogeológica do rio Vieira, evidenciando as principais zonas de recarga ou descarga dos aquíferos.	57
Figura 5.4 - Mapa de recarga da bacia de estudo elaborado com base na metodologia APLIS.	59
Figura 5.5 - Mapa de favorabilidade hidrogeológica para os aquíferos encontrados na bacia hidrogeológica do rio Vieira.	62
Figura 5.6 - Gráfico de dispersão e matriz dos valores de capacidade específica e transmissividade pela favorabilidade hidrogeológica.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Definição de classes de produtividade de aquíferos a partir de dados de capacidade específica, condutividade e transmissividade, segundo Diniz <i>et al.</i> (2014).....	20
Tabela 2.2 - Ação dos fatores controladores do fluxo de água subterrânea e suas limitações (modificado de Fernandes 2008).	21
Tabela 2.3 - Procedimentos para a identificação de situações mais favoráveis para a locação de poços e definição de caminhos preferenciais de circulação de água subterrânea.	22
Tabela 3.1 - Grupo hidrológico dos solos, com porcentagem de área ocupada dentro da Bacia e suas respectivas características. Modificado de PANM (2019).....	35
Tabela 3.2 - Classes de uso e cobertura do solo.....	36
Tabela 3.3 - Domínios hidrogeológicos e Sistemas Aquíferos com as respectivas classes de produtividade da bacia hidrogeológica do rio Vieira. Fonte: PANM (2019).....	42
Tabela 3.4 - Correlação entre o saldo hídrico e o número de poços distribuídos na bacia hidrográfica do rio Vieira, sem considerar os prováveis poços clandestinos (sem outorga).....	44
Tabela 4.1 - Distribuição dos pesos para elaboração do mapa de recarga.	49
Tabela 5.1 - Classificação do relevo (Ramalho-Filho & Beek (1995).	55
Tabela 5.2 - Resultado estatístico dos valores de capacidade específica e transmissividade, segundo a classificação de Diniz <i>et al.</i> (2014).	61

RESUMO

As pesquisas hidrogeológicas em ambientes cársticos são, cada vez mais, necessárias, principalmente em cidades que dependem da exploração de água subterrânea para abastecimento público. Contudo, em função da alta anisotropia e heterogeneidade deste sistema, é essencial que se desenvolvam estudos específicos em escala local, a fim de se compreender o comportamento hidrogeológico. Este trabalho foi desenvolvido na bacia hidrogeológica do rio Vieira, localizada em um contexto de domínio hidrogeológico cárstico. Na área, questões relacionadas à ineficiência da gestão dos recursos hídricos, aliadas ao clima semiárido e à falta de estudos para um melhor entendimento do aquífero local, agravam os problemas do abastecimento de água, principalmente durante o período de estiagem. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um método de mapeamento de favorabilidade hidrogeológica baseado em dados geológicos em superfície e em subsuperfície; dados de testes de bombeamento de poços tubulares profundos (capacidade específica, Q/s , e transmissividade, T); geofísica; e uso de sensoriamento remoto para elaboração de mapas temáticos. Os resultados indicaram que a produtividade dos poços na bacia hidrogeológica do rio Vieira pode ser correlacionada com quatro fatores, considerados os mais importantes na investigação de favorabilidade hidrogeológica do aquífero cárstico: 1) maior densidade de lineamentos (morfoestruturais e geofísicos) e feições cársticas, principalmente aqueles de direção NE-SW e NNE-SSW; 2) condições de produtividade representadas pelos sistemas aquíferos locais; 3) zonas menos inclinadas e próximas a drenagens; 4) taxa de recarga. A distribuição espacial de poços com variadas produtividades ao longo de toda área revela o quanto o aquífero cárstico é anisotrópico e heterogêneo, evidenciando a necessidade de pesquisas mais detalhadas para se estimar a favorabilidade hidrogeológica em escala adequada. A metodologia adotada foi validada com base na calibração dos pesos dos mapas com os valores de transmissividade e capacidade específica dos poços, e mostrou-se uma ferramenta eficaz em sua finalidade de indicar zonas com maior favorabilidade hidrogeológica, sendo possível aplicá-la em outras regiões com contexto hidrogeológico semelhante.

Palavras-chave: favorabilidade hidrogeológica, aquífero cárstico, bacia hidrogeológica, Montes Claros, método APLIS.

ABSTRACT

Hydrogeological research in karst environments are increasingly necessary, especially in cities that depend on the exploitation of groundwater for public supply. However, due to the high anisotropy and heterogeneity of this system, it is essential that specific studies be developed on a local scale to understand the hydrogeological behavior. This work was developed in the Vieira hydrogeological basin, located in a karst-fissural context, where water use comes mainly from the underground environment. In the area, issues related to inefficiency in water resource management, combined with the semi-arid climate and the complexity of the local aquifer, aggravate water supply problems, especially during the drought period. In this context, the objective of this work was to develop a hydrogeological favorability mapping method based on geological data of surface and underground; pumping test data (specific flow, Q/s , and transmissivity, T); geophysics; and remote sensing analysis to prepare thematic maps. The results indicated that the productivity of the wells in the Vieira River hydrogeological basin can be correlated with four factors, considered the most important in the investigation of hydrogeological favorability of the karst aquifer: 1) higher density of lineaments (morphostructural and geophysical) and karst features, mainly those of NE-SW and NNE-SSW direction; 2) productivity conditions represented by local aquifer systems; 3) less inclined areas and close to drains; 4) recharge rate. The spatial distribution of wells with varied productivity throughout the entire area reveals how anisotropic and heterogeneous the karst aquifer is, evidencing the need for more detailed research to estimate hydrogeological favorability on an appropriate scale. The adopted methodology was validated based on the calibration of the weights of the maps with the values of transmissivity and specific capacity of the wells, and proved to be an effective tool in its purpose of indicating zones with greater hydrogeological favorability, being possible to apply it in other regions with similar hydrogeological context.

Key words: hydrogeological favorability, karstic aquifer, hydrogeological basin, Montes Claros, APLIS method.

1.1 APRESENTAÇÃO

A água é um dos recursos naturais mais importantes do meio ambiente, possuindo um enorme valor econômico e social, além de ser fundamental à sobrevivência do homem e dos ecossistemas (FAGAR 2011). Apesar disso, a crescente taxa de industrialização, urbanização, agropecuária e setor mineral demandam, cada vez mais, recursos hídricos, o que pode alterar a qualidade e quantidade deste bem (ANA 2009; Afonso 2015).

A água subterrânea é uma alternativa à água superficial, sendo utilizada cada vez mais em indústrias, abastecimento público e irrigação, já que a água proveniente dos aquíferos apresenta diversas vantagens caso comparada à do manancial superficial, tais como: obras de captação de custo relativamente baixo; inexistência de perdas por evaporação; e, geralmente, dispensar tratamento químico devido à quase ausência de agentes poluidores em ambiente subterrâneo (ANA 2010).

Em todo o globo, a distribuição das águas subterrâneas ocorre em condições bastante variáveis, uma vez que depende de fatores como o clima e o ciclo hidrológico. Estimativas sugerem que as reservas subterrâneas totalizam o maior volume de água doce líquida na Terra, com cerca de 10,3 milhões de km³, 100 vezes mais que o total concentrado em rios e lagos (Feitosa *et al.* 2008). Contudo, esse recurso, nem sempre acessível, exige estudos hidrogeológicos específicos para que se possa compreender as condições do meio em que a água é armazenada e transmitida (Ford & Williams 2007).

O aquífero cárstico, principal foco deste estudo, desenvolve-se com base no processo de carstificação, onde a água da chuva, ao percolar pelas descontinuidades das rochas solúveis, dissolve os minerais a partir de princípios químicos e/ou mecânicos. Como consequência, são geradas redes irregulares de condutos e cavidades no subsolo, que podem armazenar e transmitir grande quantidade de água (Ford & Williams *op. cit.*).

A imprevisibilidade no padrão de dissolução, entretanto, pode proporcionar elevados fluxos de água subterrânea, permitindo que o aquífero seja altamente anisotrópico e heterogêneo, além de torná-lo vulnerável à contaminação (Goldscheider & Drew 2007). Esses fatores, associados a uma ineficiente gestão dos recursos hídricos e a urbanização não planejada, corroboram para o surgimento de graves problemas ambientais, como superexploração da água e rebaixamento do nível freático. Nesse sentido, podem ocorrer secas de condutos, desaparecimento de nascentes próximas e subsidências de solos em zonas urbanas (Hobbs & Gunn 1998, Vestena *et al.* 2002, Feitosa *op. cit.*, Galvão 2015).

A área de estudo, delimitada em estudos anteriores pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil, foi denominada de bacia hidrogeológica do rio Vieira e localiza-se na região do município de Montes Claros,

norte do estado de Minas Gerais. A região vem apresentando graves questões quanto ao abastecimento de água, principalmente durante a estiagem. ANA (2018) atribuiu esse cenário ao crônico déficit hídrico gerado pelas práticas da agricultura irrigada, ainda na década de 1980, e ao regime hidrológico do semiárido brasileiro, onde são registrados irregulares e prolongados períodos de seca. Assim, o esgotamento progressivo dos recursos hídricos aumentou não só os índices de desatendimentos às regras de uso do recurso hídrico, mas também os conflitos entre usuários locais (ANA *op. cit.*).

No que tange o desenvolvimento econômico e urbano da área de estudo, a cidade de Montes Claros expandiu-se de forma acelerada e não planejada ainda na década de 1960, quando o município foi inserido na área de atuação da SUDENE (Borges 2007). Atualmente, a cidade apresenta cerca de 409.341 habitantes e possui uma rede de abastecimento composta, em boa parte, por poços subterrâneos, os quais exploram água, majoritariamente, do Aquífero Cárstico Lagoa do Jacaré, na bacia do rio Vieira (IBGE 2019).

Dito isto, este trabalho foi desenvolvido com o propósito de entender os principais aspectos hidrogeológicos da região e as correlações com os parâmetros do meio físico. Assim, espera-se estimar os locais mais favoráveis para perfuração de poços de bombeamento e garantindo que essas porções sejam corretamente gerenciadas, evitando, assim, concentrações de instrumentos de altas vazões que possam causar cenários de superexploração do aquífero, agravando o déficit hídrico local.

1.2 JUSTIFICATIVAS

Na bacia hidrogeológica do rio Vieira, a partir da década de 1980, ocorreu um esgotamento progressivo dos recursos hídricos superficiais, em função do crescente desenvolvimento urbano não planejado, associado à baixa disponibilidade hídrica de rios, clima semiárido e a complexidade dos sistemas aquíferos locais. Em consequente, foi observado um aumento expressivo do uso da água subterrânea como alternativa de abastecimento, especialmente em períodos de estiagem prolongada. Contudo, grande parte dos instrumentos usados para captação de água não é registrada, em decorrência da ineficiência de fiscalização de outorgas por parte dos órgãos responsáveis (ANA 2018).

As consequências foram observadas a partir de 2013, quando importantes trechos de drenagens secaram, o que teria afetado diversos ramos da economia. Tal acontecimento foi responsável, por estimular, ainda mais, o não cumprimento dos requisitos legais de uso e aumentar o número de conflitos entre usuários, sendo estes registrados desde a década de 1980 (ANA 2009).

Salienta-se, ainda, que a região situa-se em um domínio hidrogeológico cárstico, onde existem complexidades inerentes ao solo que se refletem no ciclo da água. Embora isso ocorra em muitos locais do Brasil e do mundo, a área ainda apresenta lacunas no conhecimento quanto à caracterização dos sistemas aquíferos em domínios hidrogeológicos cárstico e cárstico-fissural em escala apropriada, o que impossibilita uma definição adequada dos locais mais favoráveis para perfuração de poços de bombeamento.

Dessa forma, com base na justificativa de que a bacia merece atenção especial em relação ao avanço do conhecimento da dinâmica e potencial hídrico das reservas subterrâneas exploráveis, demanda-se a realização de pesquisas específicas com vistas a identificar bons aquíferos na região, sem que haja perfurações de elevado custo.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste Trabalho de Conclusão de Curso foi aplicar uma metodologia de mapeamento da favorabilidade hidrogeológica para o sistema aquífero da bacia hidrogeológica do rio Vieira, utilizando-se análises paramétricas dos parâmetros considerados mais relevantes para o potencial hídrico subterrâneo, sendo eles: lineamentos (radiométrico, magnetométrico e morfoestrutural); características das unidades aquíferas; declividade; e feições cársticas.

Como objetivo específico, espera-se, a partir do agrupamento desses critérios, revelar que é possível gerar bons resultados a partir de informações disponíveis na literatura, em órgãos públicos ou de livre acesso na internet, desde que os mesmos estejam em bancos de dados organizados e consistentes.

1.4 LOCALIZAÇÃO

A bacia hidrogeológica localiza-se na mesorregião norte de Minas Gerais (PANM 2019) com, aproximadamente, 4.559 km² (Figura 1.1). É limitada pelos paralelos 16°10' e 17°10' de latitude Sul e meridianos 44°30' e 43°43' de longitude Oeste. A área é capaz de incluir, mesmo que parte do território, os municípios de Montes Claros, Claro dos Poções, Mirabela, Brasília de Minas, Coração de Jesus e São João da Lagoa.

A rede hidrográfica está inserida na bacia do rio São Francisco e contempla duas Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH): SF6 (Rio Verde Grande) e SF10 (Rios Jequitaí e Pacuí). Os principais mananciais superficiais da UPGRH SF6 são os rios Verde Grande e Vieira, enquanto a UPGRH SF10 abrange os rios Pacuí, Riachão e São Lamberto (IGAM 2010).

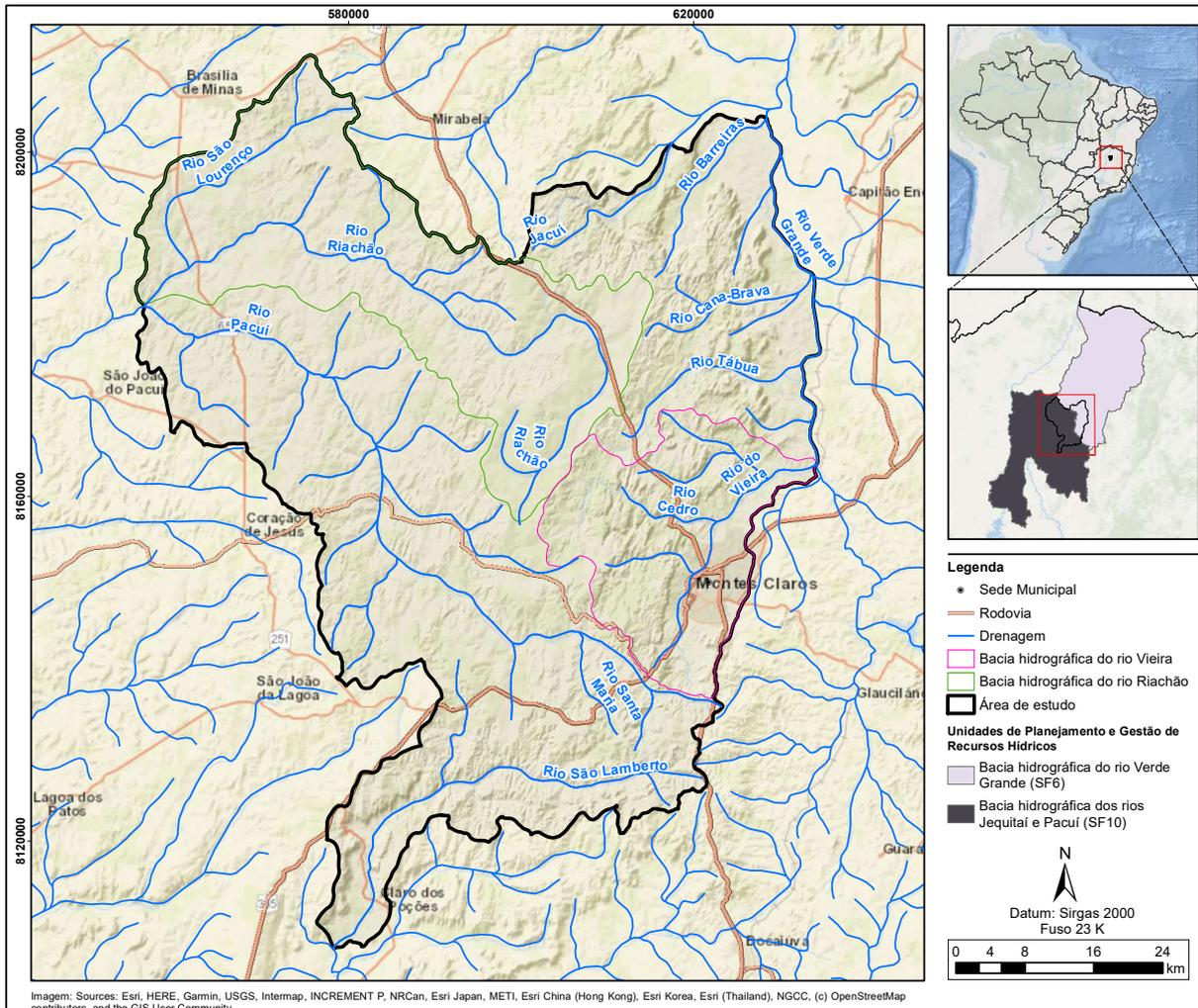


Figura 1.1 - Localização da área de estudo. Fonte: IGAM (2012).

2.1 O CICLO HIDROLÓGICO

A água pode ser encontrada na superfície terrestre, seja na atmosfera, litosfera, biosfera ou hidrosfera, onde, impulsionada por processos físico-químicos, movimentos e trocas de massas, pode variar entre seus diferentes estados físicos (líquido, sólido e vapor). O principal fenômeno associado a esses processos é o ciclo hidrológico, um sistema global, fechado e contínuo de circulação de água que tem como impulso a energia do Sol, associada à gravidade e à rotação da Terra, numa dinâmica que envolve as águas dos mares, atmosfera, vegetação, tipo de solo, etc. (Heath 1982; Tucci 2001).

O ciclo hidrológico permite que as águas do oceano circulem para a atmosfera, da atmosfera para os continentes, e daí novamente para os oceanos, seja por escoamento superficial ou subterrâneo, sem que haja começo e fim determinados (Figura 2.1). Os principais processos envolvidos nesse sistema são: evaporação, precipitação, interceptação, infiltração (ou recarga) de cursos d'água, escoamento subterrâneo, escoamento superficial e transpiração (Tucci *op. cit.*; Arraes 2007).

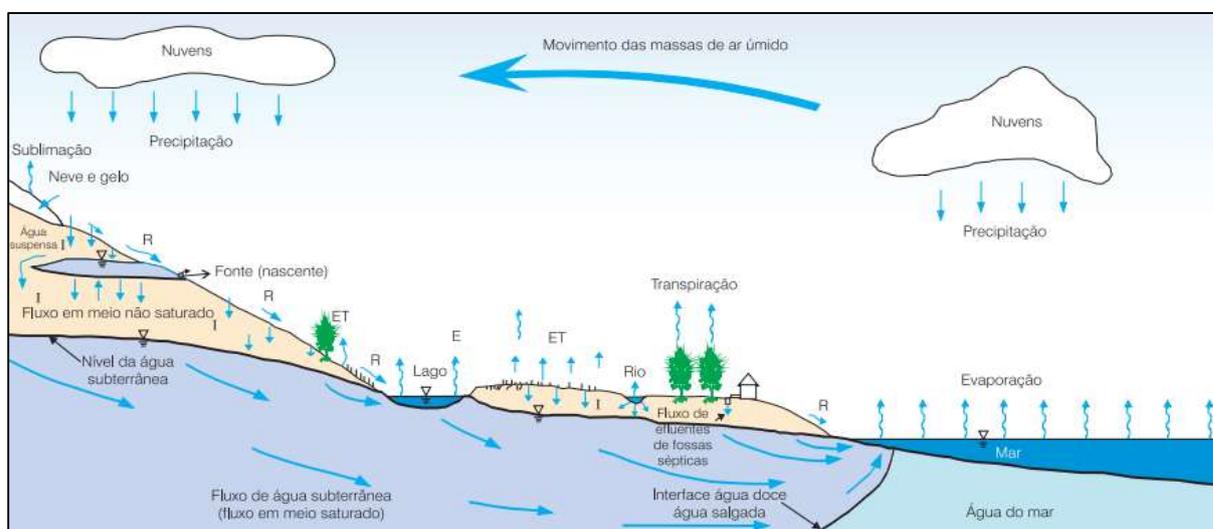


Figura 2.1 - Representação esquemática dos processos do ciclo hidrológico. Fonte: Bear & Verruijt 1987 in Feitosa *et al.* (2008).

2.2 BACIAS HIDROGRÁFICAS E HIDROGEOLÓGICAS

O Brasil, mesmo com farta disponibilidade hídrica, apresenta problemas no acesso a este recurso e, em determinadas áreas, registra-se diminuição das reservas de água potável. Somam-se a isto a poluição e o desperdício das águas, ausência e/ou precariedade do saneamento básico (ANA 2015). Nesse sentido,

percebe-se a necessidade de haver uma gestão integrada e pesquisas específicas entre os principais tipos de mananciais de água, superficial e subterrâneo (Botelho 1999).

Em estudos de fluxos superficiais, a principal unidade de investigação é a bacia hidrográfica, onde os critérios para sua delimitação já são bem definidos e fundamentados. Conceitualmente, uma bacia hidrográfica é uma área geográfica delimitada por interflúvios, onde o volume de água proveniente da chuva é captado e drenado por um fluxo principal que converge para o exutório (Tucci 2001). Dessa forma, os limites são estabelecidos no próprio escoamento da água na superfície, ou seja, pela rede de drenagem governada pela topografia (Arraes 2007).

Em diversos estudos, é comum que se utilize modelos digitais capazes de automatizar o processo de delimitação da bacia e o sentido do escoamento superficial (Rennó & Soares 2001). Geralmente, uma bacia hidrográfica é utilizada como unidade base, pois apresenta características que governam todo o fluxo de água superficial em seu interior (Pissarra *et al.* 2004).

Com relação ao contexto subterrâneo, a unidade principal é a bacia hidrogeológica que, ao contrário da anterior, apresenta literatura muito restrita e, de certa forma, deficiente (ANA *op. cit.*). Uma bacia hidrogeológica pode ser definida com base nos caminhos que a água subsuperficial segue através do aquífero, desde as zonas de recarga até as áreas de descarga (Tiedman *et al.* 1998).

Em alguns casos, uma bacia hidrogeológica pode coincidir com uma ou mais bacias hidrográficas superficiais, assim como uma bacia hidrográfica pode abrigar, em subsuperfície, uma ou mais bacias hidrogeológicas (CNRH 2001). Nesse sentido, os limites de uma bacia hidrogeológica vão além dos limites físicos, tipos de litologias e suas estruturas, bem como os fatores geomorfológicos, determinando uma assimetria entre as fronteiras das bacias subterrâneas e as superficiais (Figura 2.2).

Identificar e entender o comportamento entre essas bacias representa um importante subsídio para direcionar estudos e auxiliar na tomada de decisão com relação à gestão integrada dos recursos hídricos. Além disso, em função da crescente necessidade do uso racional da água subterrânea e de várias outras questões, inclusive de âmbito político, torna-se cada vez mais importante aperfeiçoar o conhecimento acerca das bacias hidrogeológicas (Arraes *op. cit.*).

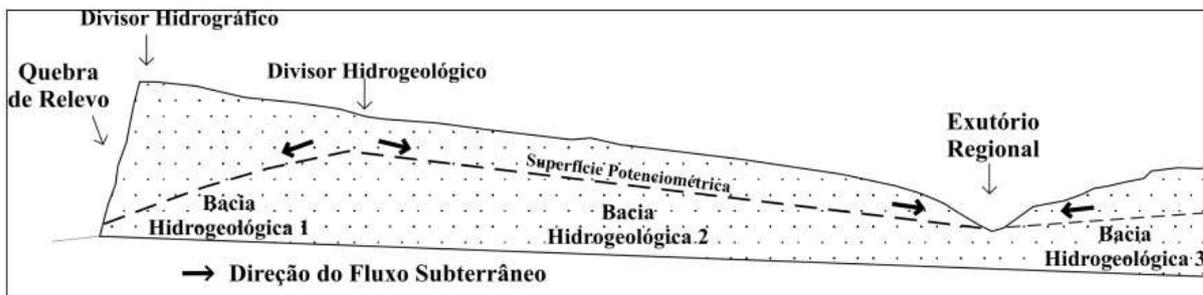


Figura 2.2 - Exemplo de assimetria entre bacias subterrâneas e superficiais, onde uma única bacia hidrográfica apresenta pelo menos três bacias hidrogeológicas em profundidade. Fonte: Arraes & Campos (2007).

2.3 A ÁGUA SUBTERRÂNEA

A água subterrânea é um recurso natural que recarrega e permeia uma unidade aquífera devido à ação de forças gravitacionais, as quais permitem que as águas superficiais penetrem nos poros das formações geológicas e sejam armazenadas abaixo do nível freático ou do nível de saturação (Pinto *et al.* 1976). Dessa forma, é imprescindível que se compreenda suas interações com as águas superficiais em bacias hidrográficas e hidrogeológicas (Feitosa *et al.* 2008).

2.3.1 Conceitos básicos em hidrogeologia

A porosidade total de um solo ou rocha (η), ou porosidade volumétrica, pode ser definida como a razão entre o volume de vazios (V_V) pelo volume total (V_T), sendo expressa em porcentagem. A porosidade efetiva de rochas saturadas (η_e) corresponde ao volume de água subterrânea drenada em função da força da gravidade por unidade de volume do material. Nesse sentido, esse parâmetro considera apenas a retenção de água na superfície dos grãos em uma área onde os poros estejam interconectados (Heath 1982; Feitosa *et al.* 2008).

Os espaços vazios em um solo ou rocha podem ser intrínsecos à matriz, ou seja, de origem primária, ou podem ser secundários, gerados por processos posteriores a formação do solo ou rocha, como fraturas e dissolução (Feitosa *op. cit.*). Por outro lado, alguns autores, como Freeze & Cherry (1979), Ford & Williams (2007) e Goldscheider & Drew (2007), defendem como porosidade terciária os espaços formados em função da ação de dissolução.

A permeabilidade intrínseca (k) está ligada à interconectividade dos espaços vazios (porosidade), ou seja, é um parâmetro que indica a habilidade do meio em transmitir um fluido, que depende de características como diâmetro, esfericidade, interconectividade dos grãos, por exemplo. Pode ser classificada em permeabilidade primária, secundária e terciária (Karmann *et al.* 2000).

2.3.2 Distribuição vertical da umidade no subsolo

Abaixo da superfície do terreno, a água superficial penetra nos poros do solo e formações geológicas, podendo ser dividida ao longo da vertical, basicamente, em duas zonas horizontais: saturada e não saturada (Pinto *et al.* 1976; Feitosa *et al.* 2008). A zona saturada, ou freática, é aquela onde todos os vazios encontram-se preenchidos por água, estando posicionada logo abaixo da superfície freática (Borguetti 2005). Por convenção, a superfície freática ou piezométrica, é a região onde somente a pressão atmosférica age sobre a água (Freeze & Cherry 1979).

A zona de aeração, não saturada ou vadosa, localiza-se acima da superfície freática, onde os poros estão parcialmente preenchidos por gases (ar, vapor d'água) e água. Essa zona pode, ainda, ser dividida em: franja capilar; zona intermediária e zona de água do solo (Pinto *op. cit.*; Feitosa *op. cit.*; Figura 2.3).

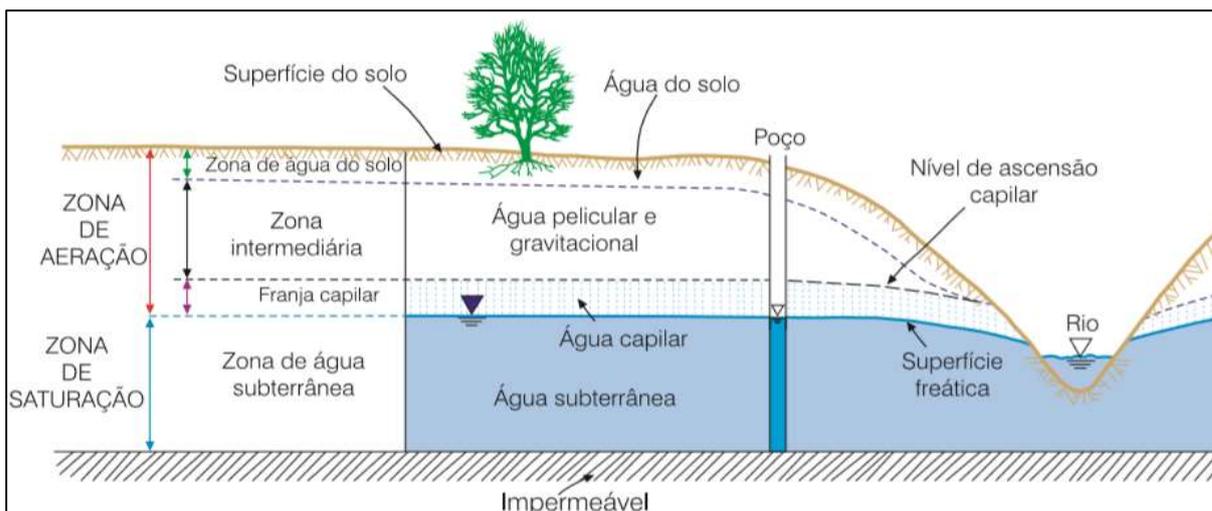


Figura 2.3 - Representação esquemática da distribuição vertical da água no solo e subsolo, mostrando as diversas zonas de umidade. Fonte: Feitosa *et al.* (2008).

2.3.3 Movimentação da água subterrânea

O fluxo de água em meios subterrâneos ocorre com base no gradiente de potencial, um parâmetro que varia em função da energia mecânica por unidade de massa de fluido, ou seja, o gradiente depende da posição espacial, pressão do fluido e energia cinética. Porém, como a velocidade do fluxo de água subterrânea é muito baixa na maior parte dos casos, considerado horizontal, os efeitos da energia cinética tornam-se desprezíveis. Nesse sentido, Freeze & Cherry (1979) definiram, matematicamente, que o potencial hidráulico (ϕ), ou energia mecânica por unidade de massa, pode ser descrito em função da elevação (z) e pressão do fluido (p), considerando constantes a aceleração da gravidade (g) e a densidade da água, como mostra a Equação 1, abaixo:

Equação 1

$$\phi = gz + \frac{\Delta p}{\rho}$$

Uma vez que a carga hidráulica (h) corresponde ao somatório da altura da lâmina d'água acima do ponto P (ψ) com a elevação (z), de acordo com a Figura 2.4, conclui-se que o potencial hidráulico é um fator que depende apenas dessa variável h , e que a água subterrânea sempre se movimenta de uma carga hidráulica de maior valor para outra de menor valor.

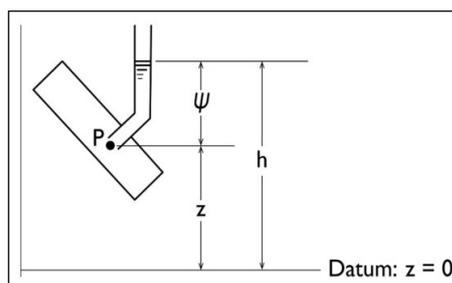


Figura 2.4 - Carga Hidráulica h , carga de pressão ψ e carga de elevação z para o ponto P (Freeze e Cherry 1979).

Em uma região com informações suficientes de nível d'água, é possível desenhar redes de fluxo a partir de isolinhas equipotenciais e linhas de fluxo. As isolinhas equipotenciais são linhas nas quais a água possui o mesmo valor de energia, ou seja, o mesmo valor de carga hidráulica (h) em aquíferos porosos. As linhas de fluxo, por sua vez, representam caminhos por onde a água flui e são, por definição, perpendiculares às equipotenciais em aquíferos isotrópicos (Feitosa *et al.* 2008).

A representação dessas linhas em mapa é denominada superfície potenciométrica e pode ser feita a partir de modelos tridimensionais ou bidimensionais, onde a água flui sempre da maior equipotencial para outra de menor valor (Cleary 1989). Para aquíferos livres, a superfície potenciométrica é o próprio contorno físico do lençol freático. Em aquíferos confinados, contudo, são superfícies imaginárias.

Nos ambientes cársticos, devido à heterogeneidade e anisotropia, elaborar um mapa de superfície potenciométrica é, geralmente, difícil, exceto em casos em que há muitos poços ou piezômetros. (Goldscheider e Drew 2007). Nesse sentido, a partir de uma superfície potenciométrica de um aquífero, é possível indicar condições hidrogeológicas locais, como zonas de recarga, descarga, áreas com maior e menor transmissividade, comportamento do rio em relação ao aquífero, dentre outros (Lucena *et al.* 2004; Feitosa *op.cit.*).

As análises da movimentação de água subterrânea em um aquífero, podem ser feitas em escala local e regional. No que tange a escala local, são consideradas as propriedades das rochas e os parâmetros hidráulicos locais do terreno e o tempo de permanência da água, o qual pode variar de meses a décadas. Na escala regional, são abordados todos os parâmetros geológicos gerais da área, desconsiderando pequenas variações e o tempo de residência alcança milênios (Tóth 1963, Cleary *op.cit.*; Figura 2.5).

No caso específico do aquífero cárstico, o fluxo regional pode ser determinado com base na direção do gradiente hidráulico, enquanto a direção do fluxo local possa variar bastante em função da direção das fraturas e condutos. A velocidade da água é outra propriedade que pode variar bruscamente, de turbulento nos condutos a laminar entre os poros e pequenas fraturas (Ford e Williams 2007).

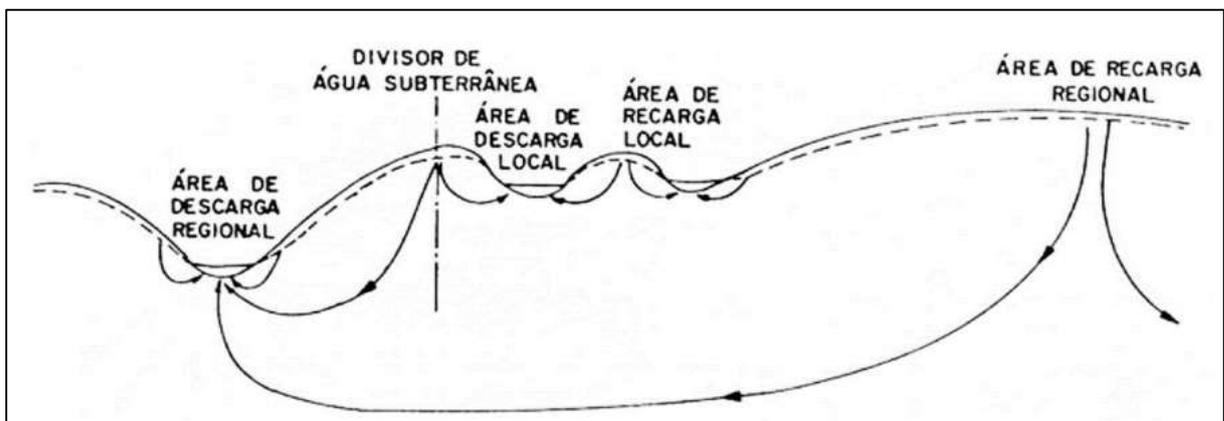


Figura 2.5 - Área de recarga e fluxo local e regional (modificado de Cleary 1989).

2.4 AQUÍFEROS

Aquífero é uma formação geológica capaz de armazenar água em seu interior e, sendo um meio poroso e permeável, permite que ocorra movimento das águas subterrâneas em quantidades significativas de forma natural, propiciando exploração econômica (Freeze & Cherry 1979, Tucci 2001, Feitosa *et al.* 2008). De maneira geral, os aquíferos podem ser classificados quanto ao tipo de porosidade associada.

Um aquífero, a depender das propriedades físicas das camadas geológicas, como porosidade e permeabilidade, podem, ainda, ser classificados em aquífugos, aquícludes e aquíquardos. Um aquífugo é a formação absolutamente impermeável, incapaz de armazenar e transmitir água. Ainda que um aquíclude possa armazenar água em quantidades significativas, a unidade não é capaz de transmiti-la naturalmente a outros meios em razão da baixa permeabilidade do meio, como ocorre em estruturas formadas por argilas e pelitos. O aquíquardo, por sua vez, é formado por uma camada litológica de baixa permeabilidade, podendo armazenar grandes volumes de água, embora transmita-a em uma taxa muito menor em relação ao aquífero (Freeze & Cherry *op. cit.*; Feitosa *op. cit.*).

2.4.1 Conceitos básicos em hidrogeologia

A condutividade hidráulica (K) é resultado das características do meio poroso e do fluido, e indica a facilidade do meio em permitir que a água seja transportada. A transmissividade (T) refere-se ao volume de água transmitida horizontalmente através de uma espessura saturada do aquífero (b). Depende, portanto, das características do fluido, tipo e espessura do meio. Em um aquífero confinado, T pode ser obtida por meio da multiplicação condutividade hidráulica (K) por b (Feitosa *et al.* 2008).

O armazenamento de uma unidade aquífera (S) indica a relação entre as alterações da quantidade de água armazenada no aquífero a partir da variação da carga hidráulica (Bear 1972). O armazenamento específico (S_s) é o volume de água drenado por volume unitário do aquífero. Em aquíferos livres, S é igual, ou próximo, ao valor da porosidade efetiva (η_e), enquanto em aquíferos confinados, S é obtido a partir de duas situações: rearranjo e compactação do aquífero e expansão da água devido ao alívio de pressão (Feitosa *op. cit.*).

Em aquíferos cársticos, um armazenamento significativo pode ocorrer na matriz ou em partes do sistema que sejam mais permeáveis e porosas, como no epicarste, uma região relativamente próxima da superfície, onde há intensa ação do intemperismo (Goldscheider & Drew 2007).

2.4.2 Classificação dos aquíferos

De maneira geral, existem duas principais classificações dos tipos de aquíferos, sendo uma que considera o tipo da porosidade do meio geológico e outra que avalia a pressão e capacidade de transmissão das águas nas superfícies limítrofes.

2.4.2.1 Classificação quanto a porosidade

Um aquífero pode ser classificado como granular, fissural e cárstico, a depender do tipo de porosidade em questão (Figura 2.6). Um aquífero granular, ou poroso, é formado por unidades sedimentares e/ou sedimentos inconsolidados, os quais apresentam vazios entre os grãos que permitem a circulação de água (Karmann *et al.* 2000). Nesses meios, a permeabilidade, geralmente, é elevada, podendo ser classificada como primária, assim como a porosidade (Fetter 1994).

Os aquíferos fraturados, ou fissurais, são constituídos por rochas ígneas ou metamórficas, onde há poucos espaços vazios entre os minerais e a circulação de água ocorre através de discontinuidades do maciço, como fraturas e fissuras. Nesses ambientes, assim como a permeabilidade, a porosidade também é secundária (Feitosa *et al.* 2008).

Os aquíferos cársticos, por sua vez, são compostos por rochas solúveis, como calcários, mármore e dolomitos, e os principais meios de circulação de água ocorre através de fraturas e condutos de dissolução. A permeabilidade e porosidade, portanto, são caracterizadas do tipo secundária e terciária, respectivamente (Ford & Williams 2007).

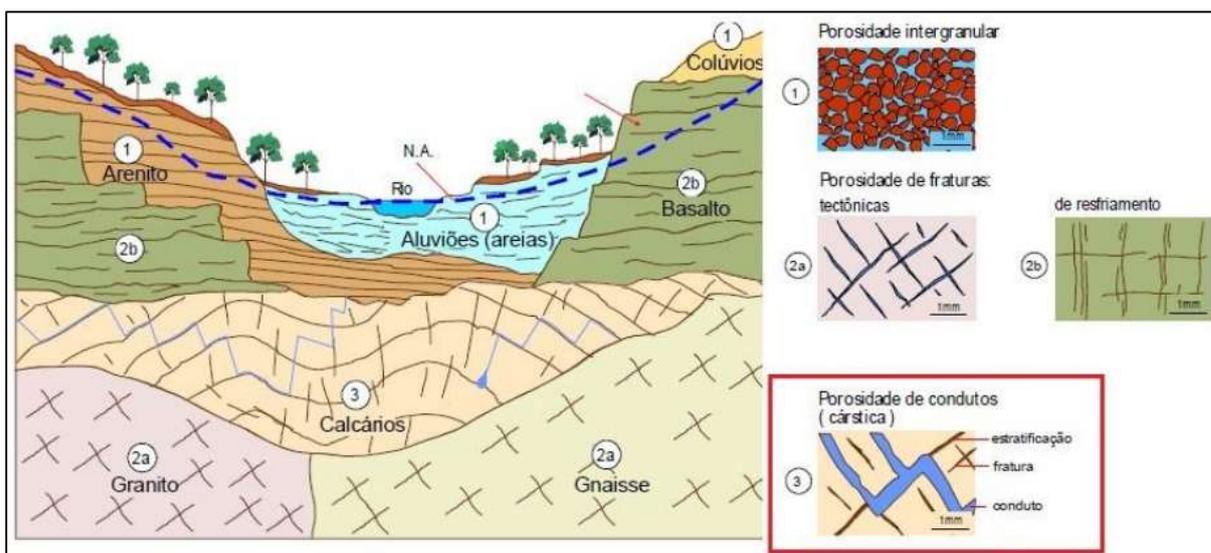


Figura 2.6 - Tipos de aquífero em relação a porosidade do meio, com destaque, em vermelho, para os aquíferos cársticos (modificado de Teixeira *et al.* 2003).

2.4.2.2 Classificação quanto a pressão

De acordo com a pressão das águas nas superfícies limítrofes e da capacidade dessas estruturas em transmitir água, um aquífero pode, ainda, ser classificado como livre, confinado ou semiconfinado, como mostra a Figura 2.7 (Borguetti 2005).

Um aquífero livre, ou freático, representado pelo “Aquífero A” na Figura 2.7, é aquele que ocorre próximo à superfície, onde o limite superior é definido pela superfície freática ou de saturação, onde todos os pontos encontram-se à pressão atmosférica. Em algumas situações, os aquíferos livres podem

apresentar a camada inferior semipermeável – drenante, ou impermeável – não drenante (Feitosa *et al.* 2008).

Por outro lado, um aquífero confinado, ou sob pressão, é aquele onde a pressão da água em seu topo é superior à pressão atmosférica. Em função dos tipos de camada limítrofe, podem ser divididos em: drenantes e não drenantes. Aquíferos confinados drenantes são aqueles onde ao menos uma das camadas limítrofes é semipermeável, facilitando a saída ou entrada de fluxos pela base e/ou pelo topo, através da drenança ascendente ou descendente (Feitosa *op. cit.*).

Um aquífero confinado não drenante é uma formação cujas camadas limítrofes são impermeáveis. Caso um poço seja instalado neste aquífero, espera-se que o nível da água subterrânea fique acima da base da camada confinante superior, como pode ser observado no “Aquífero B”, penetrado pelos poços 1, 2 e 3, e no “Aquífero C”, por meio do poço 3, na Figura 2.7. Em todas as situações, o nível da água no poço aponta a carga hidráulica ou carga potenciométrica média ao longo da zona filtrante ou de admissão do poço. A depender do número de poços de observação penetrantes em uma unidade aquífera, é possível definir uma superfície potenciométrica, vide item 2.3.3 (Feitosa *op. cit.*).

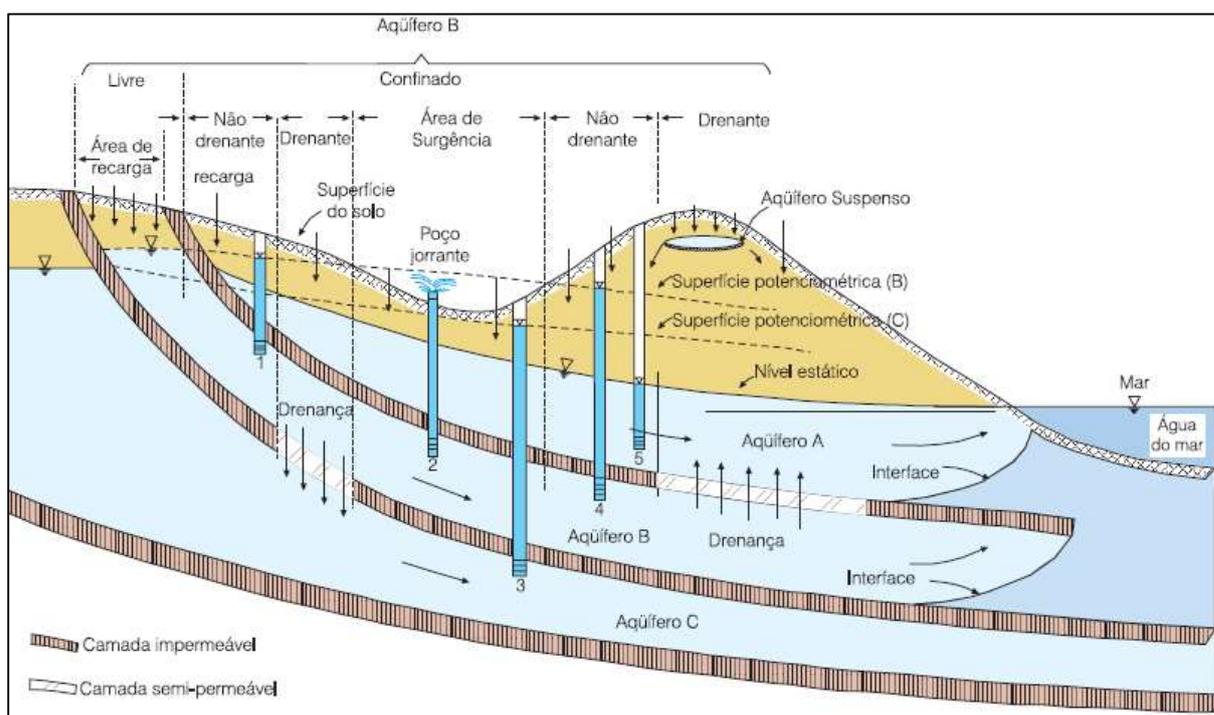


Figura 2.7 - Representação esquemática dos diferentes tipos de aquífero, de acordo com o sistema de pressão de suas águas e com a natureza das camadas que os delimitam no topo e base. Fonte: Feitosa *et al.* (2008).

2.5 HIDROGEOLOGIA DE MEIOS FRATURADOS

Os terrenos fraturados são compostos, principalmente, por rochas metamórficas e ígneas, as quais apresentam baixa porosidade em função dos poucos espaços intergranulares da matriz rochosa.

Entretanto, estruturas descontínuas, de origem posterior à formação da rocha-reservatório, podem originar espaços capazes de acumular água e favorecer um fluxo nesses meios (Feitosa *et al.* 2008). Dessa forma, a porosidade passa a ser denominada como porosidade secundária, não sendo, contudo, homogênea ao longo de todo o aquífero, uma vez que existem variações bastante significativas de um ponto a outro (Fetter 1994).

O fluxo de água subterrânea e o armazenamento em aquíferos fraturados são condicionados, sobretudo, pela geometria do sistema de estruturas descontínuas (Figura 2.8), como rugosidade e abertura das fraturas; dimensão, densidade e atitude das famílias de fraturas, por exemplo. Existem três diferentes modelos que relacionam o fluxo subterrâneo com a estrutural do terreno cristalino: i) Riacho-Fenda: trechos retilíneos da drenagem superficial que coincidem com zonas fraturadas intensamente; ii) Calha Elúvio-Aluvionar: possui recarga a partir de calhas de sedimentos, podendo estar relacionado com as foliações das rochas; iii) Bolsões ou Câmaras de Intemperismo: forte ação de intemperismo diferencial, litologias e tensões neotectônicas, onde são gerados bolsões ou câmaras no cristalino, apresentando vazão anormalmente alta (Feitosa *op. cit.*).

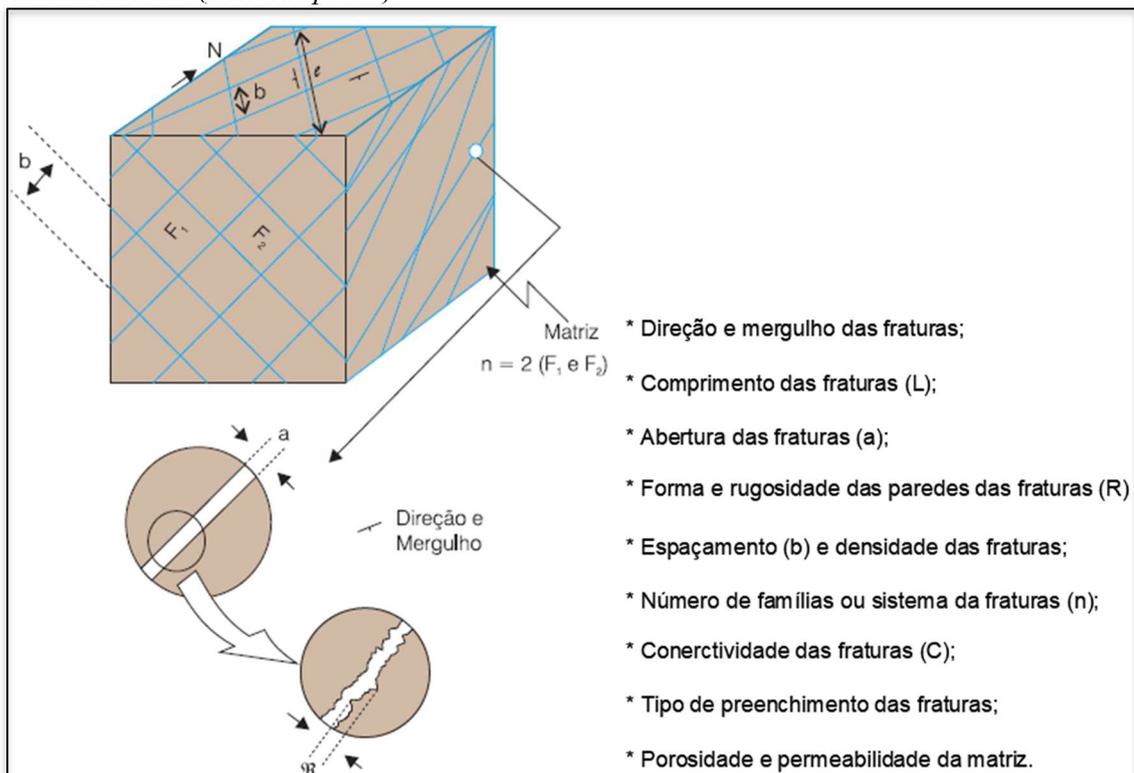


Figura 2.8 - Elementos do aquífero fissural que condicionam a permeabilidade e a porosidade do meio. Fonte: Costa (2008).

A locação de poços nesses terrenos deve observar fatores exógenos, como hidrografia e relevo, além dos endógenos, como constituição litológica e estrutura geológica. Assim, é recomendado análises de fotografias aéreas, imagens de satélite e geofísica regional, que realçam os contrastes de umidade ao longo das drenagens nos riachos, além de localizar coberturas arenosas que favoreçam recargas em fraturas (Coriolano 2002).

2.6 HIDROGEOLOGIA DE MEIOS CÁRSTICOS

2.6.1 O estudo do carste

Os estudos envolvendo ambientes cársticos são baseados nas suas peculiaridades, tanto como reservatório, quanto pelos problemas ambientais e geotécnicos associados a eles. Apesar de serem temas de diversos trabalhos e pesquisas, os resultados e aplicação de métodos não são uniformes. Dessa forma, em cada estudo, as técnicas de exploração devem ser adaptadas da melhor maneira para atender as especificações locais (Feitosa *et al.* 2008).

O carste destaca-se das demais áreas por ser de grande valor para a economia, meio ambiente, turismo e hidrogeologia, uma vez que exibem solos agricultáveis, zonas desnudas sem vegetação, grandes reservas de recursos hídricos no subsolo, ausência de drenagem superficial – mesmo em climas úmidos, devido à elevada condição de recarga. Contudo, Goldscheider & Drew (2007) e Feitosa *op. cit.* concluíram que os meios heterogêneos, como os aquíferos cársticos, são os mais vulneráveis à contaminação, pois há um problema quanto a incertezas das áreas contaminadas e mecanismos pelos quais o poluente é agregado ao fluxo subterrâneo.

Em termos gerais, ao longo da evolução temporal do carste, são formados vários caminhos de fluxo de água subterrânea e pontos de saída de drenagens, cuja detecção pode não ser prevista com base apenas em cenários atuais topográficos e hidrológicos. É necessário, também, considerar a história da paisagem durante os estudos hidrogeológicos, sendo fundamental o estabelecimento de metodologias apropriadas de amostragem espacial (Goldscheider e Drew *op. cit.*).

O Brasil dispõe de diversas ocorrências de regiões carstificadas (Figura 2.9), sendo frequentes as ocorrências de abatimentos de terrenos, em zonas rurais e urbanas, em resposta a evolução das cavidades em rochas carbonatadas, como é o caso dos municípios Sete Lagoas, Cajamar, Matozinhos, Lagoa Santa, Prudente de Moraes, Vespasiano, entre outros (Oliveira 1996; Feitosa *op. cit.*). Porém, esse processo, inicialmente natural, pode ser intensificado por ações antrópicas, como obras, intensa exploração de águas subterrânea, por exemplo.

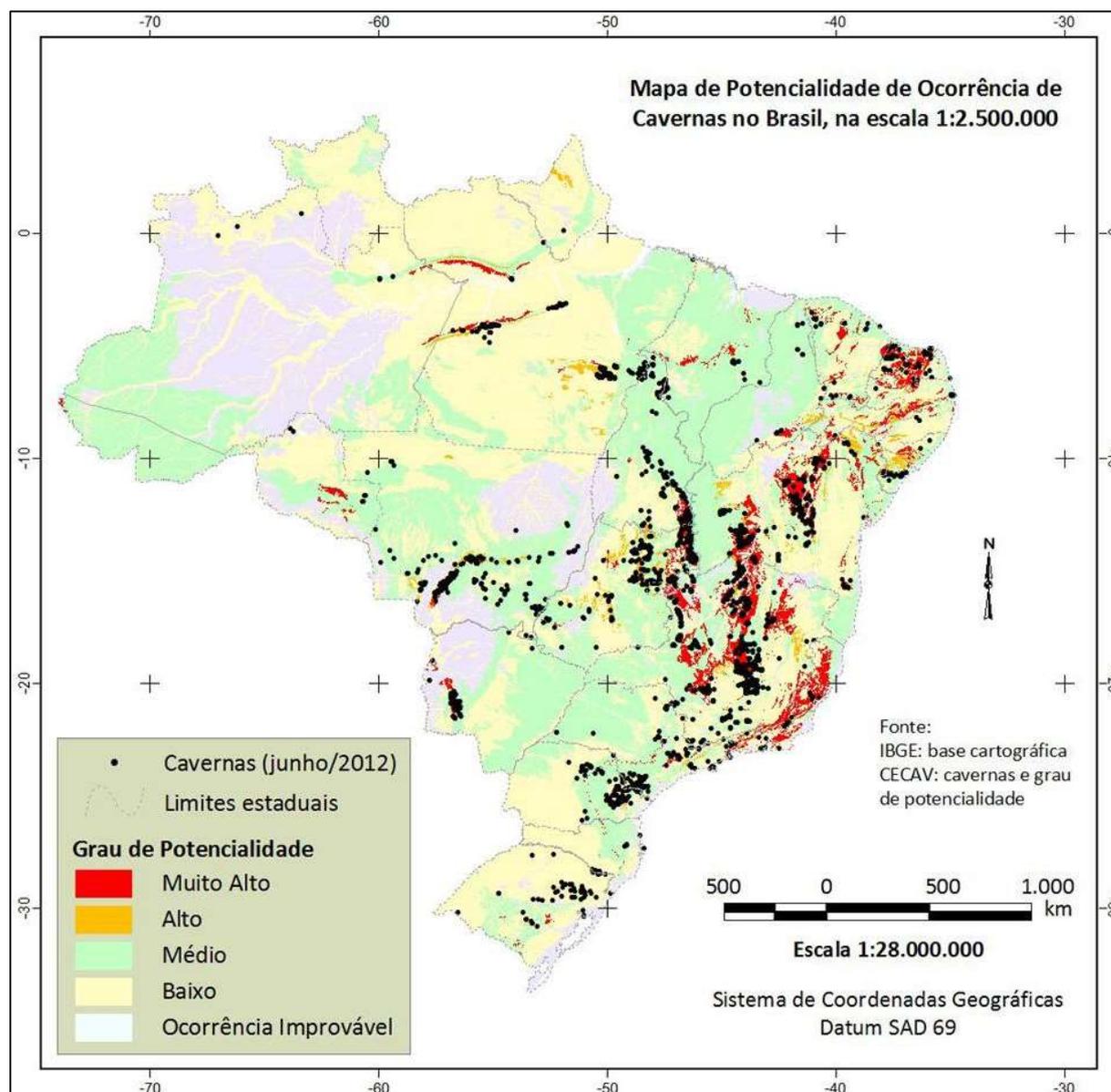


Figura 2.9 - Mapa de Potencialidade de Cavernas no Brasil, na escala 1:2.500.000 (Revista Brasileira de Espeleologia – RBEsp, ICMBio 2012).

2.6.2 O carste e o processo de carstificação

Os ambientes cársticos podem ser descritos como uma forma de paisagem que contém cavernas e um extenso sistema de água subterrânea, desenvolvido a partir da dissolução química e/ou mecânica de rochas solúveis, como calcários, evaporitos, margas, dolomitos, gipsos, halitas e anidritas. Em condições climáticas tropicais, as rochas compostas por minerais de silicato e quartzo também podem desenvolver fenômenos de dissolução (Ford & Willians 2007).

O processo de carstificação inicia-se quando a água, ao absorver CO_2 , torna-se ácida e entra em contato com a rocha. De acordo com Ford e Williams (*op. cit.*), a concentração de CO_2 dissolvido nas águas depende da temperatura e pressão parcial de CO_2 na atmosfera, fazendo com que o clima seja

considerado como fator importante nos processos de carstificação. Além disso, solos ricos em matéria orgânica também podem acidificar a água, aumentando os processos de dissolução da rocha.

Primeiramente, a água percola em pequenas fraturas, acamamento ou outras estruturas descontínuas da rocha, tornando-as maiores e mais espessas, até formarem complexos e funcionais condutos no subsolo, os quais podem variar ao longo do tempo e espaço. A permeabilidade de um aquífero cárstico, portanto, é resultado não apenas das porosidades primária e a secundária, mas também daquela gerada a partir da ação da dissolução do meio, classificada como porosidade terciária, ou porosidade de condutos cársticos (Karmann *et al.* 2000; White 2003).

Dentro de um aquífero cárstico, a condutividade hidráulica (K) apresenta, em geral, valores variáveis no espaço, estabelecendo o conceito de heterogeneidade. Além disso, quando se efetua medidas em diferentes direções em qualquer ponto desta mesma formação, K também pode exibir variações, definindo a propriedade anisotropia (Freeze & Cherry 1979).

Dessa maneira, embora os resultados em laboratórios e testes de bombeamento forneçam informações sobre as condições hidráulicas e do substrato rochoso local, o valor de condutividade hidráulica não pode ser transferido para todo o sistema cárstico. Por conseguinte, são necessários estudos hidrogeológicos que analisem os volumes de água que fluem dentro dos sistemas para, então, proporcionar uma melhor gestão de recursos hídricos (Ford & Williams *op. cit.*).

2.6.3 Recarga e Descarga do aquífero cárstico

A recarga em aquíferos cársticos pode ocorrer por meio de dois fenômenos, a depender da origem da captação de água: autogênica e alogênica. A primeira ocorre através do próprio sistema cárstico, enquanto a recarga alogênica tem origem em porções adjacentes não-cársticas. No que tange o tipo de infiltração, a água pode entrar no sistema a partir de sumidouros ou dolinas, classificando uma recarga concentrada e rápida (pontual). Por outro lado, quando a recarga ocorre por meio do solo e fissuras da rocha, recebe o nome de recarga difusa (Goldscheider e Drew 2007; Figura 2.10).

Em relação aos pontos de descarga do aquífero cárstico, tem-se as surgências, ou nascentes, as quais destacam-se como as formas de relevo mais significativas da terminação dos rios subterrâneos, comuns no ambiente cárstico, sendo controladas pela topografia da superfície freática na saída (descarga). Assim, essas estruturas fornecem informações sobre condições do aquífero, bem como servem de fontes de água para gestão dos recursos hídricos (Ford & Williams 2007).

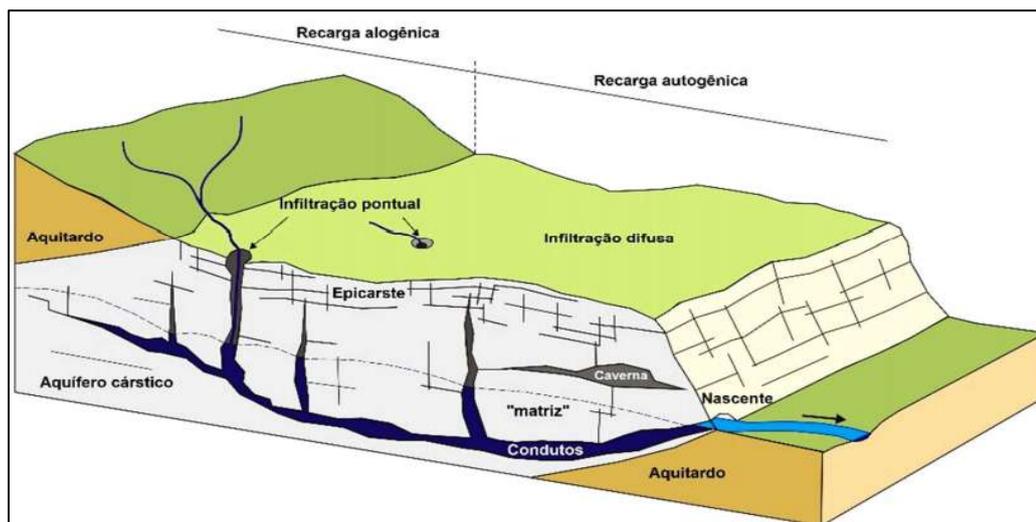


Figura 2.10 - Ilustração esquemática de um aquífero cárstico e as dualidades de recarga (alógena e autógena), infiltração (difusa e pontual), porosidade e fluxo (matriz e condutos) (modificado de Goldscheider e Drew 2007).

2.6.4 Feições típicas e relevo

Em relação ao relevo, o carste é capaz de gerar feições superficiais (exocarste) e subterrâneas (endocarste), como resultado do processo químico de dissolução (Ford & Williams 2007). Abaixo, destacam-se as principais feições que compõem o relevo cárstico e, na Figura 2.13, apresenta-se um desenho esquemático das principais feições cársticas.

As características do exocarste são expressões na superfície do desenvolvimento do endocarste e da estrutura aquífera, as quais podem ser exibidas, principalmente, em mapas geomorfológicos. De modo geral, os processos de fissuração e carstificação, originados em superfície, condicionam uma permeabilidade maior e mais uniformemente distribuída do que no pacote de rocha abaixo, garantindo que o índice de infiltração de água no aquífero seja elevado (Feitosa *et al.* 2008). Assim, entende-se que as feições superficiais do carste desempenham, geralmente, as funções de armazenamento de água e concentração de fluxo (Goldscheider e Drew 2007).

O avanço do processo de carstificação gera estruturas subterrâneas, as quais constituem o endocarste. Nesse ambiente, a água pode fluir de duas maneiras distintas: i) lenta e difusa pela matriz e fissuras do meio geológico; ii) turbulenta e rápida aproveitando condutos, em áreas totalmente saturadas com altos valores de condutividade hidráulica (K), mas baixos em armazenamento de água em relação ao volume total do aquífero (Goldscheider & Drew *op. cit.*). Dessa forma, o endocarste pode ser caracterizado por um fluxo de água anômalo em relação ao gradiente potenciométrico regional (Feitosa *op. cit.*).

Em relação às principais feições do ambiente cárstico, tem-se as dolinas, que caracterizam depressões circulares ou ovais, que podem ser formadas a partir de processos variados, como erosão por *piping*, colapso, subsidência, dissolução, ou uma combinação desses processos. Salienta-se, ainda, que os locais onde há cruzamento de duas ou mais fraturas representam o ponto mais propício para o início da

carstificação e desenvolvimento das dolinas e sumidouros. As uvalas, por outro lado, representam o encontro de dolinas que ampliaram-se mais superficialmente do que em profundidade (Goldscheider & Drew *op. cit.*; Figura 2.11).

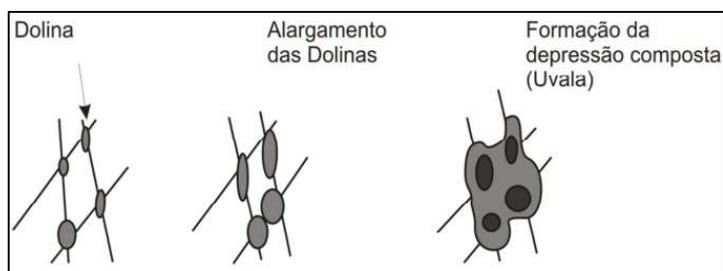


Figura 2.11 - Modelo esquemático (planimétrico) da evolução de dolinas para uma uvala ou depressão composta. Baseado em White (1988) adaptado de Piló (1998).

Os sumidouros, ou pontos de absorção, constituem canais formados pela dissolução da água que conectam a superfície (fundos de dolinas, *e.g.*) com os condutos subterrâneos, representando um tipo de recarga pontual (Feitosa *op. cit.*; Travassos *et al.* 2015; Figura 2.12). Para Waltham *et al.* (2005), sumidouros também podem ser caracterizados como dolinas de dissolução *stritu sensu*. Assim, a recarga através de sumidouros e dolinas são semelhantes, exceto que nos sumidouros ela é mais precisa e o pico de influxo é maior (Ford e Williams *op. cit.*).

As surgências (Figura 2.12), tipicamente em ambientes cársticos e similares às nascentes, são estruturas pelas quais a água subterrânea volta à superfície em função das condições do meio geológico ou processos hidrodinâmicos. Caso apareçam no subsolo, são denominadas ressurgências (Travassos *op. cit.*).

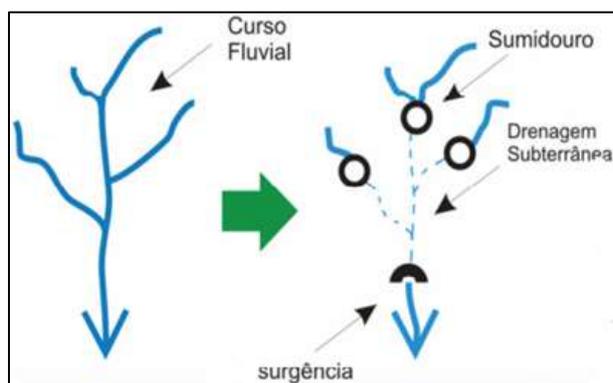


Figura 2.12 - Modelo esquemático (planimétrico) da evolução de um sistema fluvial para um relevo de depressões compostas (uvalas). Baseado em White (1988) adaptado de Piló 1998.

As cavernas podem ser caracterizadas como uma abertura natural subterrânea que foi ampliada por processos de dissolução e que, em determinado momento, adquiriu um diâmetro suficiente para que o fluxo laminar passe para turbulento, ou seja, de 5 a 15 mm de diâmetro, normalmente. Elas são as feições de relevo mais complexas e bastante afetadas pela relação química, geologia e mecanismos hidrodinâmicos da água subterrânea (Ford & Williams *op. cit.*).

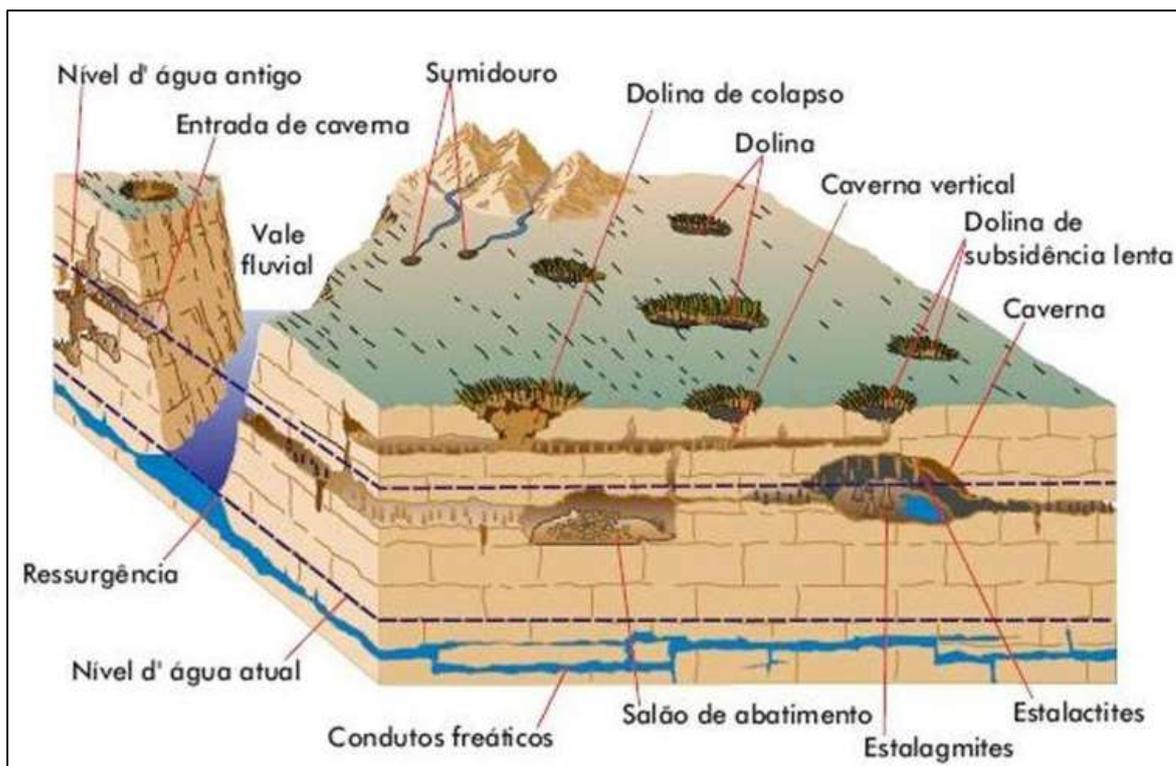


Figura 2.13 - Sistema cárstico detalhado por meio de diagrama ilustrativo. Fonte: Karmann (2000).

2.6.5 Produtividade e locação de poços em rochas carbonáticas

A produtividade aquífera indica o potencial explotável de água subterrânea do aquífero e está relacionado à permeabilidade das rochas e ao volume de água armazenado. Assim, a produtividade pode ser avaliada com base nos parâmetros hidráulicos derivados de testes de bombeamento, mas também a partir dos valores de recarga, os quais representam um valor aproximado da produtividade máxima do aquífero (PANM 2019).

O parâmetro hidráulico que melhor representa a produtividade de poços corresponde à capacidade específica ou capacidade específica (Costa 1986). Esse parâmetro pode ser calculado a partir da razão entre a vazão de um poço (Q) e o rebaixamento do nível d'água (s), representado, dessa forma, como Q/s . Dentre os parâmetros hidrodinâmicos que mais se relaciona com a capacidade específica, destaca-se a transmissividade hidráulica (T), uma vez que o aumento desta gera uma redução do rebaixamento causado pelo bombeamento, ou seja, quanto maior a transmissividade de um meio, maior será a capacidade específica e, dessa forma, mais produtivo será o aquífero (Diniz *et al.* 2014).

Salienta-se que, por ser um meio descontínuo, o carste pode apresentar fraturas isoladas ou zonas de fraturas estreitas com valores mais altos de condutividade hidráulica (K), proporcionando caminhos preferenciais para o fluxo, além de facilitar entradas de água e aumentar a produtividade dos poços. Além disso, outras propriedades hidráulicas do meio também podem exibir heterogeneidade alta, o que torna a produtividade de poços em aquíferos cársticos bastante variável.

Ademais, destaca-se que a produtividade de poços depende não somente da qualidade do aquífero, mas também da qualidade da complementação e desenvolvimento do poço tubular profundo (Theis 1935; Feitosa *et al.* 2008). Por isso, poços pouco eficientes podem gerar altos rebaixamentos, reduzindo os valores de capacidade específica que, por sua vez, podem não ter relação com a transmissividade.

Uma maneira de se classificar estatisticamente a produtividade aquífera é a partir da metodologia do “Manual de Cartografia Hidrogeológica” (Diniz *et al.* 2014), indicada na Tabela 2.1, onde são utilizados os valores da mediana da transmissividade e de capacidade específica (Neves 2005).

Tabela 2.1 - Definição de classes de produtividade de aquíferos a partir de dados de capacidade específica, condutividade e transmissividade, segundo Diniz *et al.* (2014) adaptado de Struckmeier & Margat (1995).

Q/s (m ³ /h/m)*	T (m ² /s)	K (m/s)	Vazão (m ³ /h)	Produtividade	Classe
$\geq 4,0$	$\geq 10^{-2}$	$\geq 10^{-4}$	≥ 100	Muito Alta: Fornecimentos de água de importância regional (abastecimento de cidades e grandes irrigações). Aquíferos que se destacam em âmbito nacional	1
$2,0 \leq Q/s < 4,0$	$10^{-3} \leq T < 10^{-2}$	$10^{-5} \leq T < 10^{-4}$	$50 \leq Q < 100$	Alta: Características semelhantes à classe anterior, contudo situando-se dentro da média nacional de bons aquíferos.	2
$1,0 \leq Q/s < 2,0$	$10^{-4} \leq T < 10^{-3}$	$10^{-6} \leq T < 10^{-5}$	$25 \leq Q < 50$	Moderada: Fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades, irrigação em áreas restritas.	3
$0,4 \leq Q/s < 1,0$	$10^{-5} \leq T < 10^{-4}$	$10^{-7} \leq T < 10^{-6}$	$10 \leq Q < 25$	Geralmente baixa, porém localmente moderada: Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado.	4
$0,04 \leq Q/s < 0,4$	$10^{-6} \leq T < 10^{-5}$	$10^{-8} \leq T < 10^{-7}$	$1,0 \leq Q < 10$	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa: Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos.	5
$< 0,04$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-8}$	$< 1,0$	Pouco Produtiva ou Não Aquífera: Fornecimentos insignificantes de água. Abastecimentos restritos ao uso de bombas manuais.	6

Onde: Q/s – capacidade específica; T – transmissividade; K – condutividade hidráulica; Vazão – volume explorado em testes de bombeamento de 12 horas de duração e 25 metros de rebaixamento.

De maneira geral, ainda que haja restrição de condutividades hidráulicas elevadas a poucas fraturas, a longo prazo, o armazenamento e o comportamento do aquífero é governado pela conectividade e densidade da rede de fraturas. As descontinuidades associadas às foliações em rochas-reservatório metamórficas e/ou ao acamamento litológico também são relevantes, uma vez que influenciam na

conformação dessa rede, condicionando estruturas segundo a reologia, sejam de ocorrência limitada ou não limitada (Fernandes 2008).

Pensando nisso, a locação de poços em meios cársticos pode ser feito com base na Tabela 2.2 e na Tabela 2.3, as quais simplificam os principais fatores que influenciam no fluxo de água subterrânea, os caminhos preferenciais de circulação e os métodos para locação de poços.

Tabela 2.2 - Ação dos fatores controladores do fluxo de água subterrânea e suas limitações (modificado de Fernandes 2008).

	Exerce controle sobre:	Limitações
Tectônica	Direção das fraturas mais abertas, controlando a direção de maior K e transmissividade. Densidade e direção dos grupos de fraturas controlando a conectividade e armazenamento da rede de fraturas.	Muitas vezes não é disponível em trabalhos anteriores e a coleta e análise de dados estruturais podem ser demoradas e exige profissionais especializados.
Lineamentos	Locação do poço próxima a zona(s) de fraturas ou sob a influência de zona(s) de fraturas.	Escalas pequenas não permitem correlação com fraturas que atravessam os poços. Lineamentos de áreas de relevo suave muitas vezes podem não ser correlacionáveis a estruturas de subsuperfície e não apresentam correlação com a densidade de tais estruturas.
Manto inconsolidado	Recarga de aquíferos.	Descontínuo e de difícil mapeamento. Análises regionais não permitem observação de correlação entre espessura de manto inconsolidado e valores de capacidade específica.
Litologia	Presença de descontinuidades prévias (acamamento, contatos, bandamento) e modo de propagação de fraturas.	O controle exercido pela litologia é subordinado à tectônica, no que diz respeito às fraturas de maior K.
Compartimento topográfico	Saturação de: fraturas superficiais (horizontais e verticais) e manto inconsolidado, pois nos vales o nível d'água é mais próximo à superfície.	Os vales devem ser associados a lineamentos, ou seja, o maior controle é exercido por estes últimos.
Profundidade	Transmissividade de fraturas verticais diminui muito a partir de 300 m de profundidade e das horizontais, a partir de 30 m.	A análise deste parâmetro é fortemente influenciada pelo fato de poços serem aprofundados somente quando produções adequadas não são obtidas com poços mais rasos.

Tabela 2.3 - Procedimentos para a identificação de situações mais favoráveis para a locação de poços e definição de caminhos preferenciais de circulação de água subterrânea (modificado de Fernandes 2008).

Análise preliminar	<p>Elaboração e comparação das curvas obtidas em gráficos de distribuição acumulada (Q ou $Q/s \times$ frequência acumulada de poços) para os seguintes fatores:</p> <ul style="list-style-type: none"> - proximidade a lineamentos - proximidade a lineamentos com relação a diversas direções - proximidade a intersecção de lineamentos - tipos litológicos - espessura de manto inconsolidado - compartimento topográfico <p>Levantamento bibliográfico de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - tectônica recente proveniente de dados geológicos - direção do esforço horizontal máximo (SHmax) atual, obtido com base em dados de sismicidade e de ovalação (<i>breakouts</i>) de poços.
Análise de detalhe	<ul style="list-style-type: none"> - Trabalhos de campo para coleta de dados estruturais e análise da tectônica recente. - Perfilagem acústica ou ótica para identificação de fraturas e de sua atitude ao longo do poço. - Perfilagens de propriedades da água que permitam identificar as fraturas hidráulicamente ativas no poço, tais como: temperatura, condutividade elétrica e velocidade de fluxo com o uso de flowmeter. - Testes de bombeamento de longa duração com monitoramento em poços de observação para a determinação da elipse de transmissividade.

2.7 MÉTODOS AUXILIARES DE INVESTIGAÇÃO

2.7.1 Geoprocessamento

A ferramenta de geoprocessamento é bastante utilizada na hidrogeologia, principalmente para detecção de descontinuidades, identificação de feições geológicas e padrões de drenagens. Porém, não existem limitações para a aplicação do geoprocessamento e a combinação com outros sistemas de informações geográficas permitem uma visão integrada (Feitosa *et al.* 2008).

2.7.2 Geofísica

A geofísica, com base nos métodos magnetométrico e radiométrico, auxilia nas interpretações das estruturas em profundidade e nas condições litoestruturais, respectivamente. Diferente dos métodos convencionais diretos, como amostragem, esse método não é invasivo, pois não perturba o fluxo de água subterrânea. O mapeamento geofísico auxilia, principalmente, na identificação de possíveis fraturas no aquífero, delimitação das condições hidrogeológicas regionais e na locação de poços em pontos hidricamente favoráveis, reduzindo as operações de perfurações sem sucesso (Singhal & Gupta 1999).

2.7.2.1 Método Magnetométrico

A magnetometria é uma ferramenta baseada na identificação das anomalias resultantes da presença de elementos magnéticos nas rochas, o que provoca um contraste de amplitude do campo magnético. Por essa razão, sua utilização é muito disseminada nas diferentes etapas de estudos de prospecção e pesquisa mineral, a fim de se identificar os contatos geológicos e de estruturas, como dobras e falhas (Luiz & Silva 1995).

As interpretações das anomalias magnetométricas são feitas com base nos mapas de Amplitude do Sinal Analítico (ASA), os quais centralizam os corpos anômalos em relação ao ponto de observação, facilitando o reconhecimento de estruturas geológicas. Existem, ainda, os mapas DASA, que correspondem a derivadas do ASA, responsáveis por projetar corpos profundos na superfície, possibilitando a observação dessas estruturas (Telford *et al.* 1990, Kearey *et al.* 2002).

2.7.2.2 Método Radiométrico

A radiometria, ou gamaespectometria, é um método geofísico restrito, de pouca penetrabilidade, capaz de detectar assinaturas radioativas presentes nas rochas. Os elementos mais importantes para a gamaespectometria correspondem aos isótopos radioativos instáveis, como potássio (^{40}K), urânio (^{238}U) e tório (^{232}Th) (CNEN 2006).

O mapa temático do canal U está relacionado com elementos de baixa concentração em minerais acessórios, podendo associar-se, também, a ambientes oxidantes. O canal de Th é bastante utilizado para análises de regiões com elevado intemperismo químico, desde que as concentrações desde elemento sejam maiores em relação aos outros. O mapa do canal de K é empregado no reconhecimento de zonas ricas em álcalis-feldspato e micas em granitoides, embora os resultados sejam mais eficazes quando associado a outro canal (Telford *et al.* 1990).

Os mapas de concentração absoluta (Th, U e K), contagem total e ternário, são utilizados para salientar as diferenças litológicas. Os mapas das razões Th/K e U/Th podem facilitar a identificação do grau da atividade intempérica local, bem como alteração supergênica e lixiviação. O mapa da razão U/K, por sua vez, mostra as variações de concentração dos elementos U e K (Telford *op. cit.*).

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

A bacia hidrogeológica do rio Vieira, em termos geotectônicos, situa-se próxima à borda leste do Cráton São Francisco – CSF (Figura 3.1), uma unidade geotectônica originada no Ciclo Brasileiro, ou seja, uma das porções da Plataforma Sul-americana que não foram envolvidas nas sucessivas colisões durante o Neoproterozoico. Dessa forma, o CSF e os demais núcleos cratônicos constituem segmentos continentais interiores, relativamente estáveis que, depois de serem aglutinados, deram origem a porção ocidental do supercontinente Gondwana (Alkmim & Martins-Neto 2001).

Os limites do CSF são definidos pelos cinturões orogênicos brasileiros, os quais apresentam vergência para o interior do cráton, sendo eles: a oeste e sul, a Faixa Brasília; a leste, Cinturão Araçuaí; a norte, as Faixas Riacho do Pontal e Sergipana; a noroeste, a Faixa Rio Preto (Alkmim 2004).

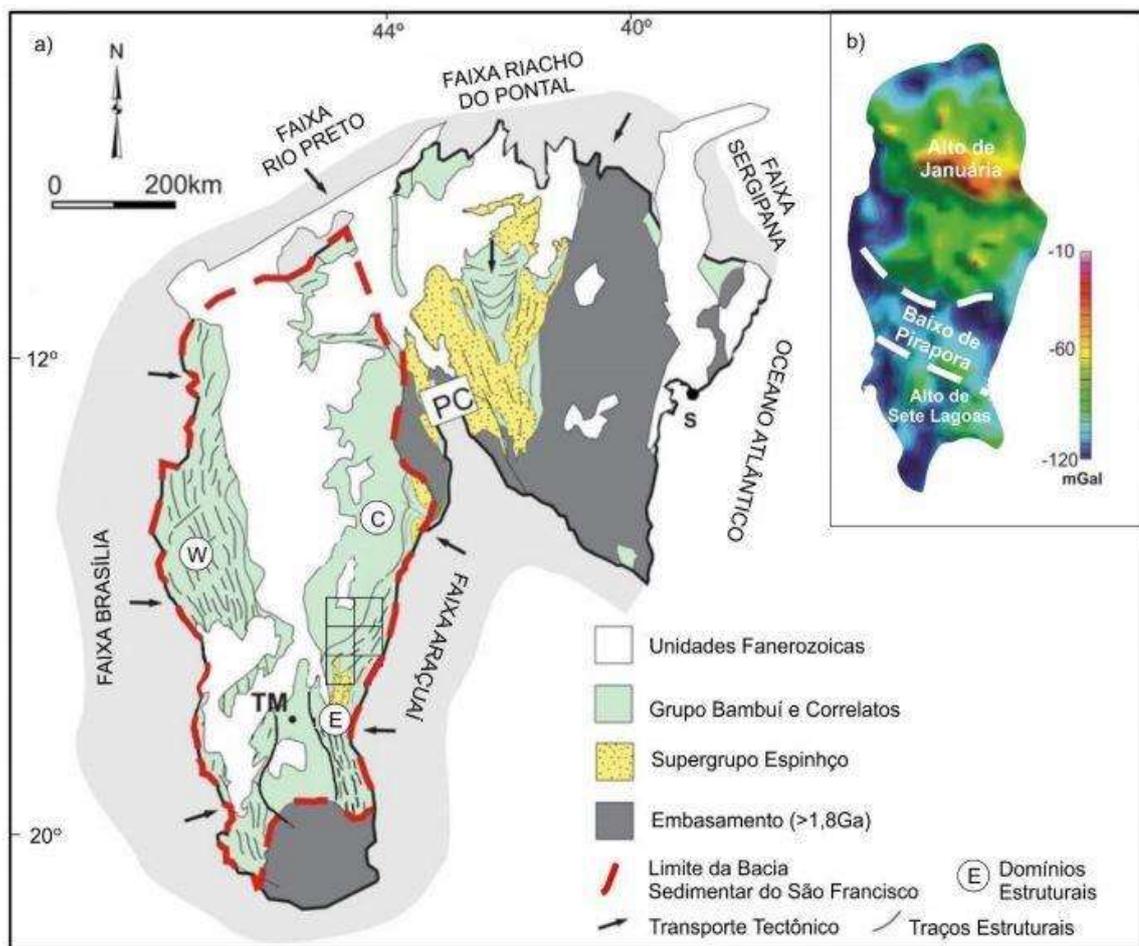


Figura 3.1 - a) Mapa simplificado do cráton São Francisco com a localização das cinco folhas geológicas onde localiza-se a área de estudo, bem como os domínios estruturais (W – domínio oeste, C – domínio central e E – domínio leste); b) mapa de anomalia Bouguer com os limites dos altos de Januária e Sete Lagoas e o Baixo de Pirapora). PC = Corredor do Paramirim. Adaptado de Alkmim & Martins-Neto (2001) e Reis *et al.* (2017).

De acordo com a cronoestratigrafia proveniente do banco de dados geológicos da CPRM em escala 1:100.000, Projetos São Francisco e Norte de Minas, as folhas e relatórios geológicos SE.23-X-A-II (Kuchenbecker *et al.* 2014), SE.23-X-A-III (Kuchenbecker & Costa 2014), SE.23-X-A-V (Chaves & Andrade 2014a), SE.23-X-C-II (Chaves & Benitez 2007) e SE.23-X-A-VI (Chaves & Andrade 2014b), as principais unidades litológicas presentes na área da bacia de estudo podem ser descritas, da base para o topo, abaixo e analisadas na Figura 3.3.

3.1.1 Grupo Bambuí

O Grupo Bambuí, inserido no compartimento central do CSF, originou-se no Neoproterozoico, durante uma transgressão marinha generalizada, quando as sobrecargas laterais desencadearam o processo de subsidência. Assim, as Faixas Araçuaí e Brasília foram soerguidas, gerando uma bacia sedimentar do tipo *foreland*, que compõe a porção superior da Bacia Sedimentar do São Francisco (Reis *et al.* 2017). O principal estilo do grupo é de uma cobertura tabular com dobramentos suaves e descolamentos basais, com falhas normais de pequeno rejeito, gerando estruturas monoclinais suaves, ou amplas dobras supra delgadas resultantes da compactação diferencial de pilha sedimentar sobre altos do embasamento (Velásquez *et al.* 2009).

Uma das principais sucessões do Grupo Bambuí é a marinha (Figura 3.2), a qual constitui porção basal do grupo. Nesta unidade, destaca-se as formações Serra de Santa Helena (pelito-carbonática), Lagoa do Jacaré (carbonática e metassiltitos) e Serra da Saudade (pelítica), as quais correspondem a uma sequência sedimentar química-detrítica, originada em ambiente de plataforma dominada por maré (Dardenne 1978; Iglesias & Uhlein 2009; Reis *op. cit.*).

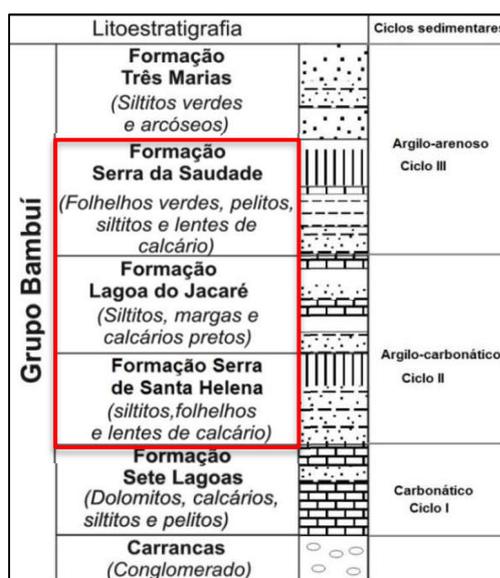


Figura 3.2 - Coluna estratigráfica do Grupo Bambuí com indicação, em vermelho, das formações abordadas neste estudo e os respectivos ciclos sedimentares regressivos. Modificado de Vieira *et al.* 2007.

3.1.1.1 Formação Serra de Santa Helena

A Formação Serra de Santa Helena é definida por Branco & Costa (1961) como sendo uma sucessão de rochas sedimentares pelíticas. De acordo com Scholl (1976), a formação é subdividida em três subunidades: base (ardósias intercaladas com margas e calcários, filitos); porção intermediária (siltitos subordinados e filitos); e topo (quartzitos finos intercalados com filitos e siltitos). Em alguns afloramentos, pode apresentar clivagem ardosiana e estruturas primárias, como laminação plano-paralela e marcas onduladas de pequeno porte.

Na área de estudo, aparece, principalmente, nas porções sudeste e sul, nas folhas Capitão Enéas, Montes Claros e Jequitaiá. Na folha Capitão Enéas, é formada por argilitos e siltitos, com intercalações subordinadas de lentes de calcário e arenito, mas com predominância de siltitos argilosos nas cores verde claro a cinza (Kunchenbecker & Costa 2014).

Nas folhas Montes Claros e Capitão Enéas, ocorre em cotas mais baixas, representando o fundo de vales de rios, como o Verde Grande, sendo composta por sequências monótonas de metassiltitos rosados com intercalações pontuais de folhelhos ardosianos. Além disso, nas folhas Montes Claros e Coração de Jesus, é típico o desenvolvimento de um solo pouco espesso sobre as rochas dessa unidade (Chaves & Andrade 2014b).

Ocorre amplamente na folha Jequitaiá, cobrindo quase toda a central, representando as partes mais baixas da folha. Nessa região, é composta, principalmente, por metargilitos e metassiltitos com intercalações de calcarenitos e folhelhos ardosianos na porção basal (Chaves & Benitez 2007).

3.1.1.2 Formação Lagoa do Jacaré

A Formação Lagoa do Jacaré, com espessura média de 160 metros, apresenta contato concordante e transicional com a Formação Serra da Saudade (Branco & Costa 1961; Dardenne 1978). Em função da predominância de metassiltitos ou calcários em determinadas regiões, Chaves & Andrade (2014a) subdividiram a formação em duas subunidades para melhor representar as variações laterais de fácies. Na maior parte da área, os calcários encontram-se recobertos por arenitos do Grupo Areado e sedimentos areno-argilosos, pertencentes às coberturas cenozoicas.

Nas folhas Brasília de Minas e Coração de Jesus, prevalece à fácies calcária, composta por rochas calcárias intercaladas com margas e siltitos, com grande quantidade de estruturas sedimentares. Os afloramentos são encontrados, principalmente, em drenagens, na forma de lajedos. Os litotipos mais comuns são calcarenitos com amostras oolíticas e ricas em intraclastos; lentes de calcilitos e calcissiltitos; e finas camadas de pelitos (Kuchenbecker *et al.* 2014).

Na folha Montes Claros, aparece na parte noroeste, onde exibe relevo cárstico acentuado (Kuchenbecker *op. cit.*). Na porção sudoeste da área de estudo, predominam os siltitos que podem, inclusive, constituir serras, como a Serra dos FONSECAS, na folha Jequitaiá. O contato inferior é gradacional

com as rochas da unidade Serra de Santa Helena e, no topo, aparecem camadas de calcários.

Na folha Capitão Enéas, a formação, com espessura mínima de 300 metros, não foi desmembrada, permanecendo indivisa. Na porção central da folha, os afloramentos típicos são fundos de dolinas, lajedos e vales cársticos, enquanto a porção oeste, apresenta vertentes e paredões ricos em feições cársticas, como a Serra de São Felipe. Os litotipos mais frequentes são biolitos (estromatólitos pseudocolunares e colunares), calcarenito intraclástico, calcirrudito intraclástico, calcilito e oolítico (Kuchenbecker & Costa 2014).

3.1.1.3 Formação Serra da Saudade

A Formação Serra da Saudade, segundo Dardenne (1978), apresenta contato concordante e gradacional sobre a formação Lagoa do Jacaré. É formada, majoritariamente, por siltitos argilosos cinza a cinza-esverdeado, com raras lentes de calcário cinza claro, podendo alcançar até 350 metros de espessura (Alvarenga 1978). Também é caracterizada por pelitos verdes, ou verdete, um tipo de rocha fosfática que ocorre principalmente na porção sul da Bacia Sedimentar do São Francisco (Tuller *et al.* 2010).

Ocorrem, principalmente, nas folhas Brasília de Minas e Coração de Jesus, enquanto nas folhas Capitão Enéas e Montes Claros, aparecem apenas em uma pequena área. Na maior parte dos afloramentos, as rochas encontram-se intemperizadas, com cores que variam entre bege, roxo, rosa e laranja. A litologia mais frequente é o pelito, com argila e silte em variadas proporções, e, pontuais lentes de arenito (Kuchenbecker *et al.* 2014). Na folha Coração de Jesus, foi classificado como metargilito rosa clara a amarelo, intercalado com camadas de metassilito (Chaves & Andrade 2014b). Uma vez que recobrem grande parte da área de influência da formação Lagoa do Jacaré, os litotipos da formação Serra da Saudade podem estar confinando o aquífero dessa unidade.

3.1.2 Grupo Areado

O Grupo Areado teria se depositado em um contexto de estiramento crustal, produzido durante a abertura do Atlântico Sul no Eocretáceo (Fragoso *et al.* 2011), quando falhas normais formaram bacias receptoras com geometria *graben-horst*. Na área de estudo, aparece como grupo indiviso, principalmente a oeste, onde recobre as rochas da formação Serra da Saudade, nas folhas Brasília de Minas e Coração de Jesus e, a sudoeste da folha Montes Claros, sobre os metassiltitos da formação Lagoa do Jacaré.

É constituído por arenitos de granulometria fina a média, de core bege e avermelhado (quando há cimento ferruginoso associado), na forma de chapadões com bordas íngremes. De maneira restrita, podem ocorrer arenitos brancos argilosos intercalados com matações silicificados e um tipo de rocha verde (Romano *et al.* 2015, Kuchenbecker *et al.* 2014, Chaves & Andrade 2014a). O contato basal é definido como discordante erosivo e angular sobre rochas das formações Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade. A espessura pode variar entre 30 e 100 metros e, normalmente, é capeado por sedimentos colúvio-aluvionares cenozoicos.

3.1.3 Coberturas Cenozoicas

Os Depósitos Detrítico-Lateríticos são encontrados em toda a bacia sobre superfícies aplainadas na forma de eluviões e coluviões, relacionados a sedimentos de canais suspensos em diferentes graus de laterização. Caracteriza-se por sequências de lamitos arenosos e arenitos argilosos intercalados com camadas de folhelho orgânico, argilito e linhito com grau de pureza variável. Também podem ocorrer, de maneira mais restrita, camadas finas de arenito ferruginoso, brechas argilosas intraformais, concreções ferruginosas dentro de fratura, além de solo laterítico residual (Santos 2013).

Os Depósitos Aluvionares podem recobrir até 15 km de largura ao longo do rio Verde Grande e seus principais tributários. São resultados de retrabalhamento fluvial recente, de materiais detríticos diversos. Podem ter até 40 m de espessura, sendo constituídos por areias brancas, amareladas, com grãos angulosos a arredondados, leitos conglomeráticos, argilas e raras concreções calcárias, podendo ter estratificações cruzadas e acamamento gradacional (Santos *op. cit.*).

Os Depósitos Eluvio-Coluvionares ocorrem na porção central da área, ocupando o topo do platô ali presente. Pode ser associada a processos intempéricos e erosivos das rochas do Grupo Areado e seu caráter é, geralmente, eluvial. Subordinadamente, aparecem rampas de colúvio em encostas de maior declividade. São compostos por areia fina a média, avermelhada a bege, com grãos angulosos a subarredondados. Também podem aparecer argila e silte em diferentes proporções, mas nunca predominam. Em alguns pontos são caracterizados processos de laterização e uma capa laterítica fina (Kuchenbecker *et al.* 2014).

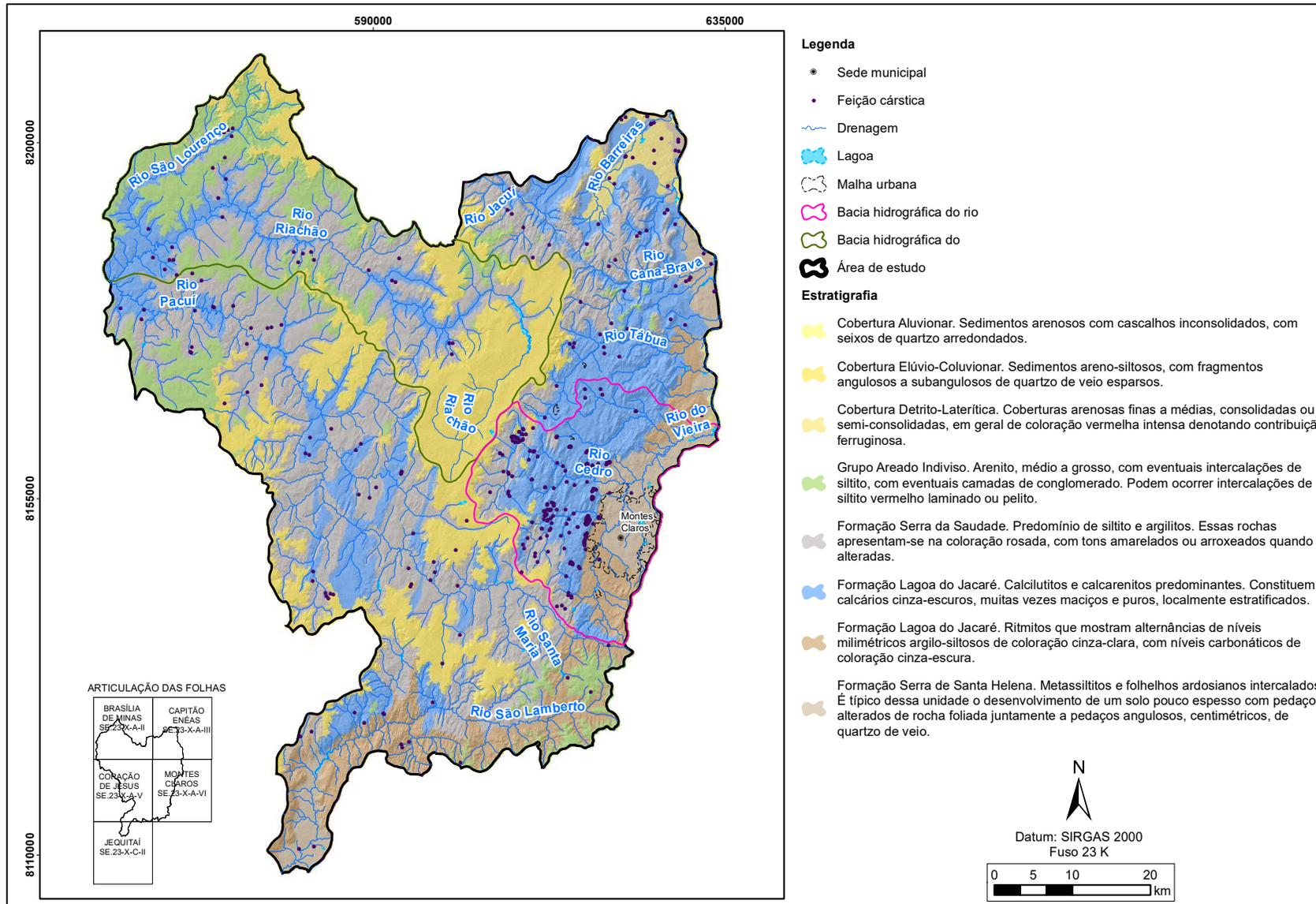


Figura 3.3 - Mapa geológico das cinco Folhas Geológicas da bacia hidrogeológica do rio Vieira, com indicação da localização das feições cársticas, como dolinas e sumidouros (Fonte: CECAV, CPRM).

3.2 ARCABOUÇO ESTRUTURAL

A estruturação e o desenvolvimento da frente orogênica brasileira na faixa móvel Araçuaí, situada na borda oriental do Cráton do São Francisco, permitiu que o embasamento fosse parcialmente deformado durante o evento Brasileiro. Reis *et al.* (2017) caracterizaram essa deformação como *thinskinning*, na qual são registrados descolamentos basais e dobramentos suaves, observadas, principalmente, nas rochas do Grupo Bambuí.

CPRM (2003) identificou, ainda, que essa deformação teria ocorrido em três etapas, sendo a primeira definida por falhamentos extensionais de alto ângulo de direção também NNW-SSE e mergulho para leste (E). A segunda fase é marcada por cisalhamento compressivo de baixo ângulo, de orientação N-S, onde são comuns dobras, falhas de empurrão sub-horizontais e zonas de cisalhamento interestratais (principais mecanismos dissipadores das tensões advindas da colisão a leste). A última etapa caracteriza-se por movimentos extensivos de blocos do embasamento, resultando em falhas de rejeito normal e sinformes e antiformes de eixo EW. Ademais, foram identificadas fraturas associadas a zonas de cisalhamento rúpteis que cortam várias camadas litológicas, com mergulhos subverticais e direções principais N50-60E, N10-20W e E-W. Nas rochas do Grupo Bambuí, também podem surgir outras direções de fraturas, como: N0-20W, N20-40E e N50-60W.

Analisando-se o contexto tectônico da bacia hidrogeológica do rio Vieira, com base em Alkmim & Martins (2001), percebe-se que a vergência tectônica na área é de WNW, ou W, para E, podendo ser encontrada entre os compartimentos estruturais E, caracterizado como uma porção intensamente deformada, em função de colisões diretas da faixa Araçuaí; e C, domínio considerado não deformado. Como consequência, a intensidade da deformação varia de baixo a médio grau, uma vez que esta aumenta a partir do interior do cráton em direção à faixa móvel (Tuller *et al.* 2010).

3.3 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

O comportamento hidráulico de rochas carbonáticas é influenciado não somente por diferentes litotipos existentes, mas também fatores que ocorrem externamente e que alteram mecanismos ligados à produtividade, como infiltração/recarga e circulação de água. Os principais fatores, portanto, correspondem ao relevo, clima, hidrografia, litologia, intemperismo, estruturas geológicas e coberturas superficiais (Feitosa *et al.* 2008).

3.3.1 Clima e precipitação

Segundo o mapa climático IBGE (2002), a bacia hidrogeológica do rio Vieira está inserida no domínio climático “Clima Tropical do Brasil Central”, onde predomina o tipo climático quente semiúmido. O total médio anual de precipitação varia de 800 a 1200 mm, distribuídos de maneira

irregular ao longo do ano e do espaço. Cerca de 90% das chuvas são concentradas no verão, a qual se estende de outubro a abril, sendo o período de dezembro a fevereiro o mais úmido.

Durante o inverno, há redução significativa nos índices pluviométricos, sendo o período de maio a setembro de estiagem, e os meses de junho a agosto, caracterizado por índices pluviométricos mais baixos. De forma geral, esta condição climática apresenta verão quente e úmido, enquanto o inverno seco, com temperatura média acima de 18°C no mês mais frio.

Em função de características ambientais e socioeconômicas, uma parcela da área apresenta condições climáticas semelhantes ao do semiárido nordestino, com considerável aridez, deficiência hídrica e irregularidades de chuvas, além de solos pobres em matéria orgânica e elevadas temperaturas locais, qualificando aridez sazonal (SUDENE 1989).

3.3.2 Hidrografia

Situada sobre a depressão Sanfranciscana, a área de estudo é drenada pelos rios Pacuí, Vieira, São Lamberto e Riachão, sendo associada à porção do Alto Verde Grande e a bacia hidrográfica dos rios Jequitai e Pacuí. Localmente, destacam-se duas bacias hidrográficas importantes, rio Vieira e rio Riachão (Leite & Pereira 2008; ANA 2011; CBHRSF 2016).

A bacia hidrográfica do rio Vieira, afluente da margem esquerda do rio Verde Grande, drena uma área aproximada de 578 km², abrangendo toda a área urbana do município de Montes Claros. Nas porções oeste e noroeste de Montes Claros, é comum a preservação de feições cársticas, como grutas e vales cegos, com ressurgência e nascentes (Leite & Pereira 2008). Por ser a principal rede hidrográfica totalmente inserida em Montes Claros, a bacia pode apresentar índices de poluição, além de ser constatado déficit hídrico subterrâneo (Leite *et al.* 2011).

A bacia do rio Riachão, por sua vez, é afluente da margem direita do rio Pacuí e drena os municípios de Montes Claros, Mirabela, Brasília de Minas e Coração de Jesus (Leite *et al.* 2010). Nas zonas de baixa latitude, associa-se ao sistema cárstico-fissural e granular, onde há predominância de descarga natural e fluxos subterrâneos controlados por fraturamento e carstificação, com direção para o baixo curso da bacia. Na maioria das vezes, a rede de drenagem é intermitente, com exceção de alguns trechos, como nas lagoas Tiririca e do Borá. Quando não sofre interferência do clima ou antrópica, o rio Riachão classifica-se como efluente, ou seja, quando o rio recebe a água do aquífero. Em períodos chuvosos, por outro lado, alguns trechos têm caráter influente, ou seja, contribuem na recarga do aquífero (Karmann *et al.* 2000; Santos 2013).

3.3.3 Vegetação

A bacia hidrogeológica do rio Vieira apresenta características de dois grandes biomas ricos em biodiversidade e que são importantes para o equilíbrio nos fatores de recarga: o Cerrado e Caatinga. O Cerrado constitui cerca de 95% da área da bacia e pode ser encontrado em planaltos de regiões tropicais da bacia do São Francisco, com vegetação de árvores tortuosas de cascas grossas ou árvores de porte médio sobre solos profundos, pobres em nutrientes, rico nos elementos ferro e alumínio (Leite *et al.* 2011). Devido a produção agropecuária na região, grandes áreas são desmatadas, o que potencializa os fenômenos de erosão, bem como a irrigação por pivô central e manejo incorreto e intensivo dos solos em geral (CBHSF 2016).

A Caatinga representa os outros 5% do terreno e compreende vegetação arbórea, caducifólia com fraca penetração da luz solar, como cactáceas e bromeliáceas, em solos rasos e exposição rochosa. O caráter geral é o xerofilismo, resultado da ocupação de um ambiente seco com deficiência hídrica temporal, onde a água disponível às plantas procede unicamente do curto período da estação chuvosa e cujos elementos florísticos são adaptados a resistirem a esse ambiente (Drummond 2005).

3.3.4 Relevo e Topografia

No que tange a elevação da bacia hidrogeológica do rio Vieira, as porções sul, nordeste e uma parte do noroeste podem ser caracterizadas por relevos aplainados e de baixas amplitudes (Figura 3.4a), variando de 503 a 800 m. Nestas porções, prevalecem padrões em colinas dissecadas, morros baixos, vales ricos em solos eutróficos e encostas suavemente onduladas, além de terraços fluviais associados aos rios Riachão, Vieira e seus principais afluentes (Ferreira *et al.* 2015; Figura 3.4b). Nesses ambientes, aparecem feições de relevo cárstico, como dolinas, vales cegos, sumidouros e cavernas, ligados ao Grupo Bambuí, onde a drenagem segue os baixos cursos dos principais afluentes, como o rio Vieira (ANA 2011).

As regiões central e sudeste, por outro lado, destacam-se por apresentar os terrenos de maior amplitude (Figura 3.4a), que variam de 800 a 1100 m, e são representados por topos planos a suaves ondulados, delimitados ainda por degraus estruturais e rebordos escarpados (Figura 3.4b). Nesses ambientes, predominam padrões em morros e serras com cristas alinhadas, além de vales encaixados sobre rochas sedimentares e/ou coberturas detrito-laterítico que geram platôs e chapadas. A drenagem nesta parte pode estar sujeita à degradação, por conta das superfícies que são delimitadas por rebordos erosivos (ANA 2011).

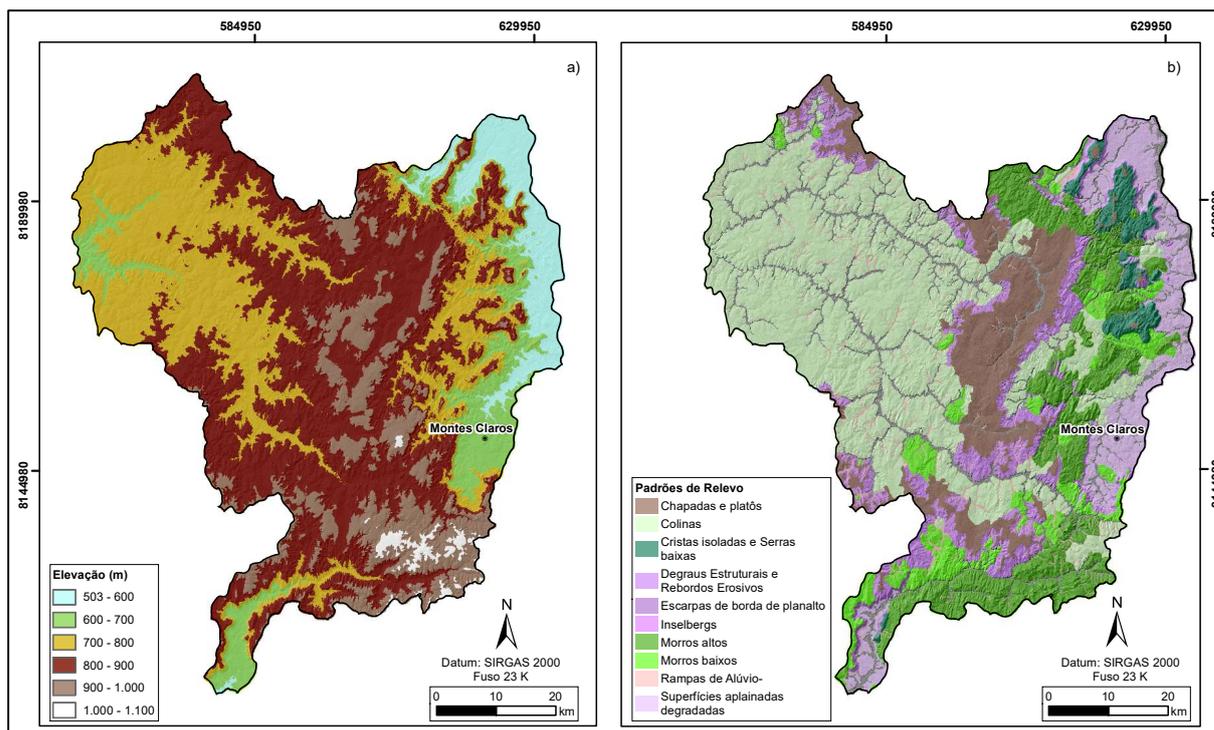


Figura 3.4 - Mapas de elevação (a) e padrões de relevo (b), encontrados na área da bacia hidrogeológica do rio Vieira. Fonte: CPRM (2019) e Alos Palsar.

3.3.5 Solos

De acordo com o Mapa de Solos de Minas Gerais (2010), escala 1:650.000, existem cinco ordens principais de solos na bacia de estudo (Figura 3.5a). Os latossolos são solos profundos, com horizonte B latossólico espesso, friável e de alta permeabilidade e porosidade. Os neossolos são solos pouco desenvolvidos com, no máximo, 20 centímetros de espessura e que podem estar dispostos ao longo de terrenos montanhosos (neossolo litológico), e de regiões de relevo plano ao longo de cursos hídricos (neossolo flúvico).

Os cambissolos são solos pouco desenvolvidos e apresentam horizonte B incipiente. Grande parte dessa ordem de solos é constituída por cambissolo háplico, que possuem partes da rocha mãe e podem associar-se a relevos acidentados. Os argissolos possuem horizonte B textural rico em argila e são propícios a erosão hídrica, principalmente quando ocorrem ao longo de encostas declivosas. Assim, mesmo em relevo suave ondulado, ações de conservação de solos são recomendadas (PANM 2019). Os nitossolos são solos profundos, bem drenados e ocorrem em diferentes tipos relevos e climas. Esta classe está mais associada ao material de origem, que pode ser rochas básicas e rochas calcárias (EMBRAPA).

Para este trabalho, buscou-se, ainda, informações sobre o comportamento desses solos frente à influência das águas. Embora não se conheça os valores de condutividade hidráulica dos solos, esses puderam ser agrupados com base em dados conhecidos, como profundidade do nível d'água, camada restritiva etc. Assim, foram identificados quatro grupos para a bacia de estudo (A, B, C e D), sendo que os classificados na classe A possuem maior capacidade de infiltração se comparados aos da classe B, e assim

por diante (PANM 2019). O resultado da compilação pode ser analisado na Tabela 3.1 e na Figura 3.5b, abaixo.

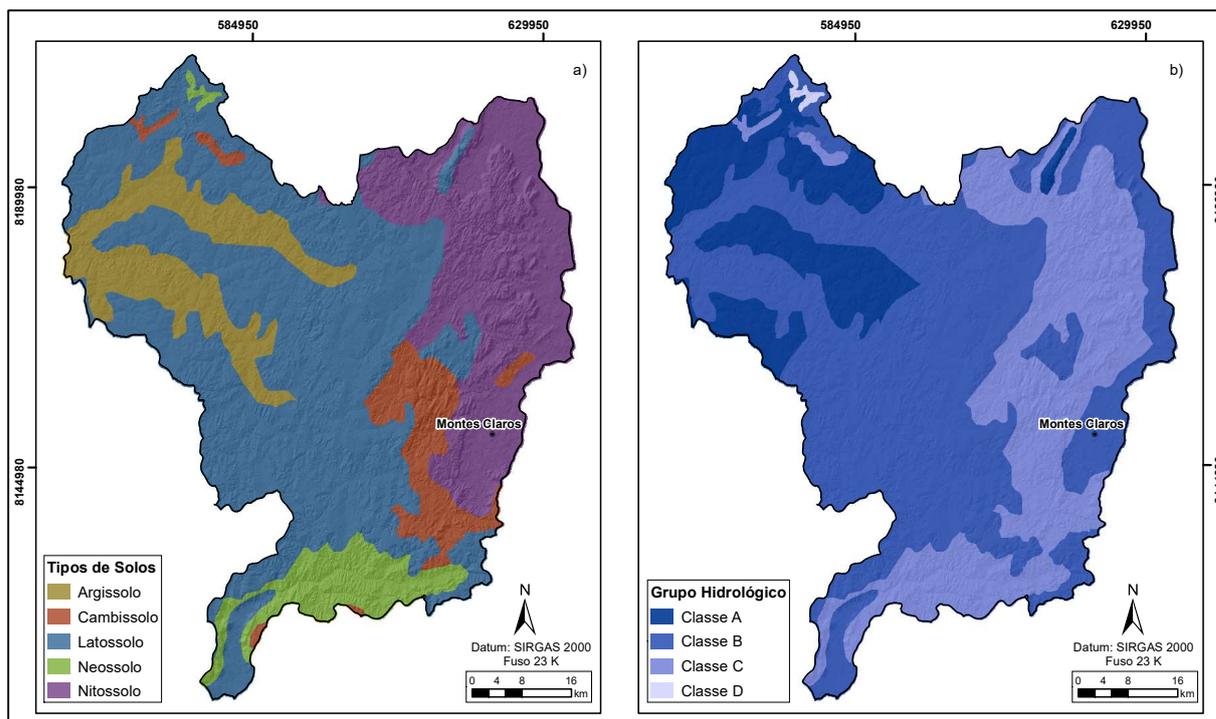


Figura 3.5 - Mapa de distribuição dos principais tipos de solos encontrados na Bacia hidrogeológica do rio Vieira (a); classificação hidrológica dos solos (b). Fonte: CPRM (2019).

Tabela 3.1 - Grupo hidrológico dos solos, com porcentagem de área ocupada dentro da Bacia e suas respectivas características. Modificado de PANM (2019).

Grupo Hidrológico	Área (%)	K saturada média (mm/dia)	Características
A	15	228,6	Permeabilidade rápida, não apresenta em até 100 cm de profundidade lençol d'água subterrâneo ou suspenso e camada restritiva forte ou moderada. O grupo inclui solos arenosos, bastantes intemperizados de textura média, argilosa ou muito argilosa, elevado teor de óxido de ferro e/ou propriedades ácricas.
B	55	137,3	Permeabilidade moderada a rápida, não apresentam em até 100 cm de profundidade lençol d'água subterrâneo ou suspenso e camada restritiva forte, podendo apresentar-se moderada entre 50-100 cm de profundidade. Inclui solos bastante intemperizados de textura média, argilosa ou muito argilosa, com baixo ou médio teor de óxido de ferro e sem características ácricas; etc..
C	25	61,7	Permeabilidade moderadamente lenta, não apresentam em até 100 cm de profundidade lençol d'água subterrâneo ou suspenso, mas podem conter camada restritiva forte entre 50-100 cm ou camada restritiva moderada em até 100 cm de profundidade. Inclui solos arenosos e bastante intemperizados que apresentam camada restritiva forte entre 50-100 cm; solos com argila de baixa atividade; solos com argila de alta atividade; solos com argila de alta atividade.
D	5	15,6	Lenta permeabilidade que podem, ou não, apresentar em até 100 cm de profundidade lençol d'água subterrâneo ou suspenso, camada restritiva forte e moderada. Devido as condições limitantes presentes, estão incluídos vários solos, desde arenosos a argilosos.

3.3.6 Uso e ocupação do solo

A área da bacia hidrogeológica do rio Vieira em virtude de sua extensão territorial, apresenta diversas formas de relevo, solos e climas, o que resulta em diferentes condições de vegetação e ocupação do solo. Na Tabela 3.2 abaixo, são observadas as classes de uso e cobertura do solo para a área de estudo (ANA 2009; ANA 2011; PANM 2019), enquanto a Figura 3.6 apresenta a distribuição espacial das classes.

Tabela 3.2 - Classes de uso e cobertura do solo.

Classes Antrópicas	
Agropecuária (áreas de cultivo não irrigadas e pastagens)	50,1 %
Agricultura (áreas de cultivo irrigadas e silvicultura)	1 %
Áreas queimadas	0,015 %
Edificações	0,4 %
Classes Naturais	
Área úmida, afloramento rochoso, campo, campo cerrado, campo rupestre, cerrado, mata ciliar, veredas, vegetações arbustiva e arbórea.	47 %

A cidade de Montes Claros, a qual representa sozinha os 0,4% da área urbana, destaca-se por ser um importante polo ativo no que se refere à economia e infraestrutura desde 1892, principalmente nos ramos da pecuária, indústria e comércio. Após 1970, a cidade tornou-se atrativa economicamente com a instalação de indústrias nacionais e multinacionais no município, como Alpargatas e Nestlé (IBGE 2010). Essas atividades, entretanto, demandam grande quantidade de recursos hídricos, em especial nos períodos de estiagem (Leite & Pereira 2008; Brandão & Silva 2016).

A bacia do rio Riachão, de acordo com Afonso & Pereira (2005), é utilizada por, aproximadamente, 2.291 famílias que utilizam a área para cultivo de arroz, milho, feijão, mandioca, hortifrutigranjeiros, cana-de-açúcar, irrigação por gravidade, abastecimento humano, dessedimentação de animais e aspersão. Desde a década de 1960, porém, a bacia e seus afluentes têm sido assoreados por conta do desmatamento das matas para produção de carvão, além do uso de agrotóxicos, eucalipto e monocultura. Na década de 1990, houve a instalação de uma represa em torno da lagoa Tiririca, nascente do rio Riachão para irrigação, o que intensificou as disputas entre agricultores familiares e irrigantes pelo uso da água (Soares 2012).

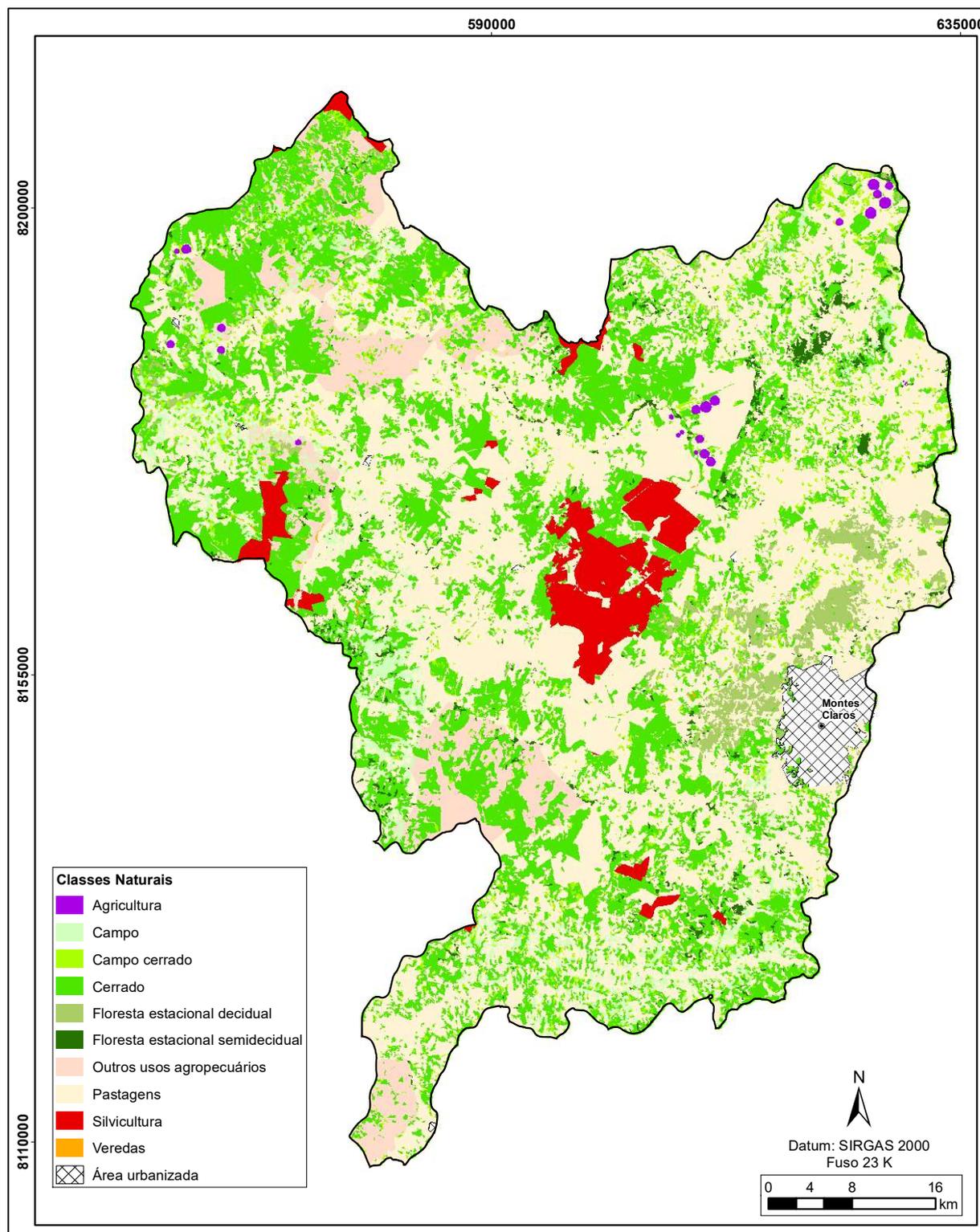


Figura 3.6 - Mapa de uso e ocupação do solo. Fonte: PANM (2019).

3.4 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA LOCAL

Os critérios de classificação hierárquica dos aquíferos são baseados na taxonomia hidrogeológica (Diniz *et al.* 2014 *in* Feitosa *et al.* 2008), onde a maior classe hierárquica é o Domínio Hidrogeológico, enquanto a menor é a Unidade Hidroestratigráfica. Nesse sentido, utilizou-se as análises de PANM

(2019), as quais individualizaram as unidades aquíferas com base nas características de armazenamento, transmissividade de água e litoestratigráficas em escala 1:1.000.000.

Assim, três Domínios Hidrogeológicos foram identificados na área de interesse (Figura 3.7a): i) Granular, associado a rochas sedimentares areníticas de porosidade primária; ii) Cárstico-Fissural, de porosidade secundária, relacionado às estruturas de dissolução e às superfícies de descontinuidade das rochas; iii) Cárstico, de porosidade terciária, associado à dissolução de rochas carbonáticas. A subdivisão dos Domínios Hidrogeológicos, conforme as características litológicas, originou quatro Sistemas Aquíferos Locais, como pode ser analisado na Figura 3.7b.

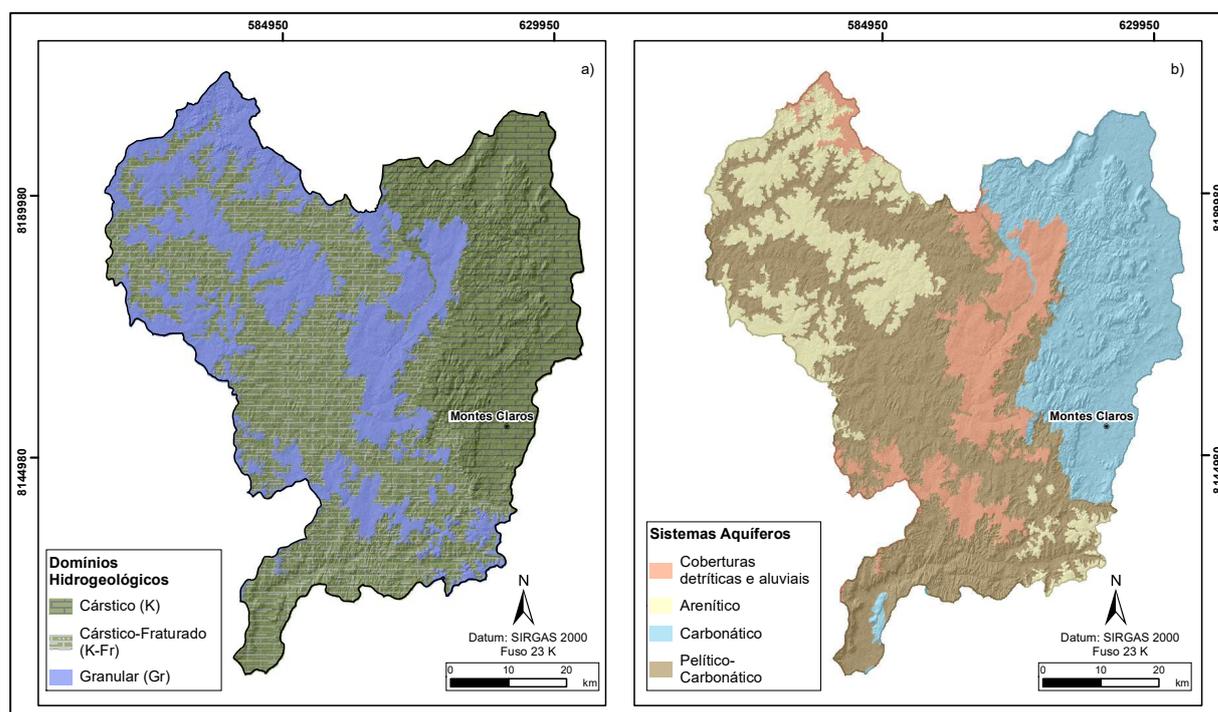


Figura 3.7 - Mapa de domínios hidrogeológicos (a) e sistemas aquíferos (b) da bacia hidrogeológica do rio Veira. Fonte: Projeto Águas do Norte de Minas Gerais (2019).

3.4.1 Domínio Granular

O domínio granular pode ser dividido em dois sistemas: Sistema aquífero de coberturas detríticas-lateríticas e aluviais; e Sistema aquífero arenítico, composto por rochas areníticas do Grupo Areado. De maneira geral, os aquíferos formados por coberturas detríticas-lateríticas, são de origem fluvial e, devido aos processos de formações dessas coberturas, possuem espessuras e extensão variáveis (PANM 2019). Ocupam as porções mais baixas da topografia, podendo receber significativa contribuição por parte dos outros sistemas que esteja em comunicação.

O sistema aquífero arenítico é representado por sedimentos siliciclásticos e piroclásticos, como os arenitos e conglomerados do Grupo Urucua e Areado (PANM *op. cit.*). Ocorrem sob forma de chapadões, ou superfícies tabulares, alcançando espessuras de 300 m na região noroeste da área de estudo, podendo ser encontrados sobre rochas do Grupo Bambuí ou sobre pelitos diversos, como ocorre no município de Mirabela.

Os dois sistemas, devido à baixa densidade de drenagem, possuem alta permeabilidade, coeficiente de infiltração elevado, variando entre 9 e 15%, porosidade eficaz próxima a 0,10; transmissividade média de 58 m²/dia e capacidade específica média de 2,09 m³/h/m (CETEC 1984; Mourão *et al.* 2001).

Em relação às entradas e saídas de água, os aquíferos são recarregados, principalmente, a partir dos afloramentos distribuídos por toda a bacia. Por outro lado, as descargas, ou perdas de água, podem ocorrer por meio da evaporação, evapotranspiração, nascentes difusas ou nos contatos com o substrato impermeável (Santos 2013). Vale ressaltar, ainda, que caso a espessura da camada de sedimentos for adequada e a litologia subjacente seja composta por carbonatos, pode ocorrer a recarga vertical descendente das unidades aquíferas profundas, também chamada de recarga indireta (PANM *op. cit.*). Esse fenômeno pode ser observado nas proximidades dos vales dos rios perenes, como o Verde Grande, onde a água é utilizada para uso doméstico por meio de cisternas (Mourão *op. cit.*).

3.4.2 Domínio Cárstico-Fissural

O domínio hidrogeológico cárstico-fissural corresponde a um meio bastante complexo, sendo difícil a determinação de características como geometria, litologia, e potencialidade, que pode apresentar caráter ora fissural, ora cárstico, ou um caráter misto, com descontinuidades interconectadas hidráulicamente (PANM 2019). Nesses ambientes, a água percola entre as fraturas subverticais, sendo que as condições armazenamento, fluxo e permeabilidade vão depender, principalmente, da abertura, densidade e interconectividade das fraturas.

Na área de estudo, constitui o Sistema Aquífero Pelítico-Carbonático, que pode ser descrito por frequentes e complexas variações de fácies litológicas de rochas metassedimentares, com presença de interdigitações e intercalações entre rochas carbonáticas (calcários e dolomitos interestratificados), margas (carbonatos impuros), pelitos (meta-siltitos e ardósias), muitas vezes fraturadas, com descontinuidades incipientes de carstificação ou zonas pontuais de carstificações (Santos 2013). O sistema pode ser associado às rochas pelítico-carbonatadas das formações Serra da Saudade e Serra de Santa Helena, Grupo Bambuí. Salienta-se que, em função da natureza litológica, caso o meio apresente-se pouco fraturado, a Formação Serra de Santa Helena configura-se como um aquífero.

De modo geral, as relações de contato são bem definidas, sendo que grande parte da sua distribuição é definida por falhas inversas de direção geral NE. Na superfície, apresenta, com frequência, coberturas detríticas terciárias, aluviões quaternárias e sedimentos cretáceos da Formação Areado. Os valores dos parâmetros hidráulicos para esse aquífero, em média, são: transmissividade de 109 m²/d; capacidade específica de 2,23 m³/h/m; armazenamento específico de 82,3 (Santos 2013); condutividade elétrica de 427 μS/cm; e pH 8 (Mourão *et al.* 2001).

A recarga nesses sistemas é controlada em função dos seguintes parâmetros: i) grau de fraturamento e nível de carstificação, que podem facilitar a circulação de água no meio subterrâneo a partir do escoamento superficial até encontrar drenagens com controle estrutural ou estruturas de

dissolução; ii) em regiões onde esse sistema encontra-se recoberto por sedimentos, há contribuição para o aporte de água oriundo das infiltrações de águas das chuvas; iii) diretamente por águas pluviais que infiltram e abastecem os afloramentos.

3.4.3 Domínio Cárstico

O domínio cárstico regional é representado pelo Sistema Aquífero Carbonático, sendo composto por rochas neoproterozóicas, litoestratigraficamente relacionadas às fácies calcíticas da Formação Lagoa do Jacaré, do Grupo Bambuí. Os dolomitos e calcários dessa formação, de constituição microcristalina e maciços, apresentam permeabilidade primária praticamente nula. Dessa forma, o fluxo de água subterrânea e o armazenamento nesse domínio são dominados, exclusivamente, por porosidade terciária e permeabilidade secundária, originadas a partir de processos de dissolução química ao longo de descontinuidades, resultando em formas de cavidades aleatórias e irregulares que imprimem forte anisotropia (Mourão *et al.* 2001).

Geralmente, os afloramentos encontram-se em cotas relativamente baixas, próximos a vales e contrafortes das chapadas, onde podem estar recobertos por sedimentos terciários-quadernários e cretáceos de natureza arenosa, os quais funcionam como passagens verticais de águas pluviais de infiltração (PANM 2019). Comumente, os terrenos cársticos apresentam uma morfologia típica, anteriormente descritas no item 2.5.3, e que foram observadas em maior quantidade nas folhas Montes Claros e Capitão Enéas.

A recarga pode ocorrer a partir de infiltração direta (autogênica) em feições cársticas, ou indireta (alogênica), ou seja, por infiltração vertical descendente de aquíferos superiores, como os granulares. Os níveis de base podem ser representados por alguns trechos dos grandes rios que mostram significativas situações de efluência (restituição ao aquífero) ou influência (perda para o aquífero) (Mourão *op. cit.*).

Na região, esses aquíferos possuem grande importância, pois representa o sistema com maior capacidade de produção e, assim, serem a principal fonte de abastecimento público local. De acordo com CETEC (1984) e Souza (1995), a heterogeneidade desses aquíferos pode ser evidenciada quando analisados os variados parâmetros hidráulicos da área, como a transmissividade, que varia de 233 m²/d a 7700 m²/d, capacidade específica média em torno de 12,4 m³/h/m (Mourão *op. cit.*) e armazenamento específico de 458.

Na bacia hidrográfica do Vieira, em especial, o sistema Aquífero Cárstico é desenvolvido nos 120 metros iniciais da Formação Lagoa do Jacaré e, com base nas características topográficas e litológicas desta formação, é possível dividi-lo em dois comportamentos (ANA 2018):

a) Aquífero cárstico Inferior: está presente na porção leste da bacia em cotas baixas e topografia plana, sendo representado por uma alternância de calcários e metassiltitos, com carstificação discreta. A área urbana de Montes Claros situa-se nesta unidade;

b) Aquífero cárstico Superior: por ocupar a região oeste em cotas altas e topografia acidentada, caracteriza-se como a principal área de recarga da bacia. A litologia predominante é caracterizada por calcários escuros com grande diversidade de feições cársticas ao longo de todo pacote.

Estudos geofísicos indicam que os calcários da Formação Lagoa do Jacaré Superior apresentam maior expressividade aquífera do que os calcários e metassiltitos da porção inferior. As vazões (Q), nesse aquífero, variam entre 20 e 30 m³/h. Em zonas isoladas, onde há forte influência de estruturas alinhadas nas direções NNE-SSW, NW-SE e E-W, observa-se vazões acima de 40 m³/h, podendo chegar a 100 m³/h (ANA *op. cit.*). Corroborando com esses dados, Velásquez *et al.* (2009) identificou um fluxo preferencial das águas subterrâneas na região de Jaíba/MG que, levando em consideração os níveis d'água dos poços profundos analisados, tendem para NE e NW, e o rio Verde Grande seria o exutório natural. Ademais, PANM *op. cit.* identificou que as principais direções de fraturamento no aquífero cárstico seguem as direções N40-50W, N30-40W, N40-50E e N30-40E, as quais podem ser correlacionadas às direções regionais de descontinuidades do Grupo Bambuí.

Enquanto isso, na bacia hidrográfica do Riachão, análises morfoestruturais e isotópicas identificaram a existência de um fluxo subterrâneo regional no sentido NE ao longo do acamamento das rochas pelítico-carbonatadas e carbonatadas, tendo como nível de base o Rio Verde Grande. Além disso, registrou-se que o escoamento natural de água subterrânea, em maiores profundidades no Sistema Aquífero Cárstico, origina-se a SW da Lagoa Tiririca, até a zona de descarga natural (IGAM 2007).

3.4.4 Análise de Produtividade Local

Com base na metodologia de Diniz *op. cit.*, analisou-se os testes de bombeamento de 16 poços tubulares na área de estudo, sendo possível estimar a produtividade aquífera dos sistemas aquíferos, como apresentada na Tabela 3.3 e, em mapa, na Figura 3.8. Verifica-se, a partir do exposto, que o sistema aquífero com maior valor de Q/s e, conseqüentemente, de T , é o carbonático, seguido de arenítico, pelítico-carbonático e coberturas detríticas e aluvial. Em relação a produtividade aquífera dos poços, um mesmo sistema pode ser classificado entre a Classe 2 a Classe 5, o que poderia indicar a forte anisotropia do sistema. Apesar disso, sob condições hidrogeológicas específicas, considera-se que os sistemas apresentam elevada taxa de produtividade (PANM *op. cit.*).

Corroborando com esta informação, CETEC (1984) identificou, a partir de testes de bombeamento de 10 poços perfurados no Sistema Aquífero Pelítico-Carbonático, que os valores de T variam entre $2,7 \cdot 10^{-5}$ a $5,85 \cdot 10^{-3}$ m²/s. Em relação à T nos Domínios Cárstico e Cárstico-Fissural, o parâmetro pode variar entre $2,7 \cdot 10^{-3}$ e $9 \cdot 10^{-2}$ m²/s, o que pode indicar a variabilidade deste parâmetro em função do grau de carstificação e outras condições geométricas em que ocorrem.

Em relação ao Domínio Granular, o Sistema Aquífero de Coberturas Detrítica e Aluvial se enquadrou na Classe 5, enquanto o Sistema Arenítico ocupou a Classe 3. Porém, deve-se considerar que estes aquíferos podem apresentar valores variados de condutividade hidráulica e porosidade eficaz em função de suas características granulométricas (CETEC *op. cit.*).

Tabela 3.3 - Domínios hidrogeológicos e Sistemas Aquíferos com as respectivas classes de produtividade da bacia hidrogeológica do rio Vieira. Fonte: PANM (2019).

Domínio Hidrogeológico	Sistema Aquífero	Área (%)	Litologia geral	Estratigrafia	Medianas		Produtividade	Classe
					T (m ² /s)	Q/s (m ³ /h/m)		
Granular	Arenítico	15	Rochas areníticas	Grupo Urucuia	3,6E ⁻⁴ *	7,7E ⁻¹	MODERADA. Fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades, irrigação em áreas restritas.	3
	Cobertura Detrítica e aluvial	20	Areais, siltes e argilas, areias de depósitos aluviais	Depósitos de cobertura terciária-quaternária	1,7E ⁻⁶ *	2,6E ⁻²	GERALMENTE MUITO BAIXA A LOCALMENTE BAIXA. Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos.	5
Cárstico-Fissural	Pelítico-Carbonático	35	Unidades pelíticas-carbonatadas	Formações Serra da Saudade e Serra de Santa Helena	5,4E ⁻⁵	4,7E ⁻¹	GERALMENTE BAIXA E LOCALMENTE MODERADA. Fornecimento de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado.	4
Cárstico	Carbonático	30	Calcários e dolomitos	Formação Lagoa do Jacaré	4,3E ⁻⁴	1,6	MODERADA. Fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades, irrigação em áreas restritas	2

*Valores com base nos 416 poços tubulares localizados no limite de estudo realizado por PANM (2019).

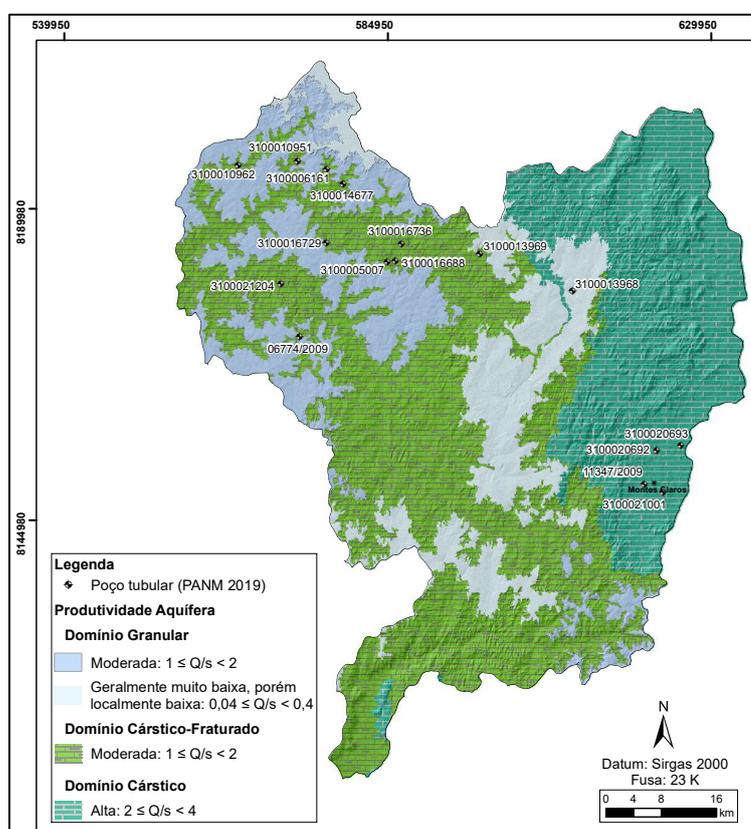


Figura 3.8 - Mapa de produtividade aquífera dos domínios hidrogeológicos na área da bacia hidrogeológica do rio Vieira. Fonte: Projeto Águas do Norte de Minas Gerais (2019).

3.5 GESTÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

No que tange o abastecimento da cidade de Montes Claros, a concessionária responsável é a COPASA, cujos principal sistema de captação é o Sistema Verde Grande, que capta água da Barragem de Juramento, responsável por abastecer cerca de 65% da cidade (Borges 2007).

A empresa, em 2017, por conta do aumento significativo do consumo, estendeu sua rede de captação para o rio Pacuí, na cidade de Coração de Jesus, além de perfurar 22 poços tubulares e diminuir as perdas na tubulação (COPASA 2016). Atualmente, existem 1423 cadastrados no Sistemas de Informações de Águas Subterrâneas da CPRM (SIAGAS), dentro da área de estudo, sendo 897 privados e 526 de domínio público. Desse total, 420 estão instalados apenas na área urbana de Montes Claros (Figura 3.9). Sabe-se, ainda, que além dos instrumentos legalizados e apresentados neste estudo, existem também aqueles poços clandestinos que não seguem as orientações estaduais (ANA 2018).

No caso particular da bacia hidrográfica do rio Vieira, ANA *op. cit.* comparou a recarga na bacia, cerca de 7,2% da pluviometria média anual, considerada como 1.100 mm, à vazão explorada dos poços cadastrados no banco de dados do SIAGAS. Pode constatar, nesta análise, que as condições de exploração tendem à exaustão da reserva subterrânea, recomendando-se, ainda, que qualquer incremento de descarga seja realizado com cautela.

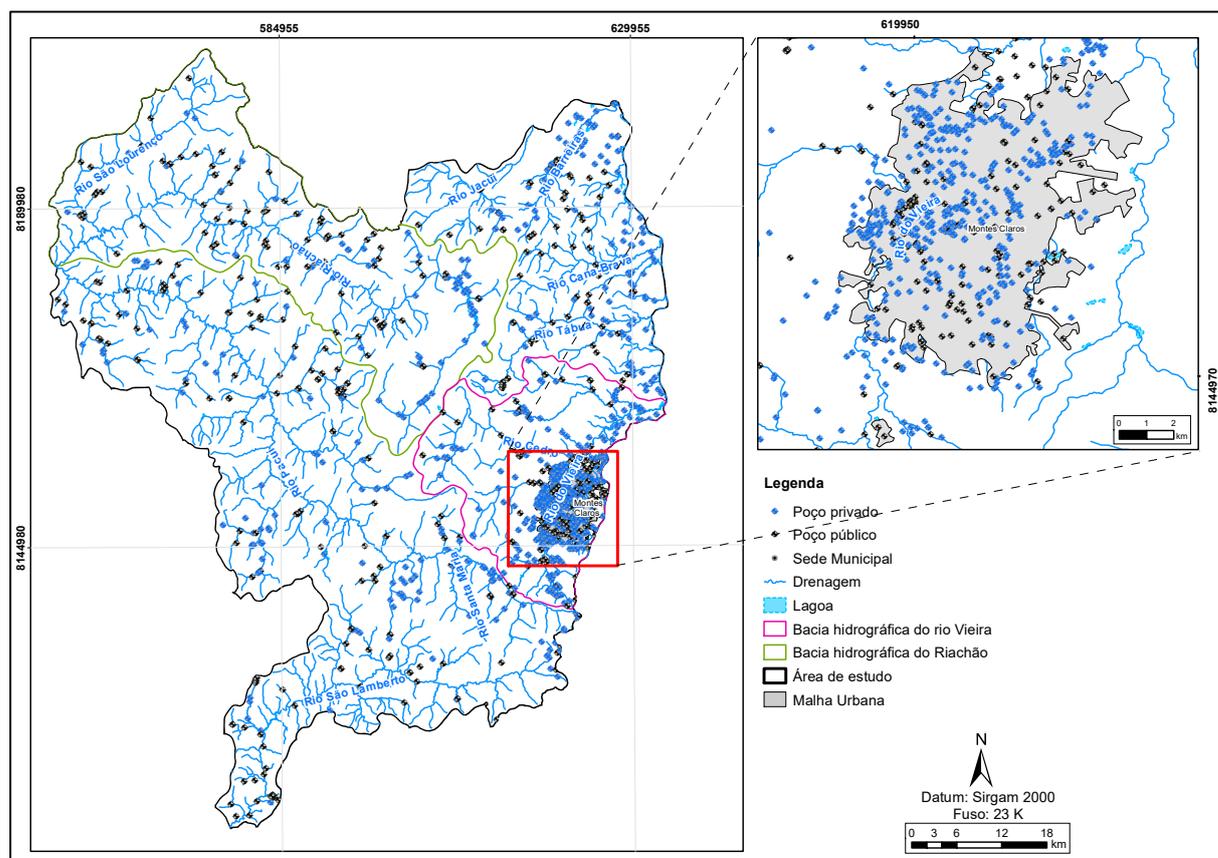


Figura 3.9 - Distribuição dos poços, públicos e privados e cadastrados na área de estudo.

Com isso, é possível constatar que Montes Claros apresenta déficit hídrico subterrâneo em decorrência do elevado número de poços tubulares que explora água em regime superior à recarga do

aquífero, configurando um salto negativo em quase toda a área, como mostra a Tabela 3.4 e Figura 3.10 abaixo. Salienta-se, no entanto, que o estudo mencionado não considerou a recarga urbana, gerada a partir das perdas das redes de abastecimento de água e de esgoto.

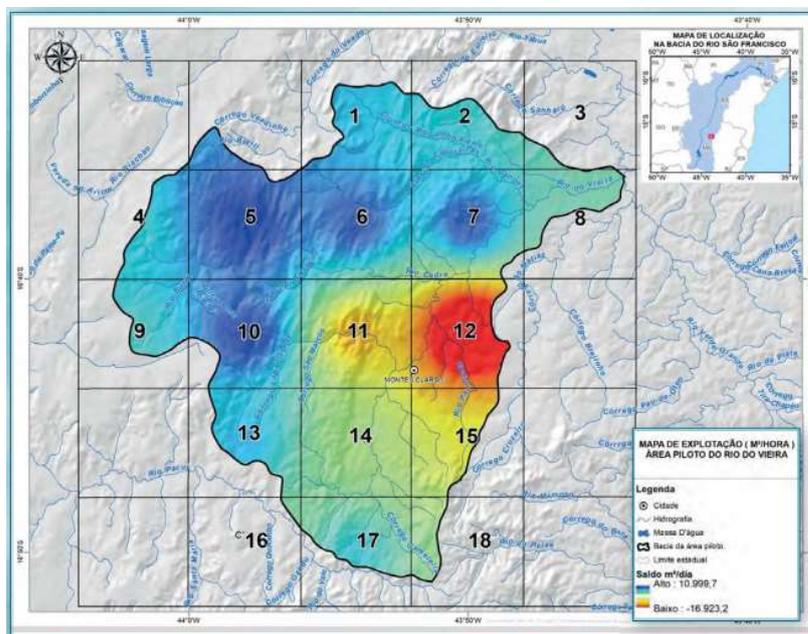


Figura 3.10 - Zoneamento da exploração do aquífero Bambuí na área piloto da Bacia do Rio do Vieira. Fonte: ANA (2018).

Tabela 3.4 - Correlação entre o saldo hídrico e o número de poços distribuídos na bacia hidrográfica do rio Vieira, sem considerar os prováveis poços clandestinos (sem outorga e não cadastrados). Fonte: ANA (2018).

Célula	Número de poços	Área (km ²)	Recarga (m ³ /dia)	Exploração (m ³ /dia)	Saldo (m ³ /dia)
1	3	29,1	6.315	293	6.023
2	9	28	6.074	878	5.196
3	2	3,8	833	195	638
4	1	22,8	4.956	98	4.858
5	3	52	11.293	293	11.000
6	26	53	11.491	2.537	8.954
7	25	51,6	11.205	2.439	8.766
8	13	20,8	4.517	1.268	3.249
9	3	20,3	4.408	293	4.115
10	3	47,6	10.328	293	10.036
11	158	53	11.491	15.416	-3.926
12	265	41,1	8.925	25.857	-16.932
13	3	30,5	6.622	293	6.330
14	107	53	11.491	10.440	1.050
15	85	30,2	6.557	8.294	-1.737
16	1	1,4	307	98	209
17	19	30,8	6.688	1.854	4.834
18	5	10	2.171	488	1.683
	731	579	125.672	71.327	54.346

A escolha para locação de poços em terrenos heterogêneos e complexos, como o carste, deve ser realizada com auxílio de ferramentas de pesquisa capazes de aumentar a probabilidade de sucesso da perfuração. Assim, este trabalho foi dividido em sete diferentes etapas (Figura 4.1), sendo elas: revisão bibliográfica, levantamento de dados, elaboração de mapas temáticos, análise dos resultados, integração dos mapas, discussão dos resultados e conclusões.

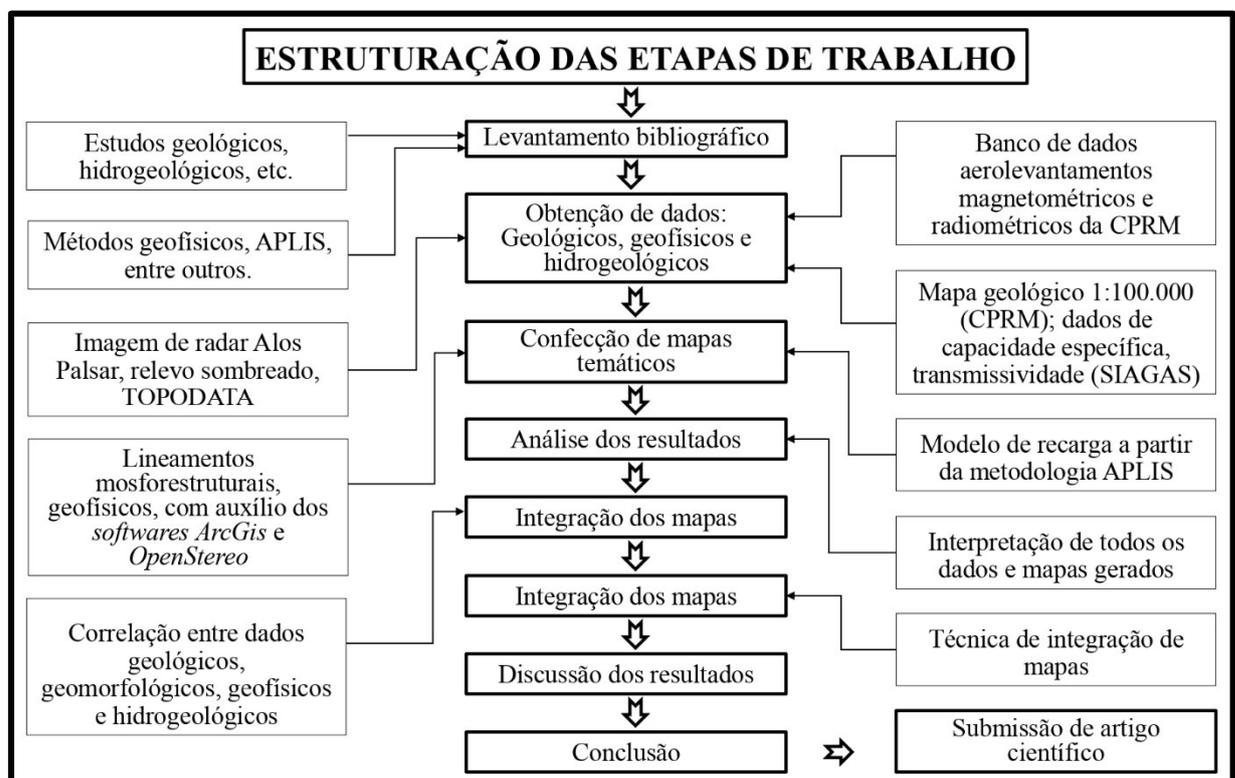


Figura 4.1 - Fluxograma exibindo a metodologia do trabalho.

4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

A revisão bibliográfica serviu de fundamentação teórica para o trabalho. Diversos dados sobre a área de estudo, como aspectos fisiográficos (clima, relevo, vegetação e pluviometria), uso e ocupação do solo e geologia regional, foram compilados para ajudar na interpretação do sistema hidrogeológico local e do fluxo de água subterrânea.

O limite da bacia hidrogeológica e do rio Vieira, bem como os limites das bacias hidrográficas dos rios Riachão e Vieira, foram fornecidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). A topografia do terreno foi obtida por meio do Modelo Digital de Elevação (MDE) *Alos Palsar*, extraído gratuitamente do site *Alaska Satellite Facility*, com resolução espacial de 12,5 x 12,5 m. A partir do MDE, foi possível confeccionar o mapa de declividade do terreno. As imagens geofísicas utilizadas correspondem a arquivos monopolar de Amplitude do Sinal Analítico (ASA), obtidas do banco de dados da CODEMIG (Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais) e CPRM, as quais puderam auxiliar na identificação de lineamentos localizados em subsuperfície.

No que tange o contexto geológico, foram utilizados cinco relatórios, cinco mapas técnicos e arquivos *shapefiles* das plataformas GeoBank (CPRM) e CODEMIG, em escala 1:100.000, mencionados no item 3.1. As informações sobre as estruturas cársticas, como localização de entradas de cavernas, dolinas e sumidouros puderam ser coletadas do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV).

A maioria dos dados geológicos em profundidade, como tipo de contato, espessura e parâmetros hidrodinâmicos dos litotipos, foi obtida por meio do SIAGAS/CPRM – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. Ao todo, foram encontrados 1419 poços cadastrados na bacia, dos quais 207 possuem descrição geológica; 22 apresentam dados de transmissividade (T); e 694 possuem valores de capacidade específica (Q/s).

Para a etapa de validação dos resultados, utilizou-se os dados de Q/s e T , uma vez que funcionam como parâmetros de calibração e validam a consistência dos mapas finais. Contudo, a fim de tornar as interpretações mais próximas da realidade e diminuir as subjetividades do método, foi adotado uma seleção por data de coleta dos dados, de forma que apenas os valores monitorados a partir de 2000 fossem manipulados.

4.2 SENSORIAMENTO REMOTO – SIG

As técnicas de sensoriamento remoto (SIG) são bastante utilizadas na hidrogeologia, principalmente para análises e interpretação de traços típicos, como padrões de drenagem, diferenças topográficas bruscas, talvegues, cristas e alinhamento de lagoas, bem como detecção de discontinuidades e feições geológicas/cársticas, como falhas e dolinas. A partir da identificação dessas estruturas, é possível inferir as principais direções do fluxo subterrâneo, e, assim, indicar a melhor posição para instalação de poços de bombeamento, uma vez que instrumentos alocados sobre essas estruturas, tendem a ser mais produtivos (Singhal & Gupta 1999, Rocha 2005).

Embora seja indicado, também, reconhecimento das estruturas em campo (Feitosa *et al.* 2008), não existem barreiras para a aplicação do geoprocessamento e a combinação com os sistemas de informações geográficas (SIG), possibilita a elaboração de modelos espaciais mais sofisticados e representativos. Para este trabalho, todos os produtos foram elaborados no Datum Sirgas 2000, UTM 23S e em escala 1:100.000.

4.2.1 Mapa de lineamentos

Nesta pesquisa, foi realizado indiretamente o reconhecimento de lineamentos morfoestruturais, magnetométricos e radiométricos. Nas imagens geofísicas, buscou-se por lineamentos na borda ou centro das anomalias, uma vez que essas estruturas poderiam indicar as principais direções de deformações dos maciços. Após a integração de todas as informações existentes e as análises feitas na plataforma SIG, foi possível elaborar mapas temáticos para a área, descritos abaixo.

Os lineamentos morfoestruturais foram traçados, manualmente, com base no modelo digital de terreno (MDE) e *shapefile* de hidrografia sobrepostos à imagem de relevo sombreada, gerada a partir da ferramenta *Hillshade* do *ArcToolbox*. Nessa etapa, buscou-se por feições geológicas que pudessem ser notadas em superfície, como feições de drenagens retilíneas, diferenças topográficas bruscas, talwegues e cristas, vales e cristas alinhados.

Em relação aos lineamentos radiométricos, utilizou-se o mapa temático de radioisótopo tório (Th) como base principal, uma vez que este elemento apresenta maior energia sobre os demais (urânio e potássio), sem influência destes. Como consequência, as anomalias do mapa de concentração absoluta de Th associam-se de maneira mais coerente para o reconhecimento das estruturas lineares subsuperficiais. De forma auxiliar, foram utilizados outros mapas temáticos, sendo eles: canal de potássio (K), canal de urânio (U) e ternário RGB (Gomes 2020).

Para os lineamentos magnetométricos, utilizou-se o mapa temático Amplitude do Sinal Analítico (ASA), em função do comportamento monopolar capaz de exibir as anomalias de maneira nítida e precisa, facilitando a interpretação dos dados. Ademais, puderam ser manipulados outros mapas temáticos como ferramentas auxiliares, sendo eles: campo magnético anômalo (CMA), primeira derivada horizontal (DX1 e DY1) e primeira derivada vertical (DZ1) (Gomes 2020). Assim como os lineamentos morfoestruturais, os lineamentos geofísicos foram traçados manualmente, sobre as bordas ou centros das anomalias.

Posteriormente, esses lineamentos foram agrupados e gerados três mapas de densidade de lineamentos. Para isso, foi utilizada a ferramenta *Kernel Density* do *ArcGIS 10.7*, considerando que cada estrutura linear tivesse raio de influência (*search radius*) de 3000 m, valor (*population*) igual a 1. O método aplicado foi o “Planar”, por ser uma boa adaptação em relação ao tamanho da área e escala de trabalho. Em cada célula, a densidade foi calculada adicionando-se os valores de todas as superfícies que se sobrepõem, derivando na unidade km/km^2 de lineamentos.

Em seguida, foram retirados os azimutes das linhas com auxílio da ferramenta *AzimuthFinder*, com base na metodologia de Queiroz *et al.* (2014). Com isso, as estruturas morfoestruturais e geofísicas foram interpretadas em diagramas de roseta, utilizando o *software OpenStereo*, a partir da atribuição de pesos (método de comprimento), o que confere maior representatividade às estruturas mais longas.

4.2.2 Mapa de feições cársticas

Uma vez que dolinas, lagoas, cavernas e sumidouros são indicadores de carstificação, elaborou-se um mapa de feições cársticas da área estudada. Para isso, foram compilados dados de estruturas cársticas típicas da região, como localizações das entradas de cavernas, dolinas e sumidouros em plataformas digitais. A fim de complementar esses dados, outras estruturas puderam ser reconhecidas com o auxílio do programa Google Earth, em escala fixa em 1:100.000, a partir da metodologia de Pardo-Igúzquiza (2013), de ambientes cársticos.

Todas as informações obtidas foram, então, transformadas em um único arquivo *shapefile* de pontos. Assim, similarmente ao que foi feito para os mapas de densidade de lineamentos, utilizou-se o método de estimativa de densidade *Kernel* do *ArcGIS 10.7*, mantendo o método “Planar”, valor (*Population*) de 1, mas o raio de influência (*search radius*) foi alterado para 20000 m. Como o arquivo de origem é baseado em pontos, o resultado do cálculo é a unidade pontos/km².

4.2.3 Mapa de recarga

Para a elaboração do mapa de recarga da bacia de estudo, optou-se por utilizar o método APLIS (Andreo *et al.* 2007), um método paramétrico que permite estimar a taxa média de recarga a partir das principais variáveis que influenciem na recarga: altitude (A), declividade (P), litologia (L), existência ou não de zonas de infiltração preferencial (I) e tipo de solo (S). Essa metodologia, especialmente aplicada em aquíferos carbonáticos, baseia-se na classificação de categorias ou intervalos que alcançam valores de 1 (mínima influência na recarga) a 10 (máxima influência) (Tabela 4.1, Figura 4.2).

O mapa de fator de correção (Fh) também foi utilizado a fim de diferenciar as regiões aquíferas dos aquitardes. Assim, as regiões onde há calcário ou sedimento inconsolidado, atribuiu-se peso 1, enquanto as áreas onde ocorre as formações Serra de Santa Helena e Serra da Saudade, receberam peso 0,1. Dessa forma, além de estimar a taxa de recarga, o mapa final forneceu, mesmo que indiretamente, informações de fatores, como feições cársticas, litologia, uso e ocupação do solo, lineamentos e declividade.

A partir dos mapas devidamente atribuídos dos pesos e considerando as características do aquífero cárstico, como grau de fraturamento, feições cársticas (entradas de cavernas, sumidouros, dolinas, lagoas) e o tipo de recarga (*e.g.* autogênicas em sumidouros ou cavernas), foi possível utilizar a ferramenta *Raster Calculator*, do *ArcGIS 10.7*, para aplicar a fórmula da Equação 2:

Equação 2

$$Recarga = \frac{A + P + 3L + 2I + S}{0,9} * Fh$$

No *software ArcGis*, os lineamentos morfoestruturais e feições cársticas, traçados segundos os itens 4.2.1 e 4.2.2, respectivamente, foram convertidos em *shapefiles* de polígonos. Para isso, utilizou-se a ferramenta *Buffer*, com uma distância estipulada em 250 m. Em seguida, foi utilizada a ferramenta *Erase*,

para recortar a área de estudo conforme os polígonos gerados no passo anterior. Por fim, utilizando a função de Edição e as funções “Copy” e “Paste”, foi possível agrupar a área da bacia “recortada” com os “buffers”.

Tabela 4.1 - Distribuição dos pesos para elaboração do mapa de recarga.

Altitude (m)		Declividade (%)		Litologia	Feições Cársticas e Lineamentos	Solos		Fator de Correção			
Distribuição dos Pesos											
< 550	1	< 3	10	Calcário	8	Cavernas	10	Classe A	9	Calcário	1
550 - 600	2	3 - 8	9	Metapelito	1	Sumidouros	10	Classe B	7	Metapelitos	0,1
600 - 650	3	8 - 13	8			Lagoas	5	Classe C	5		
650 - 700	4	13 - 20	5	Metassilito	1	Dolinas	10	Classe D	2	Sedimentos inconsolidados	1
700 - 750	5	20 - 45	3			Lineamentos	5	Área urbana	5		
750 - 800	6	>45	1	Sedimento Inconsolidado	4	Feições Identificadas - Pardo-Igúzquiza (2013)	5				
800 - 850	7										
850 - 900	8										
900 - 950	9										
> 950	10										

É importante mencionar que esse método foi elaborado sob condições de clima mediterrâneo, e tem sido utilizado em diversos estudos na Europa Meridional, notadamente na Espanha, como os trabalhos realizados em contextos carbonáticos por López-Geta *et al.* (2004) e Martos-Rosillo *et al.* (2010), cujas regiões de estudo apresentam precipitações médias anuais que variam de 500 a 1300 mm. No Brasil, o método foi utilizado por autores como Souza & Campos (2001), Gaspar *et al.* (2007), Fiori *et al.* (2010), Soares (2012), Paiva *et al.* (2015) e Gomes (2019), os quais realizaram adaptações em função de especificidades em cada área de estudo, além da disponibilidade de dados para aplicação da metodologia.

Similarmente, para se aplicar o método APLIS neste presente estudo, foi preciso ponderar algumas condições e estimar, de maneira coerente a taxa de recarga local. A primeira adaptação realizada foi em relação ao “Solo”, uma vez que os mapeamentos na região apresentam escalas bastante regionais, prejudicando as análises. Assim, optou-se por substituí-lo pelo “Mapa Hidrológico de Solos” (PANM 2019). Ainda em relação ao parâmetro “Solo”, considerou-se que as significativas perdas de água pelas adutoras na região metropolitana de Montes Claros (cerca de 35 - 40%), superavam as condições de impermeabilização do solo, as quais reduzem as taxas de recarga. Por isso, esta zona passou a ser classificada com um peso maior do que normalmente utiliza-se para áreas urbanas.

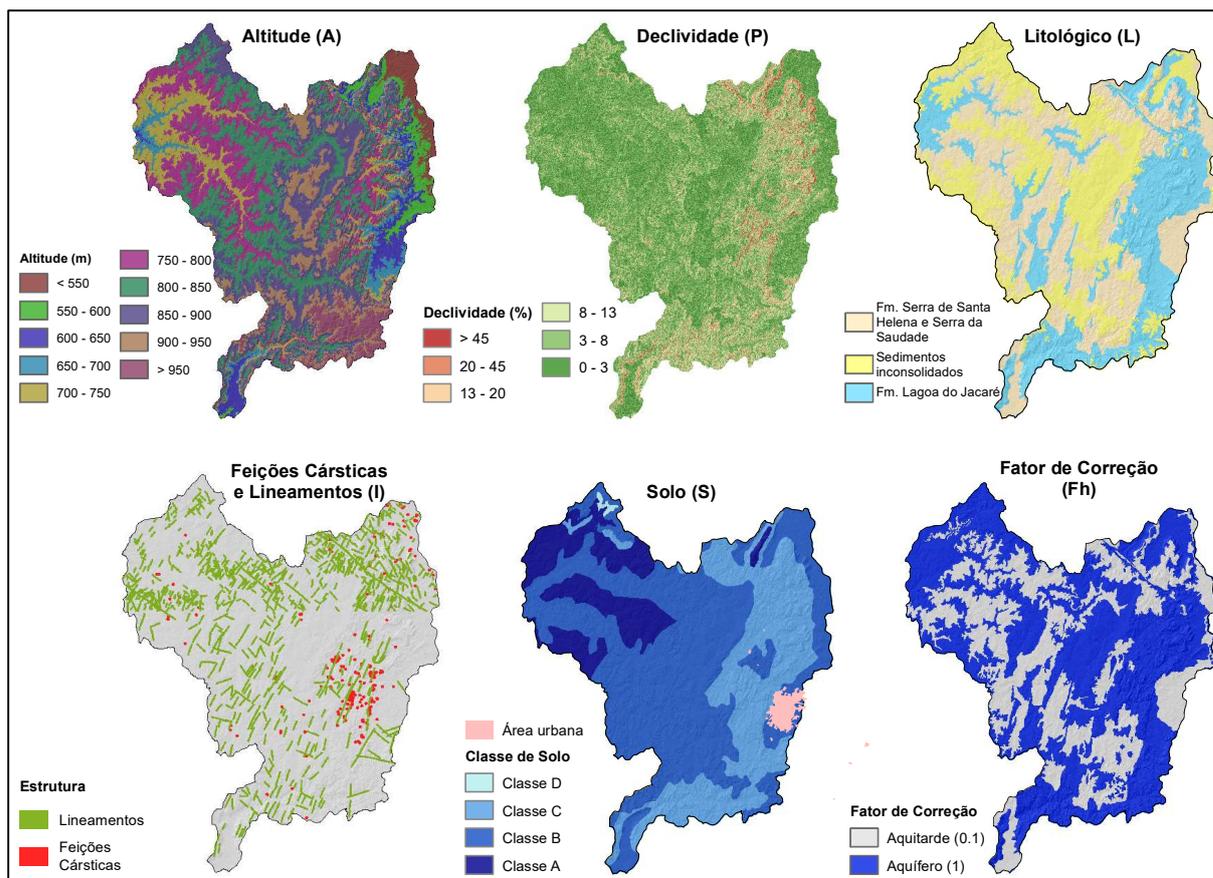


Figura 4.2 - Critérios utilizados na metodologia APLIS para elaboração do mapa de recarga.

4.2.4 Mapa de favorabilidade hidrogeológica

Para a elaboração do mapa de favorabilidade hidrogeológica (FH), foi preciso selecionar os fatores mais importantes que influenciam no comportamento hídrico do aquífero cárstico e, assim, realizar uma análise paramétrica por meio de classificação em diferentes atribuições de pesos, interpolações e magnitudes. Métodos semelhantes foram utilizados por Kim *et al.* (2007), Sener & Davraz (2013), Shekhar & Pandey (2015), Zhang *et al.* (2016), Morgan (2017), Patra *et al.* (2018), Brito (2018), Oliveira (2019) e Gomes (2019).

Após separar todos os dados desenvolvidos para este estudo, estabeleceu-se quatro importantes premissas: 1) os lineamentos (geofísicos e morfoestruturais) estão diretamente ligados ao contexto geológico-estrutural da bacia de estudo ao representarem estruturas superficiais e/ou profundas; 2) o fluxo de água subterrânea ocorre, na maior parte das vezes, através de condutos cársticos gerados pela interconexão de estruturas subverticais e planos de acamamento sub-horizontais fraturados; 3) as dolinas, cavernas, lagoas e sumidouros são indicadores de carstificação e seu alinhamento pode estar associado à história geológica da área; e 4) o mapa litológico retrata a litologia aflorante e não necessariamente a unidade captada pelos poços da região.

Feito isso, buscou-se selecionar os parâmetros que satisfizessem tais premissas e que indicassem as áreas com maior densidade e conexão de fraturas e, conseqüentemente, mais carstificadas e fraturadas, seja em superfície ou em profundidade. Com isso, seria possível estimar as áreas favoráveis à exploração, com bons índices de recarga, percolação e transmissão de água subterrânea, resultando em poços produtivos e que não secassem rapidamente.

Os parâmetros selecionados, portanto, foram: i) mapa de densidade dos lineamentos (morfoestruturais e geofísicos); ii) mapa de densidade das feições cársticas; iii) mapa dos sistemas aquíferos; iv) mapa de declividade; e v) mapa de recarga. Todos esses mapas foram classificados de acordo com a Tabela 4.2, abaixo.

Tabela 4.2: Atribuição de pesos em relação aos mapas e subcritérios utilizados.

Densidade de Lineamentos (km/km ²)	Densidade de feições cársticas (ponto/km ²)	Recarga (%)	Declividade (%)	Sistemas Aquíferos	Peso	Classificação
< 0,6	< 1,0	< 4,6	> 20	-	0	Muito Baixo
0,6 – 1,6	1,0 – 2,0	4,6 – 33,1	13 - 20	Pelítico- Carbonático	1	Baixo
1,6 – 2,7	2,0 – 3,0	33,1 – 39,8	8 - 13	Coberturas detríticas e aluvionais	2	Moderado
2,7 – 4,2	3,0 – 4,1	39,8 – 49,8	3 - 8	Arenítico	3	Alto
> 4,2	> 4,1	> 49,8	< 3	Carbonático	4	Muito Alto
0,35	0,2	0,2	1	1	Fator de Correção	

Além disso, foi atribuído um fator de calibração para cada parâmetro, utilizando como base os 93 valores de capacidade específica e 16 de transmissividade dos poços, de forma que a interpolação dos mapas gerasse um resultado visualmente adequado com os parâmetros e, assim, indicar a probabilidade de um local conter água subterrânea e resultar em poços produtivos. Em outras palavras, as regiões de maior favorabilidade hidrogeológica devem coincidir com a localização de poços com maior transmissividade e capacidade específica, enquanto áreas pouco favoráveis abrigam poços pouco produtivos.

Por fim, com o método *Equals Intervals*, do ArcGis, o mapa de favorabilidade hidrogeológica pode ser classificado em 4 classes, variando de muito baixo a muito alto. Em complemento, a fim de garantir sua harmonização com a produtividade dos poços de forma numérica, um gráfico de dispersão e uma matriz foram elaborados com a relação dos valores de transmissividade e capacidade específica com a classificação de favorabilidade.

A partir da integração dos mapas temáticos, 1) feições cársticas, 2) declividade, 3) litologia, e densidades de lineamentos 4) morfoestruturais, 5) magnetométricos e 6) radiométricos, foi obtido o mapa de potencial hídrico subterrâneo. A seguir, são apresentados os mapas elaborados e demais informações importantes para o processo de integração.

5.1 MAPA DE LINEAMENTOS

A partir do modelo digital de elevação (MDE) e da imagem de relevo sombreado, foram traçados 2734 lineamentos morfoestruturais, os quais correspondem, majoritariamente, a feições retilíneas de drenagens, cristas e vales alinhados, que, juntas, compõem a estrutura do relevo atual da região e indicam, indiretamente, descontinuidades superficiais do aquífero. O arquivo *shapefile* de lineamentos, posteriormente, foi utilizado para geração do respectivo diagrama de roseta, o qual evidencia que os lineamentos, em geral, apresentam a direção preferencial NE-SW (Figura 5.1a, b).

Os 475 lineamentos magnetométricos presentes na bacia hidrogeológica do rio Vieira foram identificados com base nos mapas temáticos Amplitude do Sinal Analítico (ASA), campo magnético anômalo (CMA), primeira derivada horizontal (DX1 e DY1) e primeira derivada vertical (DZ1) (Gomes 2020). O diagrama de roseta ressalta duas direções principais: NE-SW e ENE-WSW, e outra NNE-SSW secundária (Figura 5.1c). Por fim, o mapa de densidade de lineamentos magnetométricos ressalta as possíveis zonas com maior ocorrência de fraturas profundas (Figura 5.1d).

Os mapas temáticos de radioisótopo tório (Th), canal de potássio (K), canal de urânio (U) e ternário RGB (Gomes 2020), indicaram 224 lineamentos radiométricos na bacia hidrogeológica do rio Vieira. As direções preferenciais, reveladas pelo diagrama de roseta, são NE-SW e NNE-SSW, como preferencial, e direções WNW-ESE e E-W, secundárias (Figura 5.1e). O mapa de densidade de lineamentos radiométricos destaca as regiões com maiores concentrações de estruturas subsuperficiais, ou seja, descontinuidades geológicas pouco profundas, aflorantes ou não à superfície, que podem facilitar a recarga e circulação de água no aquífero (Figura 5.1f).

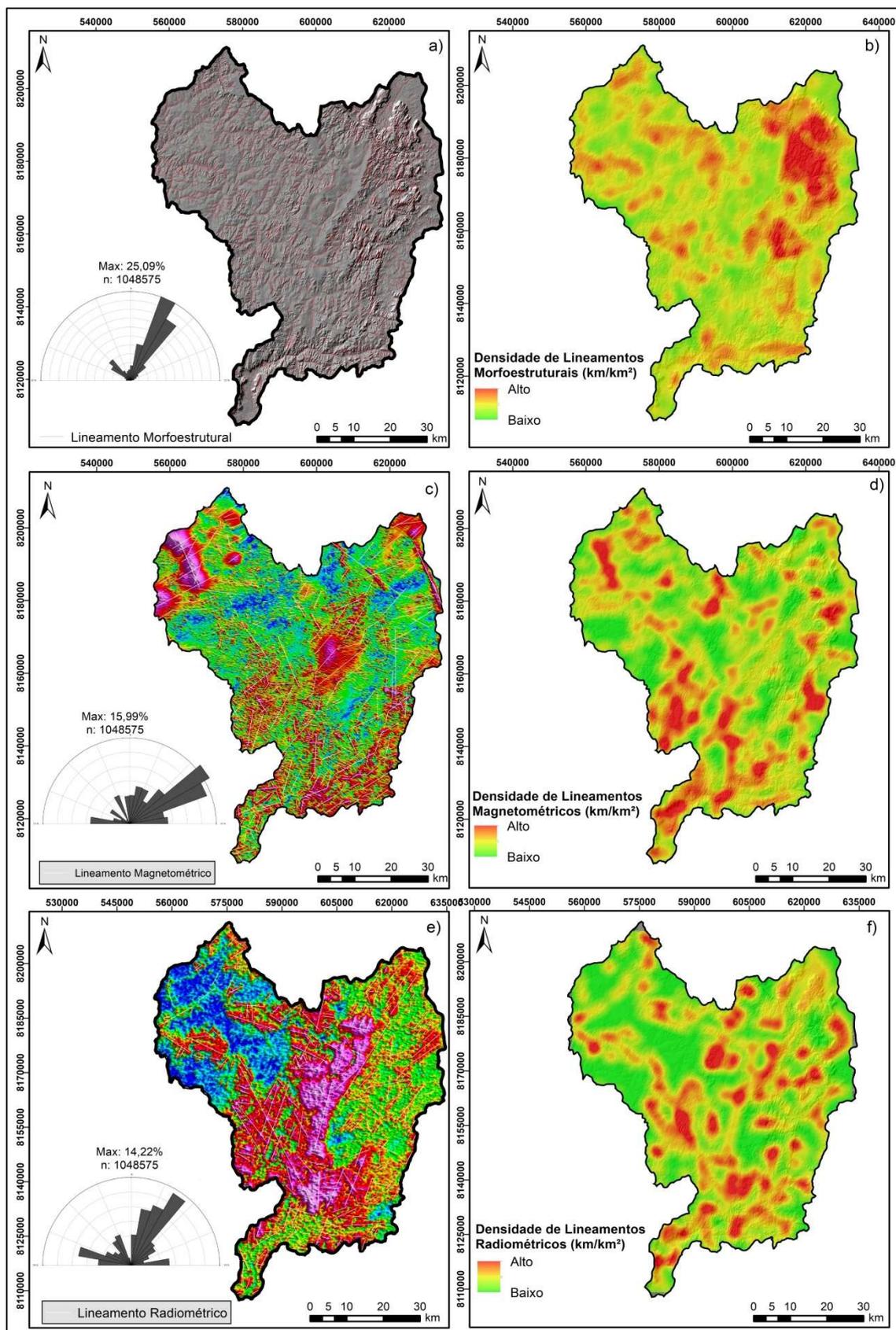


Figura 5.1 - Mapas de densidade gerados a partir dos três tipos de lineamentos da bacia hidrogeológica do rio Vieira: a) morfoestruturais; c) magnetométricos; d) radiométricos. O respectivo diagrama de roseta com indicação das direções preferenciais é indicado em cada mapa.

De modo geral, as direções NE-SW e NNE-SSW, evidenciadas nos três diagramas de roseta, podem ser correlacionadas com as famílias de fraturas extensionais presentes, principalmente, nas rochas calcárias da Formação Lagoa do Jacaré, geradas na primeira etapa de deformação do Grupo Bambuí (CPRM 2003). A direção N20-60E, mais expressiva nos lineamentos magnetométricos, corresponde a fraturas mapeadas em outras rochas do grupo, aos condutos de menor representatividade e, assim, podem indicar direções de fluxo subterrâneo (Auler 1994; Ribeiro *et al.* 2016).

Na porção deformada da área de estudo (domínio E), as direções NE-SW e NW-SE, associam-se a falhas indiscriminadas responsáveis por controlar as formas de relevo; enquanto a direção NNE-SSW indicam falhas normais. As direções ENE-WEW e E-W podem estar associadas à foliação principal e a zona de cisalhamento de baixo ângulo e com vergência para noroeste, presente no calcário e metapelitos.

Algumas outras direções próximas à NW e NE, por exemplo, podem representar desvios das estruturas ao encontrar rochas e reologias de diferentes competências ou terem sido rotacionadas com o basculamento de blocos durante a fase distensiva do Grupo Bambuí (CPRM 2003).

Com base nos mapas de densidade de lineamentos, percebe-se que as regiões em vermelho (maior densidade de lineamentos) apresentam uma boa correlação com as principais direções vistas nos diagramas de rosetas de estudos anteriores da região, mostrando que os lineamentos representam e correspondem às características do contexto geológico regional.

5.2 MAPA DE DECLIVIDADE

Os mapas de declividade representam a inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal (INPE), podendo ser apresentada em função de graus (variando de 0° a 90°), ou em porcentagem. Para este trabalho, o mapa de declividade foi obtido com base na imagem de radar *Alos Palsar*, utilizando as ferramentas *Slope* e *Reclassify* do *ArcGis* 10.7, para avaliar a influência da topografia sobre o comportamento hídrico local.

O mapa de declividade foi classificado segundo Ramalho-Filho & Beek (1995; Tabela 5.1), utilizando as quatro primeiras classes, uma vez que as demais subdivisões do relevo manifestaram-se de maneira pontual ao longo da bacia (Figura 5.2). No que tange ao processo de integração, a primeira divisão foi considerada a mais importante, seguida da segunda, terceira e quarta classe, respectivamente.

Tabela 5.1 - Classificação do relevo de acordo com Ramalho-Filho & Beek (1995).

Declividade (%)	Classe de Relevo
0 – 3	Plano
3 – 8	Suave ondulado
8 – 13	Moderadamente ondulado
13 – 20	Ondulado
20 – 45	Forte ondulado
45 - 75	Montanhoso

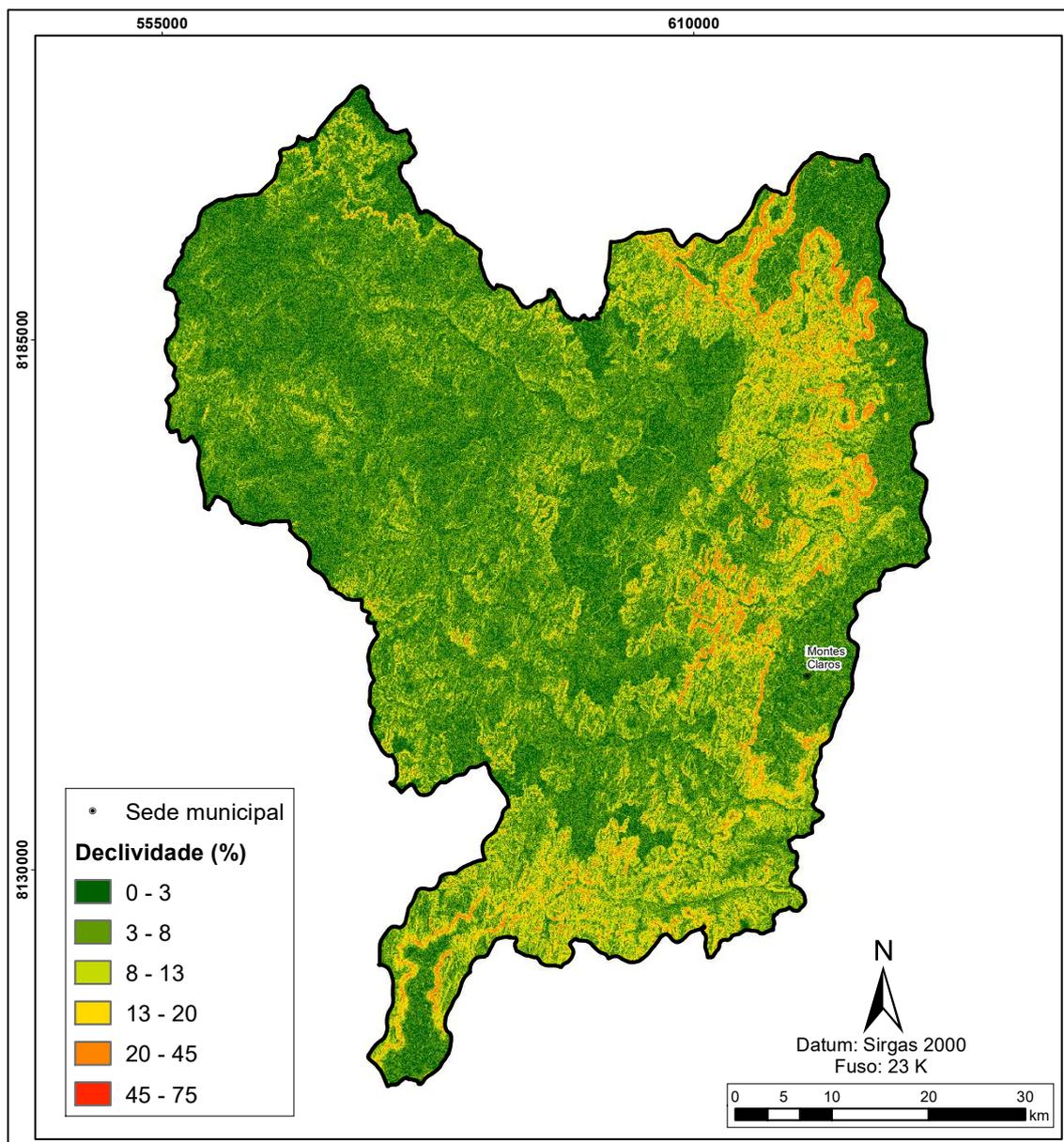


Figura 5.2 - Mapa de declividade da bacia hidrogeológica do rio Vieira, gerado a partir do modelo digital de elevação (MDE) da região.

Com o mapa de declividade, a análise foi feita com base na relação inversa entre inclinação e acúmulo de água no solo, uma vez que quanto mais íngreme for um terreno, mais rápido será o escoamento da água, superficial ou subterrâneo. O oposto ocorre em áreas planas, onde existe uma tendência de desenvolvimento de camadas espessas de solos tropicais, em função dos processos de intemperismo e lixiviação (Bui *et al.* 1989). Nesses lugares, os sedimentos pouco ou nada consolidados tendem a apresentar elevada permo-porosidade, resultando em maiores taxas de infiltração da água, podendo recarregar o aquífero.

5.3 MAPA DE FEIÇÕES CÁRSTICAS

Foram reconhecidas 390 estruturas cársticas típicas na área de estudo, as quais correspondem a dolinas, lagoas, cavernas e sumidouros. Com base nesses dados, foi elaborado o mapa de densidade de feições cársticas (Figura 5.3), onde é observada a maior aglomeração das cavidades naturais nas porções noroeste e oeste da cidade de Montes Claros, em um raio de até 20 km do município.

A aglomeração dessas estruturas pode indicar zonas intensamente carstificadas, as quais podem conectar o aquífero cárstico com a superfície. Associando esses dados com a geologia estrutural, nota-se que essas feições seguem a direção dos lineamentos morfoestruturais próximos, ou seja, de uma forma geral, é viável concluir que as áreas carstificadas são as regiões do aquífero com maior condutividade hidráulica, onde é transmitida grande quantidade de água.

Por meio da Figura 5.3, percebe-se que as estruturas presentes na bacia hidrogeológica do rio Vieira estão dispostas de acordo com o *trend* regional de direção principal NE-SW, e outra NW-SE, de forma secundária. Corroborando com a interpretação, PANM (2019) identificou um padrão de alinhamento de feições cársticas (dolinas) ao longo de fraturas, o qual ocorre, preferencialmente, nas direções N40-50W e N30-40E.

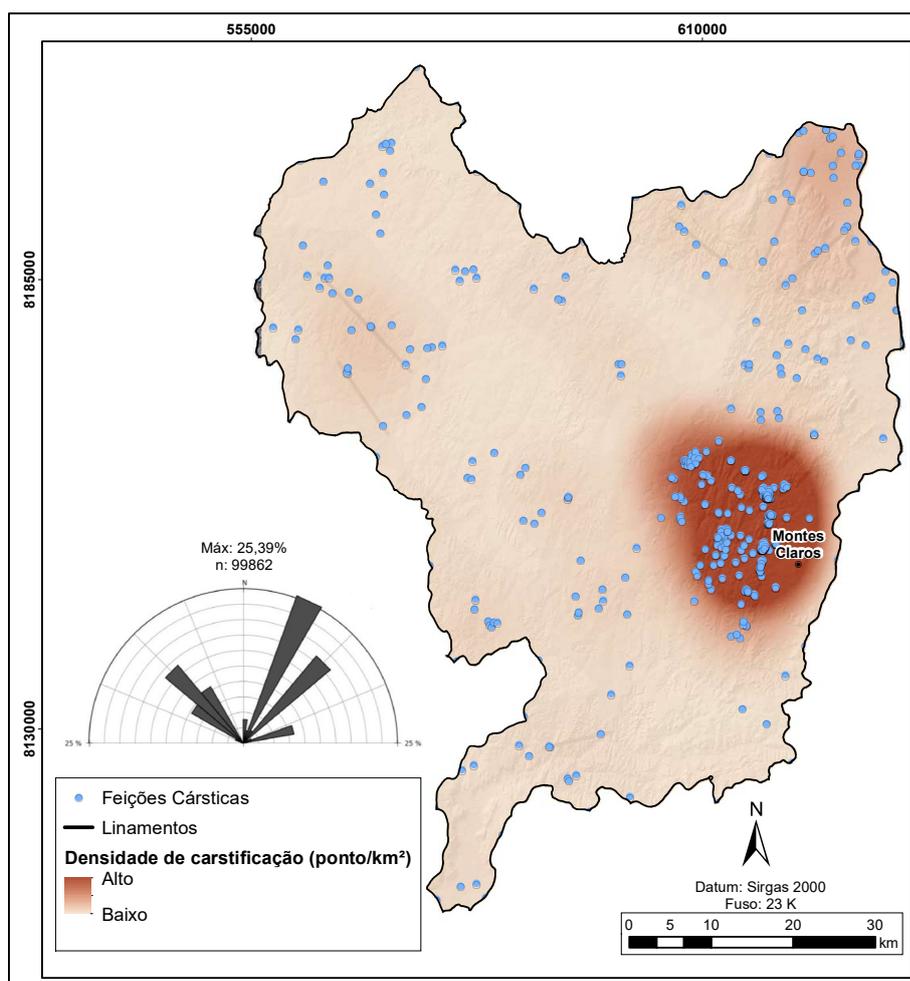


Figura 5.3 - Mapa de densidade de feições cársticas da bacia hidrogeológica do rio Vieira, evidenciando as principais zonas de recarga ou descarga dos aquíferos.

5.4 MAPA DE RECARGA

O mapa de recarga, elaborado com base na metodologia APLIS, descrita no item 4.2.3, identificou as taxas de recarga com base no somatório das variáveis consideradas para esta análise. Contudo, salienta-se que, em função do método não considerar perdas inerentes ao processo, como a evaporação, os valores obtidos são elevados, principalmente quando comparados a outros métodos de recarga. Portanto, optou-se por apresentar o mapa de recarga, indicado na Figura 5.4, apenas com uma classificação qualitativa, variando de muito baixa a muito alta.

Assim, com base nas análises do mapa final de recarga, é possível identificar que maiores taxas de recarga, embora pontuais, referem-se à recarga de origem autogênica, cuja ocorrência é observada durante os períodos de chuva, quando a água infiltra diretamente pela rocha calcária intensamente fraturada ou em áreas com elevado grau de carstificação. Por outro lado, acredita-se que as regiões onde há afloramentos de calcários pouco fraturados e/ou carstificados, a taxa de recarga varie de média-alta.

A recarga alogênica, por sua vez, depende da granulometria do manto de intemperismo e do grau de fraturamento das rochas. Em médias declividades e baixas altitudes (limite nordeste e porções a noroeste), a condição encontrada é de descarga, ou seja, exutório, podendo contribuir muito pouco para a recarga dos aquíferos. Porém, caso essas regiões estejam associadas a espessas camadas de sedimentos inconsolidados, pode ocorrer drenança vertical e garantir o abastecimento da unidade aquífera local. Aqueles depósitos em maiores declividades, altas altitudes e baixa densidade de lineamentos (centro da bacia), podem contribuir significativamente para o abastecimento do aquífero cárstico durante períodos de excedente hídrico, via percolação intergranular ou uma recarga contínua através de descontinuidades.

Os aquitardos, Serra de Santa Helena e Serra da Saudade, embora possam armazenar água em seus interiores, apresentam permeabilidade muito baixa. Assim, a contribuição para o aquífero cárstico só é possível por meio de fraturas abertas. Para a área urbana de Montes Claros, foi adotada uma condição quase nula de recarga, uma vez que as condições do meio, como impermeabilização do solo, supressão de nascentes, podem afetar consideravelmente as zonas de recarga.

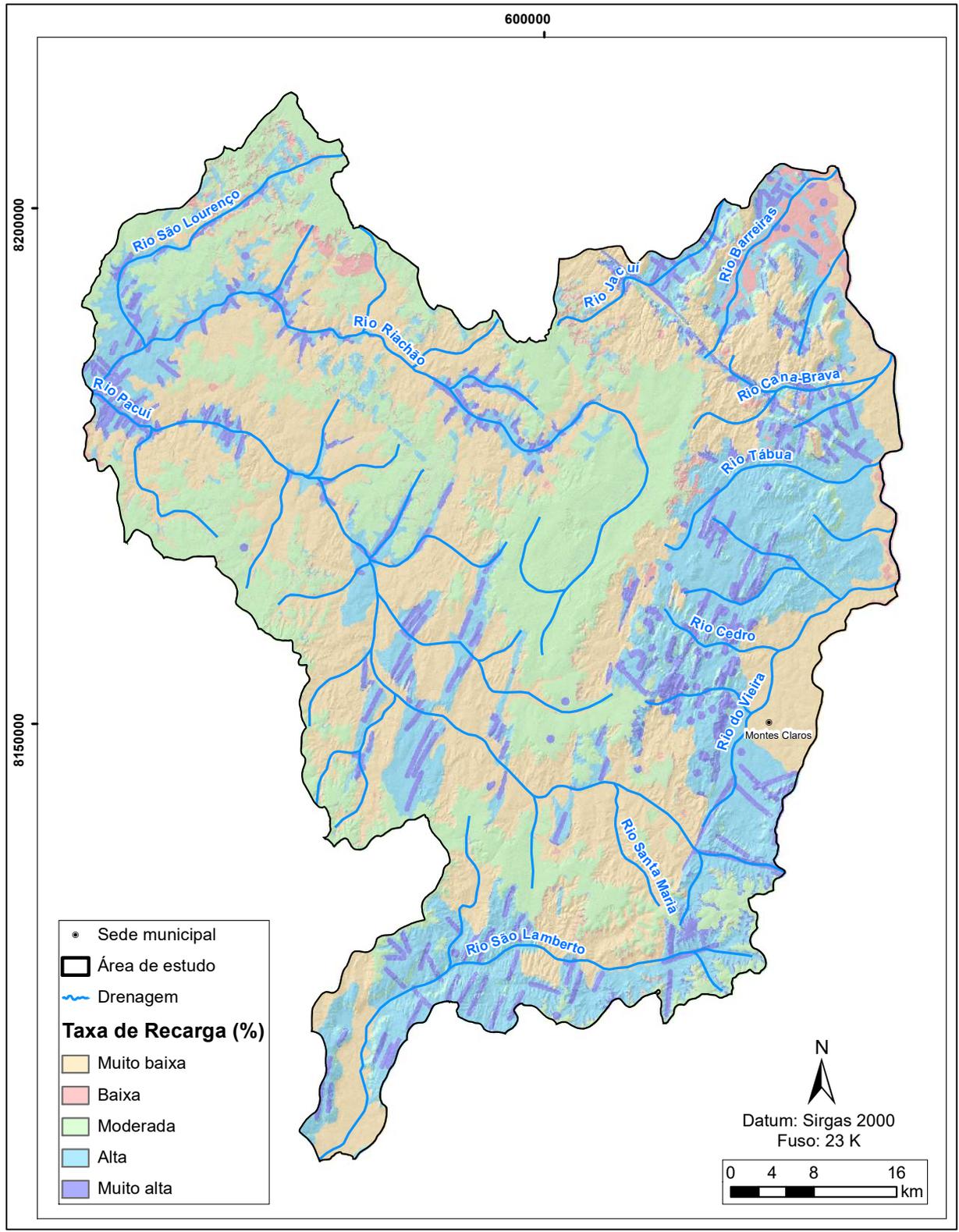


Figura 5.4 - Mapa de recarga da bacia de estudo elaborado com base na metodologia APLIS.

5.5 MAPA DE FAVORABILIDADE HIDROGEOLÓGICA

A partir do mapa de favorabilidade hidrogeológica (FH), apresentado na Figura 5.5, observa-se que o potencial hídrico subterrâneo está relacionado com as principais estruturas presentes no aquífero, como planos de acamamento, fraturas, falhas e feições cársticas, seja em superfície ou em profundidade. Portanto, o mapa de FH da bacia hidrogeológica do rio Vieira, é resultado da interação dos critérios analisados: 1) densidade de lineamentos morfoestruturais e geofísicos; 2) densidade de feições cársticas; 3) declividade; 4) características das unidades aquíferas; e 5) taxa de recarga.

Em relação aos lineamentos, observa-se que quanto maior a densidade de descontinuidades, maior é a conectividade das estruturas e, portanto, maior o desenvolvimento de carstificação e percolação de água. Por outro lado, percebe-se que os lineamentos morfoestruturais apresentam melhores respostas à percolação de água, caso comparados aos demais lineamentos. Isso ocorre porque as estruturas superficiais são correlacionadas com fraturas mais largas, ao passo que em maiores profundidades, as estruturas tornam-se mais apertadas e fechadas, em função de fenômenos como tensões tectônicas, peso das camadas superiores ou preenchimento por mineralizações induzidas por processos hidrotermais.

Os lineamentos radiométricos podem ser classificados logo em seguida, uma vez que suas estruturas encontram-se próximas à superfície. Contudo, é necessário salientar que embora exista uma tendência de rochas mais fechadas em profundidade, não significa que seja impossível ocorrer significativas redes de drenagem ao longo dessas descontinuidades. Portanto, os lineamentos magnetométricos, os quais representam estruturas profundas, também são importantes para a delimitação de prováveis zonas de circulação de água.

Embora algumas feições cársticas tenham sido adicionadas manualmente com auxílio do *Google Earth*, sabe-se que a maioria dessas estruturas correspondem a dolinas que, juntamente com as cavernas e sumidouros, evidenciam zonas carstificadas responsáveis por conectar a superfície ao aquífero cárstico. Além disso, quando alinhadas, podem indicar, ainda, a direção do fluxo subterrâneo local. Com isso, entende-se que a representação gráfica das zonas carstificadas, as quais correspondem, também, a condutos, cavidade, entradas d'água e fendas, apontam as áreas de maior condutividade hidráulica que podem transmitir grandes volumes de água.

O mapa dos sistemas aquíferos desempenhou significativa influência sobre a favorabilidade hidrogeológica, uma vez que os aquíferos considerados produtivos, como o Sistema Aquífero Carbonático, engloba a maior parte dos poços com altos Q/s e T . Entende-se, portanto, que as análises devem ser feitas com base nas características não apenas das litologias aflorantes, mas também das unidades hidrogeológicas as quais os poços captam água.

As regiões de baixa declividade, geralmente próximas a vales e a redes de drenagens, caso apresentem camadas espessas de coberturas sedimentares, podem abrigar um elevado potencial hídrico subterrâneo. Dessa forma, é observado que poços nessas regiões apresentam melhores condições de produção e armazenamento de água, além de ser provável que ocorra manutenção das taxas de fluxos por longos períodos.

A recarga exerce influência sobre as condições de percolação de água no aquífero local, uma vez que associa-se a parâmetros físicos importantes, como litologia, grau de fraturamento da rocha, presença de feições cársticas, altitude, declividade e solo. Por isso, é plausível afirmar que altas taxas de recarga contribuem com um maior desenvolvimento de carstificação e, conseqüentemente, maior percolação de água. Contudo, as regiões de descarga, ou seja, de baixas altitudes, podem abrigar poços com alto desempenho quando associadas a espessas camadas de sedimentos e baixa declividade.

A interação desses critérios indica que quanto mais parâmetros presentes com maior peso atribuído a eles em uma área, mais favorável a região é para a exploração de água subterrânea. Com isso, a partir da Figura 5.5, observa-se que as porções em branco correspondem as maiores taxas de FH, pois encontram-se em uma região com elevada densidade de feições cársticas e lineamentos, sistemas aquíferos produtivos, baixa declividade, alta taxa de recarga, ou seja, quatro fatores com peso 4.

Como método comparativo, destaca-se que a maioria dos poços situa-se na Classe 5 (Tabela 5.2) da classificação de Diniz *et al.* (2014; Tabela 2.1), embora baixos valores de Q/s (Classe 4 e 5) ocorrem ao longo de todo o mapa, inclusive em áreas potencialmente favoráveis, indicando o quanto o aquífero cárstico é anisotrópico e heterogêneo. Com isso, é possível que um poço produtivo esteja próximo a um poço seco, simplesmente por ter interceptado um conduto com água.

Tabela 5.2 - Resultado estatístico dos valores de capacidade específica e transmissividade, segundo a classificação de Diniz *et al.* (2014).

Capacidade específica (m ³ /h/m)					
Classe	Núm. De Poços	Máximo	Mínimo	Média	Mediana
1	14	6000	4.40	476.77	7.92
2	13	3.91	2.48	3.32	3.52
3	17	1.97	1.04	1.42	1.35
4	22	0.95	0.40	0.64	0.65
5	24	0.40	0.05	0.16	0.10
6	3	0.03	0.02	0.02	0.03
Transmissividade (m ² /s)					
Classe	Núm. De Poços	Máximo	Mínimo	Média	Mediana
1	-	-	-	-	-
2	-	5.6E-03	1.0E-03	3.3E-03	3.3E-03
3	2	4.8E-04	1.2E-04	2.9E-04	3.1E-04
4	7	6.8E-05	1.3E-05	3.8E-05	4.7E-05
5	7	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-

Dos 10 poços mais produtivos da área (Classes 1 e 2), 40% dos poços com $Q/s > 2,5$ m³/h/m estão em áreas brancas/rosas, e 45% em zonas altas e moderada FH. A maioria dos poços (50 a 65%) com produtividade intermediária (Classes 3 e 4), entre 0,4 - 2,0 m³/h/m e 5,6E-3 e 1,2E-4 m²/s, estão em zonas amareladas ou alaranjadas, 15% na zona moderada, e 25% em zonas de baixa favorabilidade. Nos poços menos produtivos (Classes 5 e 6), os valores de Q/s encontram-se abaixo de 0,4 m³/h/m e T, abaixo de 6,1 m²/s), e encontram-se bem distribuídos pelo mapa.

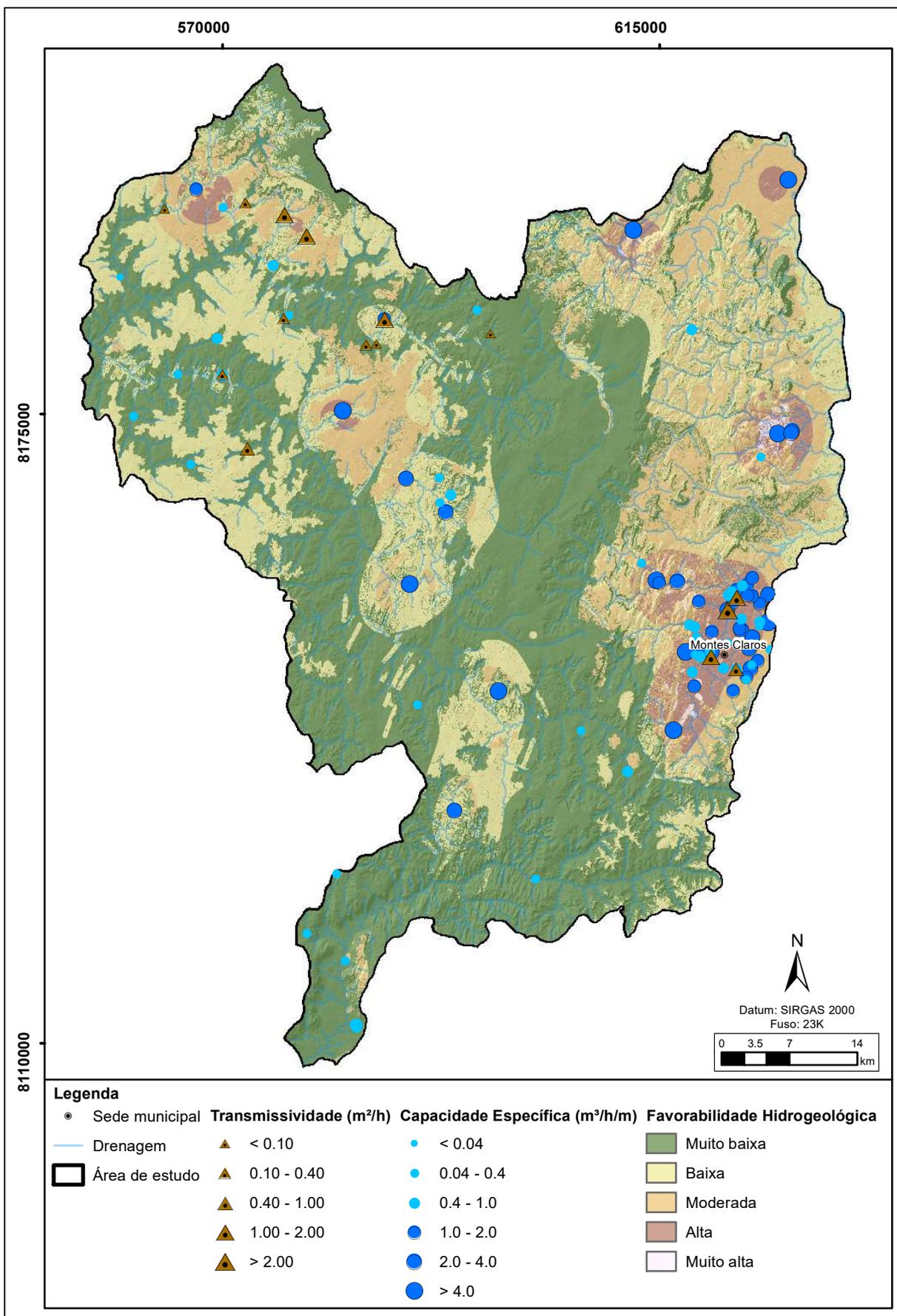


Figura 5.5 - Mapa de favorabilidade hidrogeológica para os aquíferos encontrados na bacia hidrogeológica do rio Vieira, incluindo os valores de capacidade específica e transmissividade dos poços.

Os dados de produtividade dos poços (capacidade específica, Q/s , e transmissividade, T , vide Anexo I e Anexo II), foram classificados segundo o gráfico de dispersão e matriz (Figura 5.6), o qual mostra a respectiva relação com a FH. Assim, é observado uma tendência de crescimento dos valores de Q/s e T em áreas com elevada favorabilidade, evidenciando que estes parâmetros são diretamente proporcionais e, de certa forma, validando o método aplicado neste estudo. Em função da enorme diferença entre o menor e o maior valor de Q/s , optou-se por apresentá-los em escala logarítmica, a fim de facilitar a visualização, enquanto os valores de T encontram-se em escala linear, pois não há grandes disparidade entre os dados. Ainda em relação ao eixo de “Capacidade específica” do gráfico abaixo, foram destacados os limites das classes definidas por *Diniz et al.* (2014).

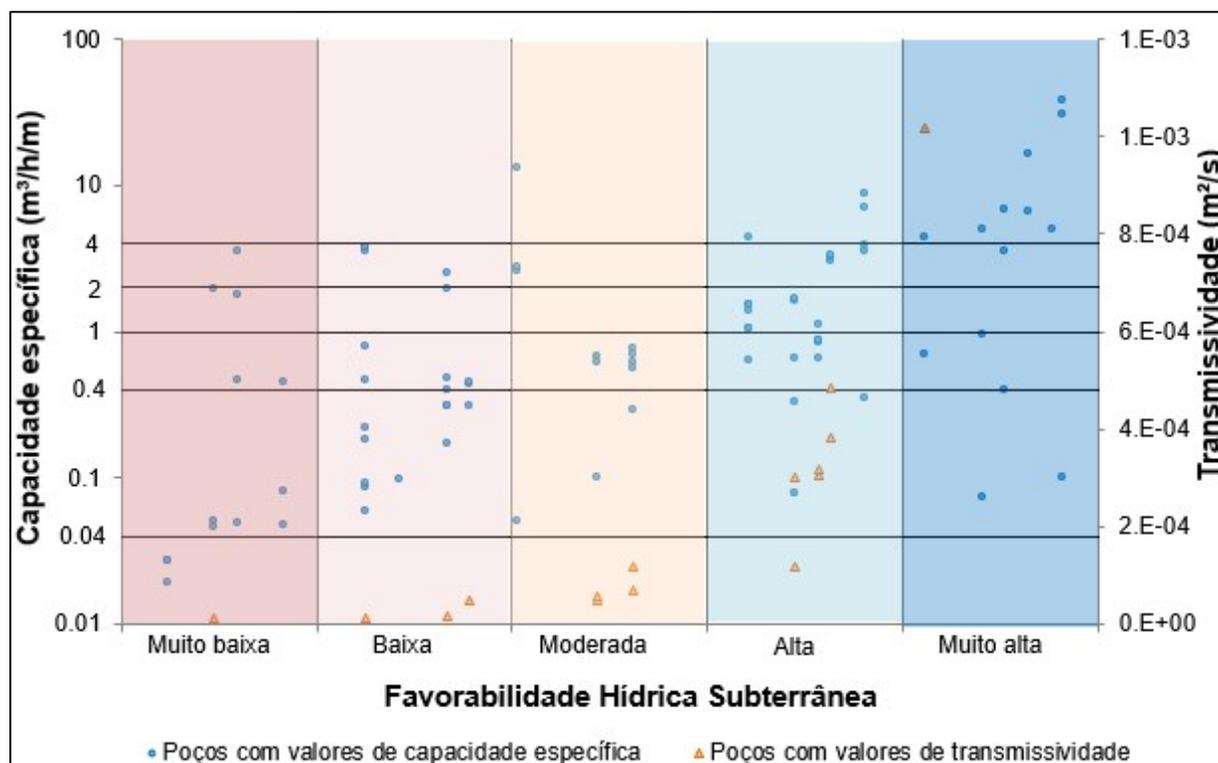


Figura 5.6 - Gráfico de dispersão e matriz dos valores de capacidade específica e transmissividade pela favorabilidade hidrogeológica.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

A produtividade dos poços na bacia hidrogeológica do rio Vieira pode ser correlacionada com quatro fatores, considerados os mais importantes na investigação de favorabilidade hidrogeológica do aquífero cárstico: 1) maior densidade de lineamentos (morfoestruturais e geofísicos) e feições cársticas, principalmente aqueles de direção NE-SW e NNE-SSW; 2) condições de produtividade representadas pelos sistemas aquíferos; 3) zonas menos inclinadas e próximas a drenagens; 4) taxa de recarga. A integração destes parâmetros originou o mapa de favorabilidade hidrogeológica para os aquíferos da região, de maneira que quanto mais fatores com pesos altos em uma mesma região, maior a probabilidade de se encontrar água subterrânea e, conseqüentemente, mais produtivos o poço. Por outro lado, é importante mencionar que os resultados de produtividade dos instrumentos não dependem apenas da qualidade do aquífero no qual estão inseridos, mas também da qualidade da complementação e desenvolvimento do poço.

A significativa distribuição de poços pouco produtivos ao longo de várias porções da bacia, evidencia o quanto o aquífero cárstico é anisotrópico e heterogêneo. Com isso, embora o mapa de favorabilidade indique as regiões mais favoráveis para exploração de água a baixos custos a partir da calibração e validação dos dados de Q/s e T , é necessário utilizar outras metodologias investigativas, principalmente em escala local (dezenas e centenas de metros apenas), como mapas potenciométricos detalhados, mapeamento geológico-estrutural e feições cársticas locais, caminhamento geofísico terrestre (eletrorresistividade), etc. Além disso, é preciso assegurar que os processos de regularização e obtenção de outorga do poço estejam sempre de acordo com a legislação vigente.

Considerando a escassez dos estudos hidrogeológicos na região de estudo, acredita-se que a decisão de se introduzir análises paramétricas gerou resultados satisfatório para se analisar o potencial hídrico subterrâneo dos aquíferos da região, uma vez que reduziu-se a subjetividade quando se atribuiu os pesos durante a integração dos mapas. Assim, pressupõem-se que este estudo poderá contribuir para o gerenciamento dos recursos hídricos, o planejamento de expansão urbana e realocação de poços produtivos, evitando assim, concentrações de instrumentos de altas vazões que possam causar cenários de superexploração do aquífero, agravando o déficit hídrico local.

Por fim, entende-se que o mapa de favorabilidade hidrogeológica, em terrenos cársticos, mostra-se como uma ferramenta importante para a gestão de recursos hídricos, especialmente para as cidades que utilizam quase que exclusivamente a água subterrânea. Assim sendo, este estudo, e outros semelhantes, mostraram que é possível gerar bons resultados a partir de informações disponíveis na literatura, em órgãos públicos ou de livre acesso na internet. Por isso, ressalta-se a importância da organização e compartilhamento de um banco de dados coeso para que sejam incentivadas pesquisas em benefício de todos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afonso, P. C. S.; Pereira, A. M. A. 2005. *Questão da água na bacia do Riachão (MG): Uso e Gestão*. Revista Cerrados. Montes Claros: UniMontes/ Departamento de geociências. v.3. n. 1. 115p. p. 75-86.
- Afonso, P.C. S. 2015. *Os conflitos do/no hidroterritório norte-mineiro*. Sociedade e Território, **27**:229-250.
- Agência Nacional De Águas – ANA. 2009. *Relatório do Diagnóstico da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande*. ECOPLAN Engenharia, Brasília, p. 11-33.
- Agência Nacional De Águas – ANA. 2010. *Atlas Brasil, Abastecimento público*. Disponível em: <http://portal1.snirh.gov.br/arquivos/atlasrh2013/4-III-TEXTO.pdf>. Acessado: 11 novembro 2019.
- Agência Nacional De Águas – ANA. 2011. *Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande*. Relatório Síntese. 180 p.
- Agência Nacional De Águas – ANA. 2015. *Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos*. Disponível em: <http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/>. Acessado: 11 de julho de 2020.
- Agência Nacional De Águas – ANA. 2018. *Avaliação Hidrogeológica dos Sistemas Aquíferos Cársticos e Fissuro-Cársticos na Região Hidrográfica do São Francisco, com Vistas à Gestão Integrada e Compartilhada de Recursos Hídricos*. Volume 4.
- Alkmim, F. F.; Martins-Neto. 2001. *A bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos*. In: Pinto, C.P. & Martins-Neto, M.A. Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais – SBG/MG. Belo Horizonte. p. 9-30.
- Alkmim, F. D. 2004. *O que faz de um cráton um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo*. Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, 17-34.
- Andreo, B., Vías, J. M., Mejías, M., Ballesteros, B. J., & Marín, A. I. 2007. *Estimación de la recarga mediante el método APLIS en el acuífero jurásico de El Maestrazgo (Castellón, NE España)*. Los acuíferos costeros: retos y soluciones, 1, 2.
- Arraes, T. M. 2007. *Proposição de critérios e métodos para delimitação de bacias hidrogeológicas*. Dissertação de mestrado, UNB- Universidade de Brasília, Instituto de Geociências. 115 p.
- Auler, A. 1994. *Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst, Brazil*. Dissertação de Mestrado, Western Kentucky University. 110p.
- Bear, J. 1972. *Dynamics of fluids in porous materials*. Society of Petroleum Engineers: Dallas, TX, USA.
- Borges, Luciene. 2007. *Qualidade da água do Rio Vieira sob a influência da área urbana de Montes Claros MG*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Uberlândia. 104p.
- Borguetti, N. R. B; B, J. R; Rosa Filho, E. F. 2005. *O Aquífero Guarani: A verdadeira Integração dos Países do Mercosul. Paraná: Itaipu e Fundação Roberto Marinho*. Trechos disponíveis em: <https://www.abas.org/aguas-subterraneas-o-que-sao/>. Acessado: 09 setembro de 2019.
- Botelho, R. G. M. 1999. *Planejamento ambiental em microbacia hidrográfica*. In: Guerra; A. J. T. et al. (org.) Erosão e conservação dos solos: conceitos temas e aplicações Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- Branco, J. J. R.; Costa, M. T. 1961. *Roteiro para a excursão Belo Horizonte- Brasília*. In: Congresso Brasileiro de Geologia, Brasília. Belo Horizonte: UFMG - Instituto de Pesquisas Radioativas. Publicação v. 15, p. 13- 21.
- Brandão, S. S. S; Silva, W. T da. 2016. *Configuração do espaço urbano da cidade de Montes Claros-MG após 1970: novas centralidades*. Revista Humanidades, v. 5, n. 2. 12 p.
- Bui E.N., Mermur A.R., Santos M.C.D. 1989. *Microscopic and Ultramicroscopic Porosity of an Oxisol as Determined by Image Analysis and Water Retention*, Soil Sci. Soc. Am. J. 53:661-665.
- Chaves, M.L.S.C.; Benitez, L. 2007. *Folha Jequitai- SE 23-X-C-II*. Escala 1:100.000. Minas Gerais – Belo Horizonte: UFMG; CPRM. Programa de Geologia do Brasil, 2007. 48p.
- Chaves, M.L.S.C.; Andrade, K.W. 2014a. *Folha Coração de Jesus - SE.23-X-A-V*. Escala 1:100.000. Minas Gerais – Belo Horizonte: CPRM, 59p.

- Chaves, M.L.S.C.; Andrade, K.W. 2014b. *Folha Montes Claros - SE.23-X-A-VI*. Escala 1:100.000. Minas Gerais – Belo Horizonte: CPRM, 80p.
- Cleary, R. W. 1989. *Águas subterrâneas*. Princeton Groundwater e Clean Enviroment Brasil, Tampa, Flórida, 112p.
- Comissão Nacional De Energia Nuclear – CNEN. 2006. *Apostila Educativa de Radioatividade*. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/radio.pdf>. Acessado: 10 março de 2020.
- Comitê Da Bacia Hidrográfica Do Rio São Francisco, CBHSF. 2016. *Resumo executivo do plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco 2016-2025 (RF3)*.
- Companhia de Saneamento de Minas Gerais – Copasa. 2016. *Interrupção do abastecimento em bairros de Montes Claros*. Disponível em: <http://www.copasa.com.br/wps/portal/internet/imprensa/noticias/plano-de-acionamento/filter?area=/site-copasa-conteudos/internet/perfil/imprensa/noticias/plano-de-acionamento/acionamento-encerrado/co-montes-claros>. Acessado: 28 de agosto de 2019.
- Conselho nacional de recursos hídricos – CNRH. 2001. *Resolução nº15, de 11 de janeiro de 2001*. Diário Oficial da União, publicado em 22 de janeiro de 2001.
- Coriolano, A.C F. 2002. *Reavaliação de critérios estruturais na hidrogeologia de terrenos cristalinos, com ênfase na neotectônica e sensoriamento remoto 240f*. Tese de Doutorado em Geodinâmica e Geofísica. Centro de Geociência UFRGN, Natal.
- Costa, W.D. 1986. *Análise dos fatores que atuam no aquífero fissural - área piloto dos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte*. Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 205p.
- Dardenne, M.A. 1978. *Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central*. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), Recife, vol. 2, p.507-610.
- Diniz J. A. O., Monteiro A. B., da Silva R.C., de Paula T.L.F. 2014. *Manual de Cartografia Hidrogeológica*. CPRM, 219p.
- Drummond, G. M.; Martins, C. S.; Machado, A. B. M.; Sebaio, F. A.; Antonini, Y. Flora. 2005. *Um Atlas para sua Conservação*. In: Biodiversidade em Minas Gerais: 2. ed. Belo Horizonte: Fundação Biodiversitas. v. 1. 15 p.
- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária – EMBRAPAa. *Definição e características gerais dos solos*. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_17_2212200611543.html. Acessado: 12 de julho de 2020.
- Faro, Gestão De Águas E Resíduos – FAGAR. 2011. *A Importância da água*. Disponível em http://www.fagar.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=52&Itemid=76. Acessado: 11 fevereiro de 2019.
- Feitosa F. A. C., Manoel Filho J., Feitosa E. C., & Demétrio J. G. A. 2008. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3 ed. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil - CPRM. v.1, 812p.
- Fernandes A. J. 2008. Aquíferos fraturados. Uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. *Revista do Instituto Geológico de São Paulo*, 29:49-72.
- Ferreira, M. F. F.; Pereira, D. M.; Veloso, G. A.; Silva, L. D. de A.; Leite, M. E. 2015. *Geotecnologias aplicadas ao estudo dos conflitos socioambientais na bacia hidrográfica do rio Riachão*. 266 p.
- Fetter, C.W. 1994. *Applied Hydrogeology*. Macmillan, New York, p. 691.
- Fiori, J P De O; Campos, J E G; A, L. (2010). Variabilidade da Condutividade Hidráulica das Principais Classes de Solos do Estado de Goiás. *Geociências*, v. 29, n. 2, p. 229-235, São Paulo, UNESP.
- Ford, D.C; Williams, P.W. 2007. *Karst geomorphology and hydrology*, 2nd ed. Wiley, Chichester, NY, 562p.
- Fundação Centro Tecnológico De Minas Gerais - CETEC. 1984. *Estudos Integrados de Recursos Naturais: Bacia do Alto São Francisco e parte Central da Área Mineira da Sudene*. Hidrologia Subterrânea. Belo Horizonte.
- Galvão, P. H. F. 2015. *Modelo hidrogeológico conceitual de sete lagoas (mg) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas*. Instituto de Geociências, USP, São Paulo, Tese de Doutorado.
- Gaspar, M T P; C, J E G; Cadamuro, A L De M (2007). Condições de infiltração em solos na região de recarga do sistema aquífero Urucuia no oeste da Bahia sob diferentes condições de usos. *Revista Brasileira de Geociências*. 37(3): 542-550. Arquivo digital disponível on-line no site www.sbgeo.org.br

- Goldscheider, N., Drew, D., 2007. *Methods in Karst Hydrology*. IAH: International Contributions to Hydrogeology, 26. CRC Press.
- Gomes, R. M. A. 2019. Modelo Hidrogeológico Conceitual e Análise da Favorabilidade Hidrogeológica do Aquífero Cárstico na Região Urbana de Sete Lagoas - MG. Programa de pós-graduação em evolução crustal e recursos naturais – UFOP.
- Gomes, D. G. C. 2020. *Atlas Aerogeofísico do Estado de Minas Gerais, escala 1:1.000.000*. Serviço Geológico do Brasil.
- Heath, R. C. *Hidrologia de água subterrânea básica*. 1982. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Hobbs, S.L; Gunn. 1998. *The hydrogeological effect of quarrying karstified limestone: options for protection and mitigation*. Q J Eng Geol 31:147–157.
- Iglesias, M.; Uhlein, A. 2009. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geologia*, vol. 39, n. 2, p. 256-266.
- Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística – IBGE. 2002. *Caracterização climática nacional*. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/climatologia/15817-clima.html?=&t=o-que-e>. Acessado 13 de junho de 2019.
- Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística – IBGE. 2010. *Número de habitantes na cidade de Montes Claros*. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/montes-claros/panorama>. Acessado 13 de junho de 2019.
- Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística – IBGE. 2019. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/montesclaros/pesquisa/33/29171?tipo=ranking&ano=2019>. Acessado 20 de junho de 2019.
- Instituto Mineiro De Gestão De Águas - IGAM. 2007. *Projeto Estudos Hidrogeológicos Complementares na Sub-bacia do Riachão*. Relatório Técnico de Atividades 3/2007. IGAM: BELO HORIZONTE. 51p.
- Instituto mineiro de gestão de águas – IGAM. 2010. *Mapa de Unidades de Planejamento, Comitê das Bacias Hidrográficas do Estado de Minas Gerais*. Disponível em: <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/unidades-de-planejamento>. Acessado 10 de outubro de 2019.
- Instituto Mineiro de Gestão das Águas. IGAM. 2012. *Base hidrográfica otocodificada de Minas Gerais*. Belo Horizonte: 72 p; il.
- Karmann, I., Teixeira, W., Toledo, M. C. M. de, Fairchild, T. R., & Taioli, F. 2000. *Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica*. In Decifrando a terra. São Paulo: Oficina de textos.
- Kearey P., Brooks, M., and Hill I. 2002. *An Introduction to Geophysical Exploration: Blackwell Publishing*. 240p.
- Kim J.W., Lee J.Y., Yi M.J., Kim G.B., Won J.H., Lee K.K. 2007. Allocating local groundwater monitoring stations for South Korea using an analytic hierarchy process, *Hydrogeology J.*, 15(3):615-632, doi 10.1007/s10040-007-0168-y.
- Kuchenbecker, M; Batista, G. A. P.; Pereira, A. de S.; Pacheco, F. E. R. C.; Magalhães, M. G.; Costa, R. D. da. 2014. *Folha Brasília de Minas SE.23-X-A-II*. Escala 1:100.000. Minas Gerais, Belo Horizonte: UFMG; CPRM. Projeto Norte de Minas. 35p.
- Kuchenbecker, M; Costa, R. D. da. 2014. *Folha Capitão Enéas SE.23-X-A-III*. Escala 1:100.000. Minas Gerais, Belo Horizonte: UFMG; CPRM. Projeto Norte de Minas. 33p.
- Leite, M. E; Pereira, A. M. 2008. *Metamorfose do espaço intraurbano de Montes Claros/MG*. 209p.
- Leite, M. E.; Leite, M. R.; Clemente, C. M. S. 2010. *O uso do solo e o conflito por água no alto rio Riachão, norte de Minas Gerais: uma análise auxiliada pelas geotecnologias*. Ver. Geogr. Acadêmica v.4, n.1 (vii).
- Leite, M. E; Santos, I. S.; Almeida, J. W. L. 2011. Mudança de Uso do Solo na Bacia do Rio Vieira, em Montes Claros/MG. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 779-792.
- Leong, Y.T., Lee J.Y., Tan R.R., Foo J.J., Chew I.M.L. 2017. *Multi-objective optimization for resource network synthesis in eco-industrial parks using an integrated analytic hierarchy process*, J. of Clean. Prod. 143:1268-1283, doi 10.1016/j.jclepro.2016.11.147.
- López-Geta, J. A.; Andreo, B.; Vías, J. J.; Carrasco, F.; Jiménez, P. (2004). *Aproximación metodológica para evaluar la recarga en acuíferos carbonáticos*. Instituto Geológico y Minero de España y Universidad de Málaga, Madrid.

- Lucena, L. R. F.; Rosa Filho, E. F. Bittencourt, A. V. L. 2004. A potenciometria do aquífero Barreiras no setor oriental da Bacia do rio Pirangi-RN e considerações sobre a relação com mananciais superficiais. *Revista águas subterrâneas*, 18: 19-28.
- Luiz, J.G., Silva L.M.C. 1995. *Geofísica de Prospecção*. Belém, Pará. Ed. CEJUP.
- Martins-Neto, M. A.; Pinto, C. P. 2001. *A Bacia do São Francisco – Geologia e Recursos Naturais*. Belo Horizonte, MG: SBG. 238p.
- Martins, L. A.; Cavalcanti, J. A. D.; Brito, D. C. 2019. *Estudos piloto para a implementação da gestão integrada de águas superficiais e subterrâneas na bacia hidrográfica do São Francisco: sub-bacias dos rios Verde Grande e Carinhanha*. 368p.
- Martos-Rosillo, S.; Rodríguez-Rodríguez, M.; Tirado, F.; Bruque, J. M.; González-Ramón, A. (2010). La evaluación de la recarga como contribución al conocimiento hidrogeológico del acuífero carbonático de la Sierra de la Silla (Parque Natural de la Sierra de Grazalema, Cádiz). *Geogaceta*, 48, p. 139- 142, 2010
- Morgan, R. 2017. An investigation of constraints upon fisheries diversification using the Analytic Hierarchy Process (AHP), *Mar. Policy* 86:24-30. doi 10.1016/j.marpol.2017.05.037.
- Mourão M.A.A., Cruz W.B., Gonçalves R.L.F. 2001. *Caracterização hidrogeológica da porção mineira da Bacia Hidrográfica do São Francisco*. Belo Horizonte, SBG-MG, p.327-350.
- Neves M.A. 2005. *Análise Integrada Aplicada à Exploração de Água Subterrânea na Bacia do Rio Jundiá (SP)*. Tese de Doutorado, IGCE/UNESP, Campus Rio Claro, 200p.
- Oliveira, F. E. R. de. 1996. *Informações básicas para gestão territorial. GATE. Projeto VIDA – Viabilidade Industrial e Defesa Ambiental*. Estudos geofísicos dos abatimentos de solo da Rua Cuba – Sete Lagoas, MG. Belo Horizonte, CPRM.
- Oliveira, N. C. M. 2019. *Avaliação dos fatores condicionantes na produção de água subterrânea em aquíferos fraturados*. 67 f. Monografia (Graduação em Engenharia Geológica) - Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto.
- Paiva, I.; Ramos, C.; Cunha, L. 2015. Quantificação E Distribuição Espacial Da Recarga No Hidrossistema Cársico De Degracias-Sicó A Partir Do Método Aplis: Abordagem Metodológica Inicial. *VII Congresso Nacional de Geomorfologia, Geomorfologia*.
- Pardo-Igúzquiza, E.; Durán, J. J.; Dowd, P. A. 2013. *Automatic detection and delineation of karst terrain depressions and its application in geomorphological mapping and morphometric analys*. *Acta Carsologica* 42/1, 17–24, Postojna.
- Patra S., Mishra P., Mahapatra S.C. 2018 Delineation of groundwater potential zone for sustainable development: A case study from Ganga Alluvial Plain covering Hooghly district of India using remote sensing, geographic information system and analytic hierarchy process, *J. of Clean. Prod.* 172:2485-2502. doi 10.1016/j.jclepro.2017.11.161.
- Piló, L. B. 1998. *Morfologia Cárstica e Materiais Constituintes: Dinâmica e Evolução da Depressão Poligonal Macacos-Bau - Carste de Lagoa Santa, MG*. São Paulo: Departamento de Geografia - USP (Doutorado).
- Pinto, N. L. de S.; Holtz, A. C. T.; Martins, J. A.; Gomide, F. L. S. 1976. *Hidrologia Básica*. Fundação Nacional de Material Escolar.
- Pissara, T.C.T.; Politano, W.; Ferraud. A.S. 2004. *Avaliação de características morfológicas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do Córrego Rico, Jaboticabal (SP)*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28: 297-305.
- Projeto Águas Do Norte De Minas – PANM. 2019. *Estudo da disponibilidade hídrica subterrânea do norte de Minas Gerais*. Relatório de Integração. Belo Horizonte.
- Queiroz, G. L., Salamuni, E., & do Nascimento, E. R. 2014. *AzimuthFinder: ferramenta para a extração de dados e apoio na análise estrutural*. *Geologia USP. Série Científica*, 14(1), 69-80.
- Ramalho-Filho, A., Beek, K. J. 1995. *Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras*. 3.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPQ, 65p.
- Reis, H.L.S; Alkmim, F.F; Fonseca, R.C.S; Nascimento, T.C.; Suss, J.F.; Preveatti, L.D. 2017. *The São Francisco Basin*. In: Heilbron, M.; Cordan, U.; Alkmim, F. (eds) *São Francisco Craton, Eastern Brazil*. *Regional Geology Reviews*, 117-143.

- Rennó, D., C.; Soares, J., V. 2001. *Discretização espacial de bacias hidrográficas*. In: INPE, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, Foz do Iguaçu, Anais, 485- 492.
- Revista Brasileira De Espeleologia. 2012. *Mapa de Potencialidade de Cavernas no Brasil, na escala 1:2.500.000*, V. 1, N. 9. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/ceav/images/stories/projetos-e-atividades/mapa_potencialidade_BR_CECAV_jun12.pdf. Acessado 14 de novembro de 2019.
- Rocha G. 2005. *Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo, escala 1:1.000.000, nota explicativa*. São Paulo, Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), IG-Instituto Geológico (IG), Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), Serviço Geológico do Brasil (CPRM). 119p.
- Santos, E. F. dos. 2013. *Caracterização hidrogeológica e hidroquímica da Bacia do Rio Verde Grande em Minas Gerais*. Belo Horizonte, Departamento de Geologia da UFMG, 218p. Dissertação (Mestrado em Geologia).
- Sener E., Davraz A. 2013 Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey), *Hydrogeology J.*, 21(3):701-714. doi 10.1007/s10040-012-0947-y.
- Serviço Geológico do Brasil – CPRM. 2003. *Mapeamento geológico da região de Sete lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais*. Escala 1:50.000. 2nd ed, CPRM, Belo Horizonte, Brasil, 54p.
- Schöll, W. U. 1976. *Sedimentologia e geoquímica do Grupo Bambuí na parte sudeste da Bacia do São Francisco*. In: Congresso Brasileiro De Geologia, 29, v. 2, Ouro Preto, 1976. Anais. Ouro Preto. Sociedade Brasileira de Geologia, 1976. p. 207-231.
- Shekhar S., Pandey A.C. 2015. Delineation of groundwater potential zone in hard rock terrain of India using remote sensing, geographical information system (GIS) and analytic hierarchy process (AHP) techniques. *Geocarto International*, 30(4):402-421. doi: 10.1080/10106049.2014.894584
- Singhal B.B.S., Gupta R.P. 1999. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 400p.
- Soares, L, C. 2012. *Estimativa da recarga aquífera na bacia do rio Riachão, MG*. Dissertação de Mestrado, UFMG, Instituto de Geociências, Minas Gerais.
- Souza, M T & Campos, J E G (2001). O papel dos regolitos nos processos de recarga de aquíferos do Distrito Federal. *Rem, Rev. Esc. Minas*, v.54, n.3. Ouro Preto July/Sept.
- Souza, S. M. T. De. *Disponibilidades Hídricas Subterrâneas no Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Hidrossistemas. 1995. 525 p.
- Superintendência De Desenvolvimento Do Nordeste - Área de Atuação da SUDENE. 1989. *Polígono das secas*. Disponível em <http://www.sudene.gov.br/site/extra.php?idioma=&cod=111#>. Acessado 28/04/2019.
- Struckmeier W.F., Margat J. 1995. *Hydrogeological Maps - A Guide and a Standard Legend*. – International Association of Hydrogeologists (IAH), Int. Contrib. to Hydrogeol. v.17, 177p.
- Telford W. M., Geldart, L. P., Sheriff R.E. 1990. *Applied geophysics*. Cambridge University Press.
- Theis, C.V. 1935. *The relation between the lowering of the piezometric surface and therate and duration of discharge of a well using ground-water storage*. Am. Geophys. UnionTrans., 16, 519–52.
- Tiedman, R. C. Goode, D. J.; E Hsieh, P. A. 1998. *Characterizing a ground water basin in New England Mountain and valley terrain*. Ground Water 36 (4): 611-621.
- Tóth J. 1963. *A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins*. Journal of Geophysical Research, 68 (16) (1963), pp. 4795–4812.
- Tucci, C.E.M.; Beltrame, L. F. S. 2001. *Evaporação e evapotranspiração*. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Universidade/UFRGS. p. 253-288.
- Tuller, M.P.; Ribeiro, J.H.; Signoreli, N.; Féboli, W.L.; Pinho, J.M.M. 2010. *Projeto Sete Lagoas – Abaeté, Minas Gerais*. Texto Explicativo. CPRM, Belo Horizonte-MG, 160p.
- Velásquez L.N.M., Fantinel L.M., Fleming P.M., Minardi P.S.P., Rodrigues P.C.H., Nacif W.F.N., Viola Z.G.G., Silva, S.M., Soares L.C., Costa D.A., Pereira C., Freitas, A.M. 2009. *Processos Geradores de Concentração Anômala de Fluoreto na Água Subterrânea em Região Semi-Árida: Estudo de Caso em Aquífero Cárstico-fissural do Grupo Bambuí nos Municípios de Verdelandia, Varzelândia e Jaíba, MG*. Belo Horizonte: Fapemig (EDT 83032/06) 236p.

Vestena, L. R.; Kobiyama, M.; Santos, L. J.C. 2002. *Considerações Sobre Gestão Ambiental em Áreas Carste*. RA' EGA (UFPR), v. 4, n. 6, p. 81-94.

Vieira, L. C., Almeida, R. P., Trindade, R. I., Nogueira, A. C., & Janikian, L. 2016. *A Formação Sete Lagoas em sua área-tipo: fácies, estratigrafia e sistemas deposicionais*. Revista Brasileira de Geociências, 37(4 suppl), 168-181.

Waltham, T., Waltham, A. C., Bell, F. G., & Culshaw, M. G. 2005. *Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Springer Science & Business Media.

White, L. W. 2003. *Conceptual models for karstic aquifers. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 1 (1) January 2003, p.2.

Zhang Y., Zhang k., Niu Z. 2016. Reservoir-type water source vulnerability assessment: a case study of the Yuqiao Reservoir, China. *Hydrological Sciences Journal*, 61(7),1291-1300. doi:10.1080/02626667.2014.1000917.

ANEXOS

Anexo I - Dados de capacidade específica dos poços da bacia hidrogeológica do rio Vieira.

Anexo II - Dados de transmissividade dos poços da bacia hidrogeológica do rio Vieira.

Anexo I – Dados de capacidade específica dos poços da bacia hidrogeológica do rio Vieira.

Poços	UTM X	UTM Y	Fonte	Informação	Tipo de poço	Profundidade (m)	Data do teste	NE (m)	ND (m)	Vazão teste (m³/h)	Capacidade específica (m³/h/m)
3100012710	620396	8150487	SIAGAS	Equipado (11/22/2000)	Poço tubular	72	08/01/2000	7.00	14.00	8.34	3.233
3100013640	618642	8150203	SIAGAS	Não instalado (9/28/2001)	Poço tubular	57	01/02/2000	9.00	43.00	0.00	0.050
3100012690	626187	8153515	SIAGAS	Equipado (11/18/2000)	Poço tubular	80	03/02/2000	15.00	16.50	0.00	7.040
3100014150	590049	8145029	SIAGAS	Equipado (5/22/2001)	Poço tubular	102	08/02/2000	40.00	70.00	2.40	0.080
3100013870	621590	8148792	SIAGAS	Equipado (10/29/2001)	Poço tubular	45	20/02/2000	12.00	23.00	6.20	0.564
3100013130	606910	8142401	SIAGAS	Não instalado (6/2/2001)	Poço tubular	70	04/04/2000	7.00	28.00	0.00	0.314
3100012600	619060	8155696	SIAGAS	Equipado (11/7/2000)	Poço tubular	111	07/04/2000	28.00	35.00	20.00	1.509
3100013560	598409	8146412	SIAGAS	Não instalado (9/11/2001)	Poço tubular	102	12/05/2000	18.00	20.00	0.00	8.800
3100013570	611692	8138159	SIAGAS	Não instalado (9/14/2001)	Poço tubular	108	30/05/2000	7.00	25.00	0.00	0.800
3100012700	622003	8151435	SIAGAS	Equipado (11/21/2000)	Poço tubular	101	06/06/2000	13.00	54.00	15.98	0.171
3100012990	628249	8199210	SIAGAS	Não instalado (11/7/2000)	Poço tubular	60	01/07/2000	5.50	17.00	39.60	6.887
3100016730	576292	8184957	SIAGAS	Bombeando (4/30/2015)	Poço tubular	60	26/07/2000	3.90	37.05	12.17	0.308
3100016730	560786	8174792	SIAGAS	N/A	Poço tubular	72	03/08/2000	4.12	40.66	12.17	0.333
3100016730	592995	8164946	SIAGAS	N/A	Poço tubular	60	09/08/2000	6.70	15.30	12.17	3.805
3100011110	592302	8168491	SIAGAS	Não instalado (10/10/2000)	Poço tubular	102	18/08/2000	10.00	62.00	72.00	0.102
3100012540	618591	8146934	SIAGAS	Equipado (10/10/2000)	Poço tubular	78	30/08/2000	11.50	40.00	22.63	1.053
3100013620	617700	8150381	SIAGAS	Não instalado (9/26/2001)	Poço tubular	80	03/10/2000	26.00	29.00	0.00	4.400
3100010950	561559	8192239	SIAGAS	Bombeando (4/23/2015)	Poço tubular	65	06/10/2000	3.50	3.51	0.00	6000
3100011100	589273	8157412	SIAGAS	Equipado (10/7/2000)	Poço tubular	117	07/10/2000	1.00	3.00	0.00	13.20
3100011130	569473	8182895	SIAGAS	Equipado (10/13/2000)	Poço tubular	102.42	13/10/2000	28.30	50.82	0.00	0.484
3100021300	593505	8166719	SIAGAS	N/A	Poço tubular	90	16/10/2000	11.02	69.22	1.08	0.019
3100011100	593505	8166702	SIAGAS	Não instalado (10/7/2000)	Poço tubular	90	19/10/2000	10.14	41.87	0.00	0.882
3100013460	626216	8156446	SIAGAS	Equipado (7/24/2001)	Poço tubular	102	31/10/2000	32.00	35.00	0.00	3.520
3100016980	622590	8146470	SIAGAS	N/A	Poço tubular	120	25/11/2000	1.96	30.46	36.00	1.263
3100013580	593888	8134087	SIAGAS	Não instalado (9/15/2001)	Poço tubular	90	26/11/2000	20.00	25.00	18.00	3.600

3100013380	628653	8173279	SIAGAS	Equipado (7/14/2001)	Poço tubular	86	01/01/2001	6.00	10.50	0.00	3.911
3100013890	623430	8153891	SIAGAS	Equipado (10/30/2001)	Poço tubular	60	17/01/2001	17.00	28.00	0.00	0.450
3100016740	586689	8184813	SIAGAS	Bombeando (4/30/2015)	Poço tubular	72	18/02/2001	16.09	34.40	18.00	1.351
3100013610	618781	8152047	SIAGAS	Equipado (9/24/2001)	Poço tubular	80	22/02/2001	11.00	32.00	5.20	0.357
3100013910	625326	8153589	SIAGAS	Não instalado (11/5/2001)	Poço tubular	72	14/04/2001	8.00	43.00	22.62	0.646
3100013660	619673	8150737	SIAGAS	Equipado (10/3/2001)	Poço tubular	27	11/05/2001	5.00	8.00	0.61	6.600
3100013580	618591	8153050	SIAGAS	Não instalado (9/19/2001)	Poço tubular	160	23/05/2001	6.90	61.00	18.00	0.861
3100013390	628571	8173171	SIAGAS	Não instalado (7/16/2001)	Poço tubular	92	06/06/2001	3.80	11.00	0.00	2.619
3100013380	627217	8173001	SIAGAS	Não instalado (7/14/2001)	Poço tubular	100	01/07/2001	5.50	9.00	0.00	5.029
3100013660	620212	8150625	SIAGAS	Equipado (10/3/2001)	Poço tubular	75	04/07/2001	12.00	35.00	0.61	0.435
3100016980	624594	8152013	SIAGAS	N/A	Poço tubular	150	28/07/2001	3.25	31.24	36.00	3.537
3100013590	620415	8152510	SIAGAS	Não instalado (9/20/2001)	Poço tubular	66	07/08/2001	7.00	20.00	0.00	1.218
3100017000	612279	8194031	SIAGAS	N/A	Poço tubular	60	18/09/2002	3.84	6.75	504.00	30.93
3100016730	566689	8169898	SIAGAS	N/A	Poço tubular	63	22/09/2002	21.20	53.35	12.17	0.047
3100017010	602234	8126993	SIAGAS	N/A	Poço tubular	60	24/09/2002	6.60	43.00	40.00	0.223
3100017000	596164	8185763	SIAGAS	N/A	Poço tubular	102	04/10/2002	4.71	78.42	504.00	0.050
3100017010	625416	8170639	SIAGAS	N/A	Poço tubular	91	08/10/2002	11.94	68.72	40.00	0.074
3100016620	582612	8118543	SIAGAS	N/A	Poço tubular	102	29/11/2002	12.20	74.50	16.74	0.087
3100016980	616447	8142328	SIAGAS	N/A	Poço tubular	131.6	10/06/2003	2.48	15.46	36.00	5.042
3100017020	619186	8150622	SIAGAS	N/A	Poço tubular	60	18/06/2003	5.77	9.48	60.01	16.18
3100016620	581719	8127588	SIAGAS	N/A	Poço tubular	120	01/01/2004	13.00	69.50	16.74	0.078
3100016680	575200	8190420	SIAGAS	N/A	Poço tubular	82	01/01/2004	6.15	38.08	21.82	0.683
3100011020	583831	8111803	SIAGAS	Abandonado (6/7/2001)	Poço tubular	60	18/01/2004	15.00	32.98	20.84	0.400
3100016610	583820	8111757	SIAGAS	N/A	Poço tubular	60	18/01/2004	4.75	32.86	19.44	0.692
3100016620	583703	8111965	SIAGAS	N/A	Poço tubular	60	18/01/2004	4.74	32.86	16.74	0.691
3100016620	578655	8121396	SIAGAS	N/A	Poço tubular	96	30/07/2004	5.07	42.13	16.74	0.296
3100017020	626336	8150710	SIAGAS	N/A	Poço tubular	106	20/11/2004	35.93	77.92	60.01	0.060
3100016540	567318	8198277	SIAGAS	N/A	Poço tubular	84	01/01/2005	4.96	29.90	34.27	1.374
3100021710	570025	8196406	SIAGAS	N/A	Poço tubular	60	09/02/2006	11.00	46.20	0.00	0.046

3100016970	618080	8153265	SIAGAS	N/A	Poço tubular	150	11/08/2007	6.98	37.88	23.98	0.665
3100020440	618350	8183756	SIAGAS	N/A	Poço tubular	70	08/07/2008	10.00	25.00	9.80	0.653
3100020690	613136	8159686	SIAGAS	N/A	Poço tubular	156	02/07/2009	4.00	98.16	13.82	0.097
3100020990	559491	8189189	SIAGAS	N/A	N/A	150	27/07/2010	9.40	110.70	2.70	0.027
3100021710	559446	8189145	SIAGAS	Abandonado (4/23/2015)	Poço tubular	150	27/07/2010	9.40	110.70	0.00	0.027
3100021200	592362	8165917	SIAGAS	N/A	Poço tubular	141	24/09/2010	25.42	97.12	22.61	0.049
3100021290	588929	8168412	SIAGAS	N/A	Poço tubular	150	26/09/2010	3.10	91.40	6.26	3.726
3100021200	569976	8179144	SIAGAS	N/A	Poço tubular	90	28/09/2010	22.30	43.70	22.61	0.622
3100021200	582378	8175316	SIAGAS	N/A	Poço tubular	60	06/11/2010	3.16	3.75	22.61	38.32
3100021290	576829	8185242	SIAGAS	N/A	Poço tubular	150	08/11/2010	30.43	82.25	6.26	0.102
3100021290	565366	8179180	SIAGAS	N/A	Poço tubular	150	10/11/2010	8.00	76.92	6.26	0.091
3100020690	621997	8154812	SIAGAS	N/A	Poço tubular	150	18/11/2010	19.31	33.60	13.82	2.799
3100020690	622094	8156318	SIAGAS	N/A	Poço tubular	150	21/11/2010	37.30	69.89	13.82	0.470
3100021000	622893	8148696	SIAGAS	N/A	Poço tubular	126	25/11/2010	22.17	54.17	24.84	0.776
3100020690	625349	8155500	SIAGAS	N/A	Poço tubular	117	31/03/2011	37.87	51.03	13.82	1.657
3100021690	608608	8172311	SIAGAS	N/A	Monitoramento	42	02/12/2014	5.55	5.65	52.80	528
3100022510	619186	8150034	SIAGAS	N/A	Poço tubular	150	25/09/2015	30.25	59.25	27.68	0.954
3100022510	625217	8153195	SIAGAS	N/A	Poço tubular	150	28/09/2015	7.55	81.01	27.68	0.185
3100016620	583820	8112031	SIAGAS	N/A	Poço tubular	100	01/10/2015	24.00	59.52	16.74	0.471
3100022510	624390	8148775	SIAGAS	N/A	Poço tubular	142	02/03/2016	3.60	22.93	27.68	2.483
3100022520	623971	8147886	SIAGAS	N/A	Poço tubular	150	17/03/2016	3.30	23.70	17.14	1.765
3100022520	618376	8148379	SIAGAS	N/A	Poço tubular	230	17/04/2016	7.90	55.77	17.14	0.626
3100022520	624452	8149174	SIAGAS	N/A	Poço tubular	240	19/04/2016	0.00	54.76	17.14	0.313
3100022660	623234	8152889	SIAGAS	N/A	Poço tubular	152	10/03/2017	0.00	22.85	45.00	1.969
3100022660	622564	8155608	SIAGAS	N/A	Poço tubular	150	14/03/2017	18.70	41.64	45.00	1.255
3100022660	625138	8149526	SIAGAS	N/A	Poço tubular	150	16/03/2017	3.00	33.90	45.00	1.109
3100022660	624254	8150865	SIAGAS	N/A	Poço tubular	132	20/03/2017	2.17	41.55	45.00	3.017
3100022660	623880	8147610	SIAGAS	N/A	Poço tubular	150	21/03/2017	5.01	59.99	45.00	0.397
3100022660	624101	8156370	SIAGAS	N/A	Poço tubular	134	22/03/2017	6.76	29.10	45.00	1.239

3100022670	624554	8156303	SIAGAS	N/A	Poço tubular	150	25/03/2017	7.09	38.69	40.00	1.266
3100022670	622449	8156773	SIAGAS	N/A	Poço tubular	192	24/04/2017	9.97	132.56	40.00	0.452
3100022670	614971	8157668	SIAGAS	N/A	Poço tubular	148	27/04/2017	31.90	67.73	40.00	1.954
3100022670	616850	8157764	SIAGAS	N/A	Poço tubular	126	30/04/2017	13.97	48.27	40.00	3.331
3100022670	623517	8157339	SIAGAS	N/A	Poço tubular	138	30/05/2017	7.73	68.54	40.00	0.834
3100022670	624578	8158136	SIAGAS	N/A	Poço tubular	144	02/06/2017	6.16	71.48	40.00	1.039
3100022680	622921	8156891	SIAGAS	N/A	Poço tubular	180	03/07/2017	7.88	24.75	25.70	1.523
3100022680	624041	8157442	SIAGAS	N/A	Poço tubular	168	11/07/2017	6.95	27.96	25.70	1.631
3100022670	614662	8157854	SIAGAS	N/A	Poço tubular	175	29/07/2017	45.76	54.73	40.00	4.415
3100022670	623484	8152736	SIAGAS	N/A	Poço tubular	120	25/11/2017	1.48	45.52	40.00	3.597

N/A: sem dado disponível.

Anexo II - Dados de transmissividade dos poços da bacia hidrogeológica do rio Vieira.

Poços	UTM X	UTM Y	Fonte	NE (m)	ND (m)	Vazão teste (m³/h)	Capacidade específica (m³/h/m)	Transmissividade (m²/s)	Transmissividade (m²/d)
3100006161	576361	8195638	SIAGAS	0	13.8	20.55	1.49	3.07E-04	4.42E-01
3100013968	610419	8177879	Relat. Riachão	0.3	5.19	144	17.62	5.61E-03	8.08E+00
3100014677	578621	8193444	SIAGAS	5.7	16.35	18	1.69	3.81E-04	5.49E-01
3100016736	586689	8184813	SIAGAS	16.09	34.4	24.73	1.35	4.84E-04	6.97E-01
3100020692	621997	8154812	SIAGAS	19.31	33.6	40	2.8	1.02E-03	1.46E+00
11347/2009	620250	8149941	IGAM	7.2	22	16.95	1.15	3.00E-04	4.32E-01
3100005007	585858	8182304	SIAGAS	14.6	43.15	3.92	0.14	1.80E-05	2.59E-02
3100010951	572335	8196875	SIAGAS	5.63	41.32	6.48	0.18	4.70E-05	6.77E-02
3100010962	564066	8196282	SIAGAS	2.4	54.96	8	0.15	1.30E-05	1.87E-02
3100013969	597610	8183314	SIAGAS	2	17.62	12	0.77	1.30E-05	1.87E-02
3100016688	584777	8182176	SIAGAS	34.86	58.12	5.44	0.23	5.00E-05	7.20E-02
3100016729	576292	8184957	SIAGAS	3.9	37.05	10.22	0.31	5.80E-05	8.35E-02
3100020693	625349	8155500	SIAGAS	37.87	51.03	21.81	1.66	3.17E-04	4.56E-01
3100021001	622893	8148696	SIAGAS	22.17	54.17	24.84	0.78	1.20E-04	1.73E-01
3100021204	569976	8179144	SIAGAS	22.3	43.7	13.32	0.62	6.80E-05	9.79E-02
06774/2009	572528	8171485	IGAM	25.6	39	10	0.75	1.18E-04	1.70E-01