



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**



**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**APLICAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO E SIG  
NA ANÁLISE DA VULNERABILIDADE E DISPONIBILIDADE HÍDRICA  
DAS SUB-BACIAS DO RIO RIACHÃO E RIO VIEIRA – MINAS GERAIS**

**Igor Alex Santos Soares**

**MONOGRAFIA nº 405**

Ouro Preto, agosto de 2021



**APLICAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO E SIG NA ANÁLISE  
DA VULNERABILIDADE E DISPONIBILIDADE HÍDRICA DAS  
SUB-BACIAS DO RIO RIACHÃO E RIO VIEIRA – MINAS GERAIS**

---





## **FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**

### **Reitora**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Aparecida Marlière de Lima

### **Vice-Reitor**

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

### **Pró-Reitora de Graduação**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Tânia Rossi Garbin

### **ESCOLA DE MINAS**

#### *Diretor*

Prof. Dr. Issamu Endo

#### *Vice-Diretor*

Prof. Dr. José Geraldo Arantes de Azevedo Brito

### **DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

#### *Chefe*

Prof. Ms. Edison Tazava



# **MONOGRAFIA**

**Nº 405**

## **APLICAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO E SIG NA ANÁLISE DA VULNERABILIDADE E DISPONIBILIDADE HÍDRICA DAS SUB-BACIAS DO RIO RIACHÃO E RIO VIEIRA – MINAS GERAIS**

**Igor Alex Santos Soares**

*Orientadora*

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Eugênia Silva de Souza**

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 400, ano 2021/1

**OURO PRETO**

**2021**

---

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: Igor Alex Santos Soares

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

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S676a Soares, Igor Alex Santos.

Aplicação do sensoriamento remoto e SIG na análise da vulnerabilidade e disponibilidade hídrica das sub-bacias do rio Riachão e rio Vieira - Minas Gerais. [manuscrito] / Igor Alex Santos Soares. - 2021. 79 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Eugênia Silva de Souza.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Sensoriamento remoto. 2. Hidrogeologia. 3. Aquíferos. 4. Carste. I. Souza, Maria Eugênia Silva de . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 556.33

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

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



## Ficha de Aprovação

---

### TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**TÍTULO:** APLICAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO E SIG NA ANÁLISE DA VULNERABILIDADE E DISPONIBILIDADE HÍDRICA DAS SUB-BACIAS DO RIO RIACHÃO E RIO VIEIRA – MINAS GERAIS

**AUTOR:** IGOR ALEX SANTOS SOARES

**ORIENTADORA:** Maria Eugênia Silva de Souza

**Aprovada em:** 17 de agosto de 2021

#### BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr.ª. Maria Eugênia Silva de Souza  \_\_\_\_\_ DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Lucas Pereira Leão  \_\_\_\_\_ DEGEO/UFOP

M.Sc. Dyana Caroline Ferreira Cardoso



DEGEO/UFOP

**Ouro Preto, 17/08/2021**

## AGRADECIMENTOS

---

Agradeço a minha família pelo amor incondicional e suporte que me deram.

Aos meus amados avós (in memoriam) Joaquim, Layr, Lucídio e Hermínia, pela minha família, valores e por tudo o que significam na minha vida.

Aos meus maravilhosos pais André e Helena, por serem meu alicerce estrutural e emocional, minha vitória não seria possível sem vocês ao meu lado.

À minha madrastra Martha por todo carinho, apoio e por ter me apresentado a geologia.

Ao meu padrasto Wagner por todo o suporte no meu crescimento durante minha jornada.

À minha amada irmã Isabella, por toda a nossa história, pelo exemplo que é e por me estimular sempre seguir em frente.

Aos professores do Departamento de Geologia pelo ensino de qualidade e valores humanos.

À professora Dr.<sup>a</sup> Maria Augusta Gonçalves Fujaco e a Dr.<sup>a</sup> Maria Antonieta Alcântara Mourão pela oportunidade, intermediação ao projeto e todo o incentivo.

À professora Dr.<sup>a</sup> Maria Paula Delício por todo o zelo, direcionamento e ensinamentos durante toda a graduação e iniciação científica no Museu de Ciência e Técnica da Escola de Minas.

À professora Dr.<sup>a</sup> Maria Eugênia Silva de Souza pela orientação, acolhimento e motivação.

Aos irmãos da República Rodoviária pela amizade e companheirismo.

Aos grandes amigos Victor Fagundes, Marcela de Oliveira, Gabriel Alves, Fernanda Marques, Aline Amaral, Julia Schiavon, Dyana Cardoso, Wendy Tanikawa, Matheus Lana, Daniel Bretas, Isabella Oliveira, Willyane Milagres, Luiza Silva, Emmanuelle Faeda e Jeferson Carvalho por todos os momentos maravilhosos compartilhados em Ouro Preto.

À comunidade LGBTQIA+ pela resistência, acolhimento, brilho e alma.

Por fim à Universidade Federal de Ouro Preto por ter permitido a realização de um sonho, não apenas no âmbito profissional, mas também no meu aprimoramento como cidadão.

# SUMÁRIO

---

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>viii</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÍNDICE DE QUADROS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE EQUAÇÕES</b> .....	<b>xiv</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA .....	2
1.3 OBJETIVOS .....	3
<b>2 BREVE SÍNTESE SOBRE HIDROLOGIA E CARSTE</b> .....	<b>5</b>
2.1 CICLO HIDROLÓGICO E AQUÍFEROS.....	5
2.2 O CARSTE .....	7
2.3 CONTAMINAÇÃO EM AQUÍFEROS CÁRSTICOS .....	9
2.3.1 GOD .....	9
2.3.2 DRASTIC .....	11
2.3.3 RISKE .....	11
2.3.4 EPIK .....	11
2.4 ESCOLHA DO MÉTODO PARA A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE .....	15
2.5 APLICAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO E SIG NA CARACTERIZAÇÃO E MONITORAMENTO DOS SISTEMAS CÁRSTICOS .....	17
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>19</b>
3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS E BASES TEMÁTICAS.....	19
3.2 MÉTODO EPIK .....	20
3.2.1 Epicarste (E).....	22
3.2.2 Cobertura de Proteção (P) .....	24
3.2.3 Condições de Infiltração (I).....	29
3.2.4 Desenvolvimento Cárstico (K).....	34
3.2.5 Índice de Proteção (F) .....	36
<b>4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>37</b>
4.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL .....	37
4.1.1 Grupo Bambuí .....	38
4.1.2 Grupo Areado .....	40
4.1.3 Grupo Urucuia.....	40
4.1.4 Depósito Detrítico-laterítico .....	41
4.1.5 Depósito Elúvio-Coluvionar.....	41

4.2 HIPSOMETRIA.....	43
4.3 COBERTURA DE SOLOS.....	44
4.4 CLIMA.....	45
4.5 PLUVIOSIDADE .....	45
4.6 VEGETAÇÃO .....	46
4.7 USO E OCUPAÇÃO .....	48
4.8 EVAPOTRANSPIRAÇÃO .....	49
4.9 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA.....	50
4.10 FONTES CONTAMINANTES .....	53
4.11 RESERVA AQUÍFERA PERMANENTE.....	54
4.12 RECARGA HÍDRICA SUBTERRÂNEA .....	55
4.13 POÇOS TUBULARES .....	56
4.14 ESPELEOLOGIA .....	57
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>59</b>
5.1 INTRODUÇÃO .....	59
5.1.1 Epicarste (E).....	60
5.1.2 Cobertura de Proteção (P).....	62
5.1.3 Condições de Infiltração (I) .....	65
5.1.4 Desenvolvimento Cárstico (K).....	67
5.1.5 Índice de Proteção (F).....	69
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>77</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.1</b> - Localização da área de estudo com os municípios limítrofes. ....	2
<b>Figura 2.1</b> - Ciclo hidrológico .....	5
<b>Figura 2.2</b> - Tipos de aquífero conforme o armazenamento .....	6
<b>Figura 2.3</b> - Os três tipos fundamentais de porosidades.....	7
<b>Figura 2.4</b> - Representação esquemática dos processos hidrológicos no epicarste.....	8
<b>Figura 2.5</b> – Fluxograma caracterizando a metodologia GOD. ....	10
<b>Figura 2.6</b> – Parâmetros determinantes do método DRASTIC. ....	11
<b>Figura 2.7</b> – Diferenças entre os formatos vetorial e matricial. ....	17
<b>Figura 3.1</b> – Articulação das folhas topográficas em relação à área de estudo. ....	19
<b>Figura 3.2</b> - Fluxograma com as etapas da análise do mapa de vulnerabilidade final utilizando o método EPIK.....	21
<b>Figura 3.3</b> – Mapa com as feições cásticas e estruturais determinantes do mapa Epicarste	21
<b>Figura 3.4</b> – Aplicação da ferramenta <i>line density</i> para setorizar as regiões fraturadas .....	23
<b>Figura 3.5</b> – Mapa com a espessura do solo tendo como referência a profundidade dos poços tubulares determinantes do mapa de cobertura de proteção .....	25
<b>Figura 3.6</b> – Mapa de poços tubulares.....	26
<b>Figura 3.7</b> – Mapa de uso e ocupação. ....	28
<b>Figura 3.8</b> – Mapa com as feições determinantes do mapa de cobertura de proteção. ....	30
<b>Figura 3.9</b> – Influência da declividade regional no mapa de condições de infiltração. ....	31
<b>Figura 3.10</b> – Potencialidade hídrica subterrânea. ....	33
<b>Figura 3.11</b> – Mapa com as cavidades e respectivos perímetros de proteção determinantes do mapa de desenvolvimento cárstico.....	34
<b>Figura 4.1</b> - Compartimentos estruturais do Cráton São Francisco. ....	37
<b>Figura 4.2</b> – Coluna estratigráfica do Grupo Bambuí .....	38
<b>Figura 4.3</b> – Mapa litoestrutural regional.....	41
<b>Figura 4.4</b> – Coluna estratigráfica simplificada da bacia intracratônica do São Francisco..	42
<b>Figura 4.5</b> - Mapa hipsométrico regional.....	43
<b>Figura 4.6</b> – Mapa de solos. ....	44
<b>Figura 4.7</b> – Mapa climático regional. ....	45
<b>Figura 4.8</b> – Mapa de precipitação média anual.....	46
<b>Figura 4.9</b> – Mapa de vegetação.....	47
<b>Figura 4.10</b> – Mapa de uso e ocupação. ....	48
<b>Figura 4.11</b> – Mapa de Evapotranspiração de referência. ....	49
<b>Figura 4.12</b> – Sistemas de produtividade aquífera. ....	51
<b>Figura 4.13</b> – Mapa hidrográfico.....	52
<b>Figura 4.14</b> – Domínios hidrogeológicos e principais fontes contaminantes.....	53
<b>Figura 4.15</b> – Reserva aquífera permanente. ....	54
<b>Figura 4.16</b> – Recarga hídrica subterrânea média. ....	55
<b>Figura 4.17</b> – Poço com perfil geológico em Montes Claros.....	56

<b>Figura 4.18</b> – Mapa de feições cársticas.....	56
<b>Figura 5.1</b> – Parâmetros do método EPIK determinando o fator de proteção.....	59
<b>Figura 5.2</b> – Mapa do Epicarste e feições analisadas no parâmetro.....	60
<b>Figura 5.3</b> - Mapa da cobertura de proteção e caracterização da espessura dos solos onde estão instalados os poços tubulares analisadas no parâmetro.....	62
<b>Figura 5.4</b> - Mapa de Condições de infiltração e feições analisadas no parâmetro I. ....	65
<b>Figura 5.5</b> - Mapa do desenvolvimento da rede cárstica e caracterização das feições analisadas no parâmetro K.....	67
<b>Figura 5.6</b> – Mapa do fator de proteção obtido pela ferramenta <i>Raster Calculator</i> . ....	70
<b>Figura 5.7</b> - Aprimoramento do mapa de vulnerabilidade final dos aquíferos, utilizando a ferramenta <i>Focal Statistics</i> (software <i>ArcGis 10.5</i> ). ....	71
<b>Figura 5.8</b> - Mapa de vulnerabilidade final dos aquíferos às fontes contaminantes com seus respectivos mapas temáticos que o determinaram. ....	72

## ÍNDICE DE QUADROS

<b>Quadro 2.1</b> – Caracterização dos pesos de cada mapa determinante do método RISKE. ...	12
<b>Quadro 2.2</b> - Caracterização dos critérios para a criação de cada mapa determinante do método EPIK.....	13
<b>Quadro 2.3</b> – Coeficiente de ponderação padrão para os parâmetros EPIK. ....	14
<b>Quadro 2.4</b> – Comparação entre métodos de análise de vulnerabilidade. ....	15
<b>Quadro 2.5</b> – Parâmetros caracterizados em cada método.....	16
<b>Quadro 3.1</b> – Caracterização hipsométrica. ....	20
<b>Quadro 3.2</b> – Parâmetro Cobertura de Proteção.....	24
<b>Quadro 3.3</b> – Distribuição dos poços tubulares. ....	26
<b>Quadro 3.4</b> – Distribuição dos tipos de solo. ....	27
<b>Quadro 3.5</b> – Caracterização do uso e ocupação.....	29
<b>Quadro 3.6</b> – Parâmetro Condições de Infiltração. ....	31
<b>Quadro 3.7</b> – Caracterização da recarga hídrica subterrânea média. ....	32
<b>Quadro 3.8</b> – Caracterização da potencialidade hídrica subterrânea média.....	33
<b>Quadro 3.9</b> – Parâmetro Desenvolvimento Cárstico.....	35
<b>Quadro 3.10</b> – Reserva aquífera permanente .....	35
<b>Quadro 3.11</b> – Coeficiente de ponderação padrão para os parâmetros EPIK. ....	36
<b>Quadro 3.12</b> – Classes de vulnerabilidade EPIK. ....	36
<b>Quadro 4.1</b> - Espessura típica da zona saturada de cada sistema aquífero. ....	55
<b>Quadro 4.2</b> - Demanda hídrica regional.....	56
<b>Quadro 4.3</b> - Distribuição das cavidades de acordo com a bacia hidrogeológica e sub-bacias .....	57
<b>Quadro 5.1</b> – Quantificação da cobertura dos parâmetros do mapa do epicarste .....	61
<b>Quadro 5.2</b> – Parâmetro Epicarste. ....	61
<b>Quadro 5.3</b> – Caracterização dos parâmetros do mapa de cobertura de proteção.....	63
<b>Quadro 5.4</b> – Quantificação das classes determinantes do mapa de cobertura de proteção	64
<b>Quadro 5.5</b> – Caracterização vegetal .....	64
<b>Quadro 5.6</b> - Caracterização das classes determinantes ao mapa de condições de infiltração .....	66
<b>Quadro 5.7</b> - Quantificação das classes determinantes do mapa de condições de infiltração .....	66
<b>Quadro 5.8</b> - Caracterização das classes determinantes ao mapa de condições de infiltração .....	68
<b>Quadro 5.9</b> - Quantificação das classes determinantes do mapa de condições de infiltração .....	68
<b>Quadro 5.10</b> - Coeficiente de ponderação para os mapas temáticos determinantes ao método EPIK.....	69
<b>Quadro 5.11</b> – Quantificação da área coberta por cada classe de vulnerabilidade. ....	73

## ÍNDICE DE EQUAÇÕES

---

<b>Equação 2.1</b> - Índice GOD .....	9
<b>Equação 2.2</b> - Índice DRASTIC .....	11
<b>Equação 2.3</b> - Índice RISKE .....	12
<b>Equação 2.4</b> - Índice RISKE e seus respectivos pesos.....	12
<b>Equação 2.3</b> - Índice EPIK .....	14
<b>Equação 2.4</b> - Índice EPIK e seus respectivos pesos.....	14

## Resumo

---

Regiões cársticas são grandes reservatórios subterrâneos de água doce. Geralmente são heterogêneos e anisotrópicos devido ao processo de dissolução por condutos e cavernas de alta permeabilidade. A vulnerabilidade à contaminação em aquíferos cársticos é alta, devido a rapidez da infiltração nesse sistema, não permitindo a degradação dos poluentes antes de atingirem o lençol freático. Com o objetivo de mapear a vulnerabilidade dos aquíferos das sub-bacias do rio Riachão e rio Vieira, localizadas no norte do estado de Minas Gerais, foi utilizado o método EPIK (Doerfliger & Zwahlen 1998), desenvolvido para zonas cársticas, permitindo assim caracterizar a área de estudo de maneira confiável e com baixo custo. O método EPIK (Doerfliger & Zwahlen 1998) é estruturado na sobreposição de mapas com índices ponderados, caracterizando quatro feições do aquífero cárstico: epicarste; cobertura de proteção; condições de infiltração; e desenvolvimento da rede cárstica. Esse método foi aplicado para o contexto da bacia hidrogeológica que abrange as sub-bacias do rio Riachão e rio Vieira, pois esta região é predominantemente composta por aquíferos cársticos e fraturados-cársticos expostos a poluentes oriundos do uso e ocupação do solo como agricultura, pecuária e urbanização. A vulnerabilidade dos aquíferos cársticos foi determinada pela sobreposição de mapas de índices ponderados de vários parâmetros como: clima, solo, vegetação, drenagem, tipo de poluente, geologia, entre outras feições. O produto final deste trabalho foi o mapa de vulnerabilidade, revelando que, 30,73% da área apresenta vulnerabilidade alta, 62,86% vulnerabilidade média e 6,41% baixa vulnerabilidade. Definir e mapear as regiões vulneráveis à contaminação nos aquíferos cársticos é de extrema importância, por contribuir como uma ferramenta de gestão dos mananciais subterrâneos visando o uso e ocupação do solo de forma planejada e harmônica com o meio ambiente.

**Palavras chave:** Aquíferos cársticos, Vulnerabilidade, EPIK.





# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

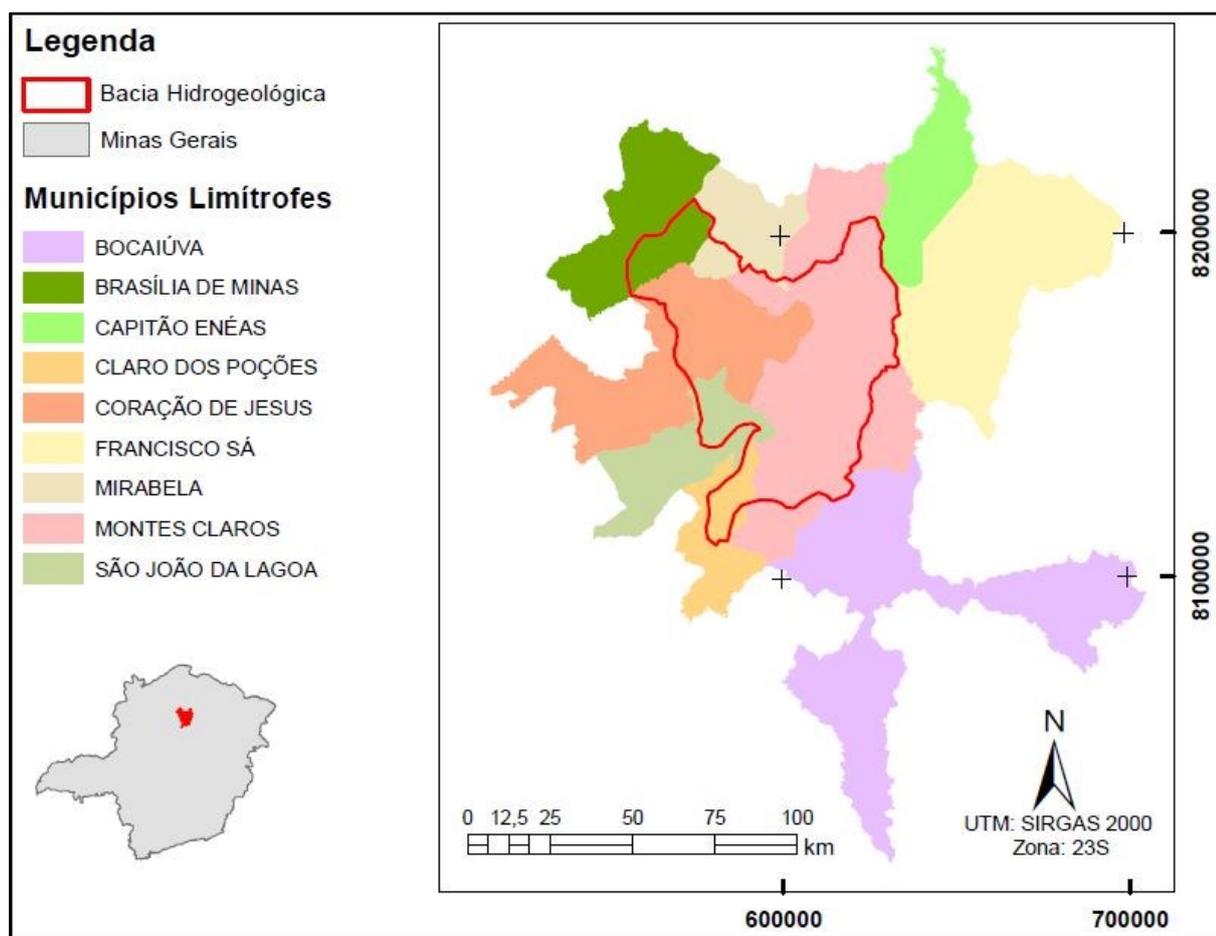
A água é um recurso essencial à humanidade e, conseqüentemente, torna-se fundamental o planejamento estratégico, gestão e conservação dos recursos hídricos pelos órgãos administrativos. Embora recubra cerca de 70% da superfície terrestre, menos de 3% deste recurso é correspondente à água doce (Feitosa & Filho 2008). Conforme Ferreira *et al.* (2007), da totalidade de água doce disponível, 68,9% estão nas calotas polares, geleiras e picos nevados, 29,9% são águas subterrâneas, 0,9% estão nos solos e pântanos e 0,3% em rios e lagos.

Verificando a grande importância da água subterrânea no abastecimento geral, devemos conhecer melhor estes reservatórios denominados aquíferos. Os aquíferos, de maneira generalista, são formações geológicas com permo-porosidade capaz de reter e transmitir água em condições naturais (Cleary 1989). Neste sentido, metodologias que buscam mapear as áreas dos aquíferos vulneráveis à contaminação podem contribuir no planejamento de uso e recuperação da qualidade da água.

A vulnerabilidade de aquíferos é definida através da susceptibilidade intrínseca do meio em ser contaminado por poluentes de origem antrópica. Aquíferos cárstico são considerados hidrogeologicamente mais anisotrópicos, quando comparado aos porosos e fraturados. Além disto, apresentam um fluxo de água subterrânea mais veloz, o que o configura como de alta vulnerabilidade à contaminação (Goldsheider & Drew 2007, Costa 2008). A determinação da vulnerabilidade dos aquíferos a contaminações também é influenciada por vários parâmetros tais como: solo, vegetação, drenagem, tipos de poluente, geologia, entre outras feições que descreveram a região superficialmente e de acordo com dados hidrometeorológicos e fisiográficos. Neste sentido, métodos para a avaliação da vulnerabilidade como o GOD (Foster 1987), DRASTIC (Aller *et al.* 1987), tiveram sua efetividade destacadas por Ribeiro *et al.* (2016), porém o método EPIK (Doerfliger *et al.* 1997), por ter sido desenvolvido especificamente para aquíferos cársticos, foi estudado e aplicado neste trabalho uma vez que a área de estudo engloba as sub-bacias do rio Riachão e rio Vieira, que são predominantemente dominadas por aquíferos cársticos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Este trabalho buscou analisar a dinâmica da água subterrânea explorada em domínios de aquíferos cársticos localizados na região centro-norte de Minas Gerais, medindo aproximadamente 4.400 Km<sup>2</sup>, abrangendo os municípios de Brasília de Minas, Mirabela, Montes Claros, Claro dos Poções, São João da Lagoa e Coração de Jesus; além de tangenciar os municípios de Francisco Sá e Bocaiúva (Figura 1.1).



**Figura 1.1** - Localização da área de estudo com os municípios limítrofes.

A necessidade em mapear a vulnerabilidade dos aquíferos cársticos a contaminação das ações antrópicas foi o que justificou o presente trabalho, pois a região estudada tem alta densidade populacional na área urbana, especialmente na cidade de Montes Claros, a qual utiliza os aquíferos cársticos da sub-bacia do rio Vieira predominantemente para o abastecimento público, expondo estes recursos hídricos subterrâneos a fontes de contaminação como esgotamento urbano, aterros sanitários, postos de gasolina e cemitérios.

Já no contexto da sub-bacia do rio Riachão, o aquífero cárstico também é explorado para o abastecimento, fornecendo água aos empreendimentos agropecuários desenvolvidos nesta região. Este

trabalho visou preservar os aquíferos predominantemente cársticos das sub-bacias do rio Vieira e do rio Riachão, ambas pertencentes a bacia do rio São Francisco.

### **1.3 OBJETIVOS**

Este trabalho de conclusão de curso teve como principal objetivo a confecção do mapa de vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos cársticos às fontes contaminantes predominantemente orgânicas (oriundos de postos de gasolina, lixões, aterros, e cemitérios), utilizando o método EPIK (Doerfliger *et al.* 1998), adaptado ao contexto das sub-bacias do rio Riachão e rio Vieira, pertencentes a bacia do rio São Francisco.

Os objetivos específicos são:

- Caracterização espacial da área utilizando ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto.
- Estudo das feições cársticas e redes de drenagem regionais
- Elaboração da base de dados integrada em SIG
- Elaboração dos quatro mapas temáticos de índices do método EPIK: Epicarste (E), cobertura de proteção (P), infiltração (I) e desenvolvimento cárstico (K), que foram determinantes ao mapa de vulnerabilidade final (F)
- Aplicação do sensoriamento remoto para a geração e interpretação dos mapas temáticos como ferramenta de gestão e análise de impacto do uso antrópico, colaborando para a divulgação científica e desenvolvimento sustentável da região.



#### 2.1 CICLO HIDROLÓGICO E AQUÍFEROS

Durante o ciclo hidrológico (Figura 2.1) o vapor d'água move-se na atmosfera até ser resfriado, retornando a superfície em forma de chuva ou neve. Superficialmente a água pode originar rios, lagos e permear regiões subterrâneas, ou evaporar, retornando a atmosfera e recomeçando o ciclo (Carneiro & Campos 2012).

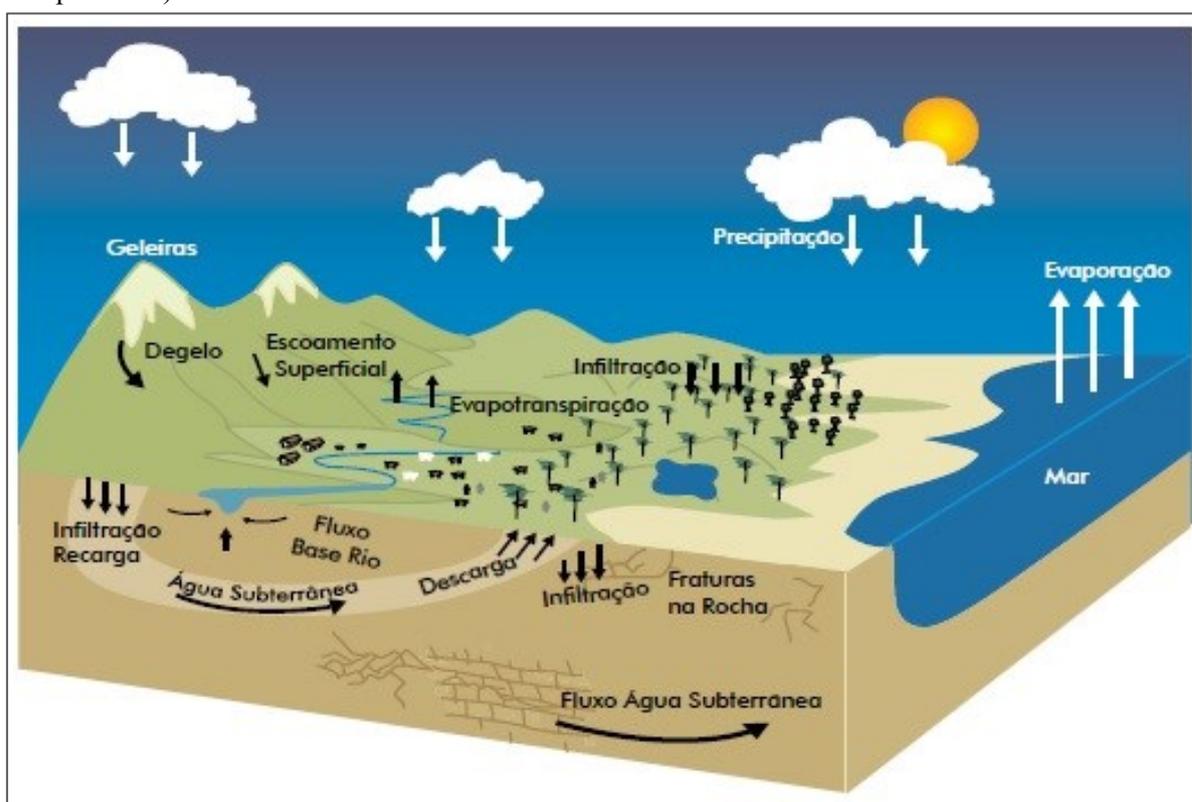
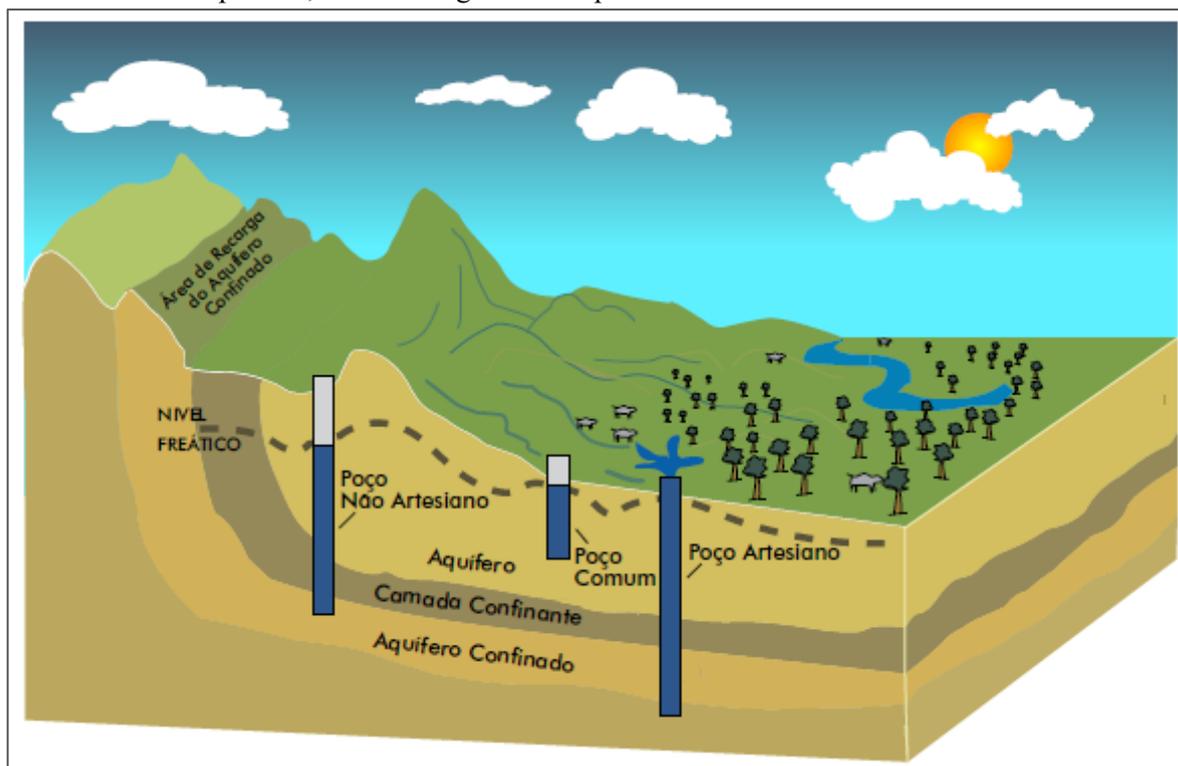


Figura 2.1 - Ciclo hidrológico (SRHU 2007).

As águas subterrâneas, de maneira geral, são aquelas que preenchem a porosidade dos solos, rochas e fraturas, já o aquífero é a formação geológica capaz de reter e transmitir água, conforme gradientes hidráulicos naturais, funcionando como um reservatório (Cleary 1989). Os aquíferos podem então ser classificados de acordo com a pressão de armazenamento das rochas limítrofes (Figura 2.2), sendo denominados de:

- **Aquífero livre ou freático:** Caracterizado pela permeabilidade em uma formação geológica de característica permeável, parcialmente saturada de água. A base deste aquífero é limitada por uma camada impermeável ou semipermeável existindo uma superfície livre sob pressão atmosférica.

- **Aquífero confinado ou artesiano:** Esta classe ocorre quando a água subterrânea está armazenada sob uma pressão maior do que a pressão atmosférica, devido à existência de uma camada confinante impermeável acima do aquífero. Os poços não artesianos são os furos perfurados em regiões de aquíferos confinados e o furo é feito acima do nível freático, permitindo a exploração da água utilizando bombeamento mecânico. Já os poços artesianos jorrantes são aqueles que exploram zonas saturadas com alta pressão estando próximas ao nível freático de pressão, levando a água até a superfície sem necessidade de bombeamento.



**Figura 2.2** – Tipos de aquífero conforme o armazenamento (SRHU 2007).

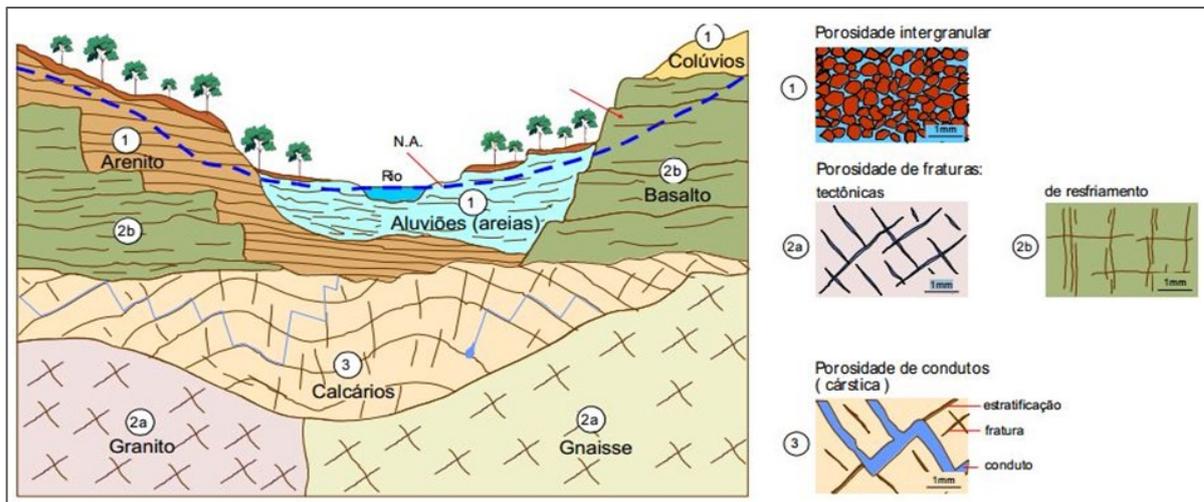
Segundo Feitosa & Filho (2008) aquíferos podem ser classificados em relação à forma das rochas armazenadora, retém ou conduz a água, sendo classificados como granular, fraturado e cárstico:

**Aquíferos Porosos:** Abrangendo grandes áreas, estes aquíferos possuem poros que armazenam grande volume de água que permitem sua circulação. Ocorrem nas bacias sedimentares e em várzeas onde se acumularam sedimentos arenosos, sedimentos consolidados por cimento (brechas) e sedimentos inconsolidados (estando as partículas desagregadas, como em dunas).

**Aquíferos Fraturados ou Fissurados:** Tem seu armazenamento diretamente proporcional ao número de fraturas das rochas armazenadoras, suas aberturas e interconexões, estando associados às rochas ígneas e metamórficas. Poços perfurados neste tipo, tem baixa vazão, gerando poço produtivo apenas quando interceptar fraturas condutoras de água.

**Aquíferos Cársticos:** Compostos por rochas carbonáticas, como o calcário, representam um tipo peculiar de aquífero fraturado, onde as fraturas foram ampliadas devido à dissolução do carbonato, gerando rios subterrâneos.

Os três tipos fundamentais de porosidades e estruturas normalmente presentes são ilustrados a seguir (Figura 2.3).



**Figura 2.3** – Os três tipos fundamentais de porosidades (retirado de Teixeira et al. 2003).

Na região estudada neste trabalho os aquíferos cársticos e fraturados cársticos predominam, logo, conhecer as características destes ambientes é fundamental para definir as peculiaridades destes sistemas aquíferos (PANM 2019). Além disto, a exploração superficial dos recursos hídricos não é suficiente para o abastecimento da região, logo, a exploração de água subterrânea é feita utilizando poços tubulares. Os poços tubulares, identificados na região de estudo, exploram a água para o abastecimento público, dessedentação animal (pecuária), agricultura, além de outros usos agropecuários (Chaves & Andrade 2014)

## 2.2 O CARSTE

Carste é um termo técnico que descreve o estilo de paisagem onde o intemperismo químico prevalece, onde as ações da dissolução e intemperismo geram feições específicas (cársticas), como cavernas, dolinas, sumidouros e surgências (Ford & Williams, 2007). É comum a associação dos litotipos altamente solúveis como rochas carbonáticas e evaporíticas na formação do relevo. Porém não é exclusividade destas rochas a evolução de feições cársticas, podendo também ocorrer em rochas de baixa solubilidade, como as siliciclásticas, quando condicionadas ao alto intemperismo típico de climas tropicais (Goldscheider & Drew, 2007).

O processo de carstificação está atrelado ao processo de dissolução, que ocorre predominantemente nas rochas carbonáticas. A absorção de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) pela água, gera a formação de ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), tornando-a ácida. A água agora ácida dissolverá as rochas solúveis ao percolar através das descontinuidades e estes processos de dissolução e intemperismo podem ser favorecidos por condições climáticas e a presença de matéria orgânica (Ford & Williams, 2007).

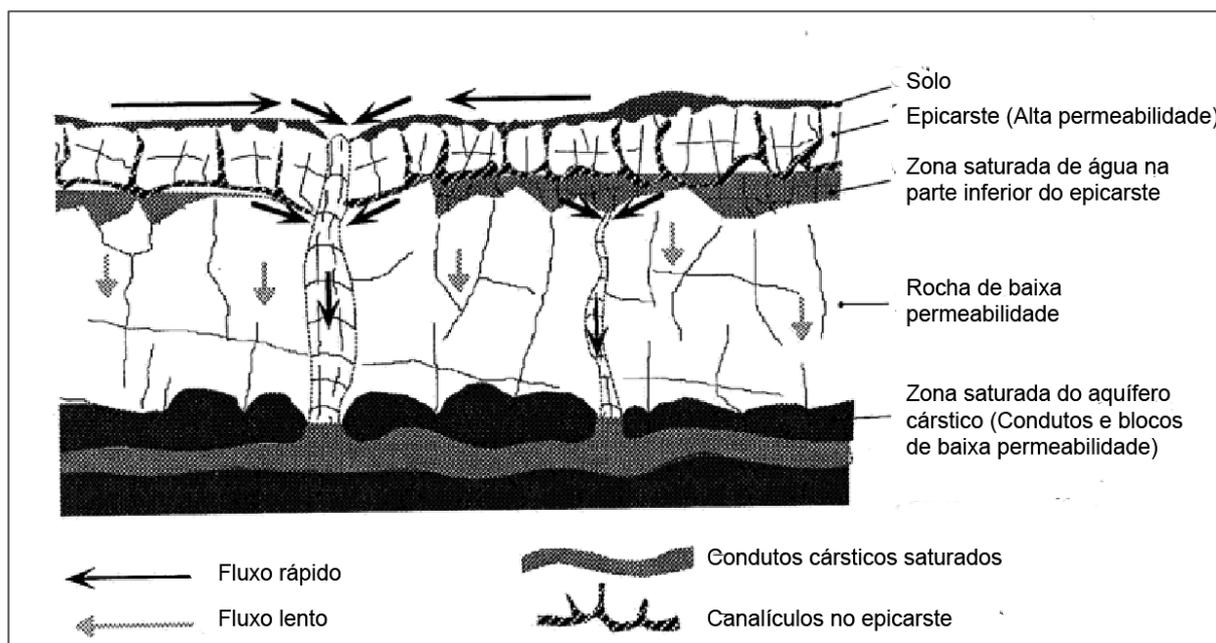
As feições cársticas são divididas em três domínios na literatura (Goldscheider & Drew, 2007):

O **exocarste** define os afloramentos superficiais das feições cársticas, sendo os mais fortemente intemperizados.

O **epicarste** define a região com alta permeabilidade, devido ao processo de carstificação, onde a rocha calcária apresenta contato com o solo sobrejacente

O **endocarste** caracteriza as projeções das cavidades subterrâneas, onde as rochas predominantemente têm baixa permeabilidade.

Pode-se verificar, portanto, que os aquíferos cársticos são heterogêneos e anisotrópicos, tendo diferentes velocidades de fluxo de água em profundidade (Cleary 1989; Cabral, 2008). As diferenças de comportamento visto nos fluxos de água subterrânea são esquematizadas na Figura 2.4.



**Figura 2.4** - Representação esquemática dos processos hidrológicos no epicarste (adaptado de Doerfliger & Zwahlen 1998).

## 2.3 CONTAMINAÇÃO EM AQUÍFEROS CÁRSTICOS

Estudos sobre a vulnerabilidade de aquíferos à contaminação tem crescido em todo o mundo. O termo “vulnerabilidade de aquíferos” foi inicialmente utilizado nos Estados Unidos da América por Le Grand (1964), e a partir da década de 1960 vários outros pesquisadores propuseram métodos de índices e sobreposição para determinação da vulnerabilidade em aquífero, devido a importância de setorizar e classificar as áreas mais sensíveis a impactos ambientais.

Consoante à Macêdo (2002), a capacidade de purificação e degradação dos contaminantes estão relacionadas à natureza litoestrutural do aquífero, distâncias percorridas pelos fluidos, velocidades de transporte e as reações físico-químicas e biológicas durante o fluxo subterrâneo.

Dentre os métodos de índices e sobreposição, destacam-se na análise da vulnerabilidade de aquíferos: GOD (Foster 1987, Foster & Hirata 1998); DRASTIC (Aller *et al.* 1987); RISKE (Katta *et al.* 2010) e EPIK (Doerfliger & Zwahlen 1998). Estes métodos serão brevemente explanados a seguir.

### 2.3.1 GOD

A análise da vulnerabilidade dos aquíferos pela metodologia GOD, proposta por Foster & Hirata (1998) e desenvolvida pela Organização Mundial de Saúde, é uma das mais facilmente aplicadas em virtude do reduzido número de parâmetros, possibilitando seu uso mesmo em situações com poucos dados disponíveis. Estes parâmetros fundamentais analisados são:

G – Ocorrência de água subterrânea (*Groundwater occurrence*).

O – Classificação litológica da zona vadosa e camadas confinantes (*Overall aquifer class*).

D – Profundidade do lençol freático (*Depth to groundwater table*).

A fórmula que determina a vulnerabilidade para o método GOD é definida pela Equação 2.1

$$\text{Índice GOD} = \alpha \times G + \beta \times O + \gamma \times D \quad (\text{Equação 2.1})$$

Sendo:

Índice GOD: Índice abrangente de vulnerabilidade

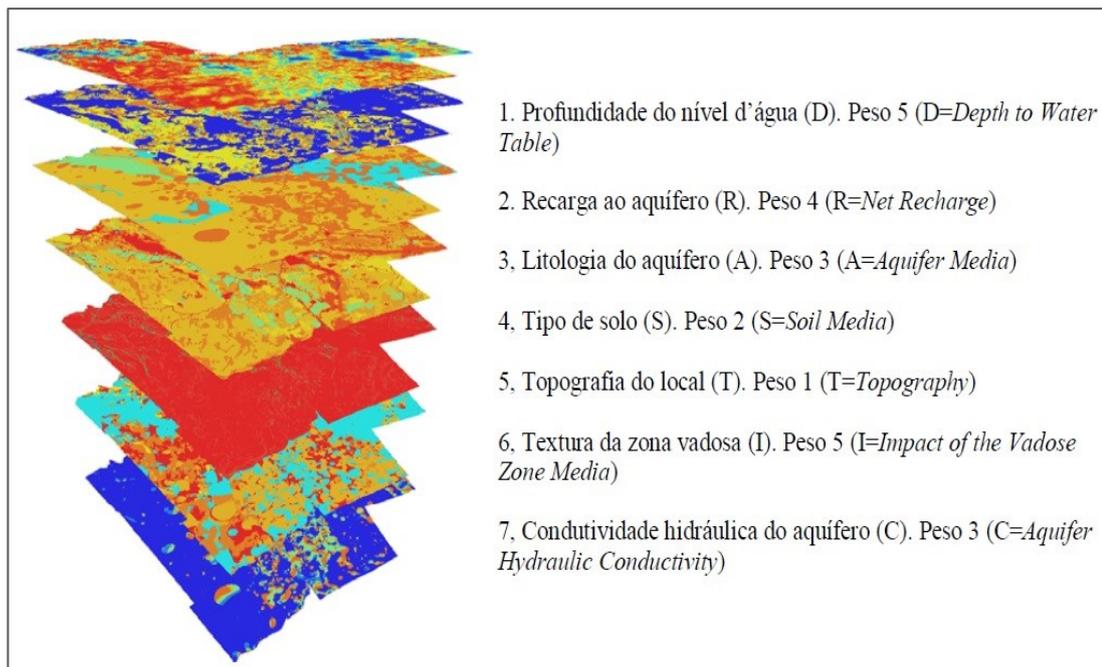
$\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ : Taxa de ponderação de cada critério

G, O e D: Parâmetros determinantes da vulnerabilidade



### 2.3.2 DRASTIC

O Índice DRASTIC foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA – *United States Environmental Protection Agency*), na década de 1980, para avaliar a vulnerabilidade das reservas aquíferas subterrâneas, considerando sete parâmetros (profundidade do nível freático, recarga do aquífero, composição, tipo de solo, topografia, influência da zona vadosa e condutividade hidráulica), conforme descrito por Aller *et al.* (1987) e ilustrado na Figura 2.6.



**Figura 2.6** – Parâmetros determinantes do método DRASTIC (Fonte: Guiguer & Kohnke 2002).

O índice DRASTIC corresponde à soma ponderada dos sete parâmetros, anteriormente citados, conforme a Equação 2.2 a seguir:

$$\text{Índice Drastic} = Dr \times Dw + Rr \times Rw + Ar \times Aw + Sr \times Sw + Tr \times Tw + Ir \times Iw + Cr \times Cw$$

(Equação 2.2)

Sendo:

Índice Drastic: Índice abrangente de vulnerabilidade

Dr, Rr, Ar, Sr, Tr, Ir e Cr: Taxa de ponderação de cada critério

Dw, Rw, Aw, Sw, Tw, Iw e Cw: Parâmetros determinantes da vulnerabilidade

A metodologia aplicada nesse método considera, para cada um dos sete parâmetros, um peso “r” variando de 1 a 10, além do peso “w” que varia de 1 a 5. O fator mais relevante recebe peso 5, já o menos significativo 1. O índice de vulnerabilidade (Índice DRASTIC, Aller *et al.* 1987), oscilará então entre 23 e 230, e quanto maior o índice maior será a vulnerabilidade à contaminação.

### 2.3.3 RISKE

O método RISKE (Kattaa *et al.* 2010), segue o mesmo princípio do método EPIK (Doerfliger 1996) em que foi baseado, e objetiva mapear a vulnerabilidade dos ambientes cársticos através da sobreposição de mapas temáticos com índices ponderados. Neste método são 5 parâmetros que determinam o mapa final de vulnerabilidade cárstica, correspondendo a aspectos específicos do regime de fluxo, sendo eles:

- R – Rocha componente do aquífero,
- I – Condições de infiltração,
- S – Solo,
- K – Grau de carstificação,
- E – Presença ou ausência de epicarste.

Cada um dos parâmetros é mapeado e classificado em intervalos significativos que têm um impacto sobre o potencial poluidor, sendo atribuído a cada um desses fatores uma classificação entre 1 e 4. Os multiplicadores de peso são utilizados para ponderar os fatores, conforme a sua respectiva importância (Equação 2.3):

$$I_g = \alpha \times R + \beta \times I + \delta \times S + \gamma \times K + \varepsilon \times E \quad (\text{Equação 2.3})$$

Sendo:

Ig: Índice abrangente de vulnerabilidade

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  e  $\varepsilon$ : Taxa de ponderação de cada critério

R, I, S, K, E: Parâmetros determinantes da vulnerabilidade

Esse método foi aplicado e testado na região costeira da Síria e o processamento digital de imagens permitiu a codificação e caracterização da vulnerabilidade cárstica ao utilizar os pesos descritos a seguir (Quadro 2.1), compondo a equação final do método RISKE (Equação 2.4).

**Quadro 2.1** – Caracterização dos pesos de cada mapa determinante do método RISKE (adaptado de Kattaa *et al.* 2010).

Pesos dos parâmetros do método RISKE				
R	I	S	K	E
$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$\varepsilon$
0,1	0,5	0,1	0,2	0,2

$$I_g = 0,1 \times R + 0,5 \times I + 0,1 \times S + 0,2 \times K + 0,2 \times E \quad (\text{Equação 2.4})$$

Os menores índices obtidos pelo método RISKE classificam as áreas mais vulneráveis a contaminação, logo, as áreas mais seguras estão definidas pelos maiores valores.

### 2.3.4 EPIK

O método EPIK (Doerfliger & Zwahlen 1998) é um método de determinação da vulnerabilidade das águas subterrâneas em aquíferos cársticos, que considera a sobreposição ponderada de dados geoespaciais que descrevem as características geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas, com destaque para o fluxo subterrâneo, gerando assim um índice de proteção da área estudada. O índice de proteção (F) é obtido com base na sobreposição ponderada dos seguintes parâmetros:

**E** – Epicarste

**P** – Cobertura de proteção

**I** – Condições de infiltração

**K** – Desenvolvimento da rede cárstica

Os critérios e tipos de classificação determinantes para o mapeamento de cada parâmetro são verificados no Quadro 2.2.

**Quadro 2.2** – Caracterização dos critérios para a criação de cada mapa determinante do método EPIK

Parâmetro	Critério	Tipos	Classificação
Epicarste (E)	Geomorfologia Cárstica	E1	1
		E2	3
		E3	4
Cobertura de proteção (P)	Espessura do solo acima do aquífero	P1	1
		P2	2
		P3	3
		P4	4
Condições de infiltração (I)	Cursos de água e declividade predominante	I1	1
		I2	2
		I3	3
		I4	4
Desenvolvimento da rede cárstica (K)	Grau de carstificação	K1	1
		K2	2
		K3	3

O fator de proteção é obtido pela sobreposição matricial conforme a Equação 2.5:

$$F = \alpha \times E + \beta \times P + \gamma \times I + \delta \times K \text{ (Equação 2.5)}$$

Sendo:

F: Fator de proteção / Índice abrangente de vulnerabilidade

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\delta$ : Taxa de ponderação de cada critério

E, P, I e K: Parâmetros determinantes da vulnerabilidade

O fator de ponderação de cada parâmetro pode ser verificado no Quadro 2.3.

**Quadro 2.3** - Coeficiente de ponderação padrão para os parâmetros EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1998).

Parâmetro	Epicarste	Cobertura de Proteção	Condições de infiltração	Rede Cárstica
	<b>E</b>	<b>P</b>	<b>I</b>	<b>K</b>
Coeficiente	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
Peso	3	1	3	2

A fórmula final do método EPIK é definida a partir da atribuição dos pesos relativos aos coeficientes (Equação 2.6).

$$F = 3 \times E + P + 3 \times I + 2 \times K \text{ (Equação 2.6)}$$

O mapa final de vulnerabilidade tem os menores valores descrevendo as regiões mais susceptíveis a contaminação, regiões estas de enfoque para planos de manejo e proteção.

## 2.4 ESCOLHA DO MÉTODO PARA A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE

Ao analisar os métodos mais comumente aplicados para caracterizar a vulnerabilidade intrínseca do meio aquífero foram avaliadas as vantagens e desvantagens de cada um para determinar a escolha do método mais coerente ao estudo de caso deste trabalho (Quadro 2.4).

Método	Utilização	Vantagens	Desvantagens
Drastic (Aller et al. 1987)	Avaliação quantitativa de incidência de poluentes	Avaliação quantitativa mais acurada	Muitos parâmetros a serem analisados, dados hidrológicos e dos contaminantes são necessários
GOD (Foster 1987)	Avaliação do perigo de poluição do aquífero com o propósito de criar prioridades, determina a vulnerabilidade intrínseca	Poucos parâmetros e trabalha com poucos dados	Método de aplicação local e o fator carste não é o principal
RISKE (Katta <i>et al.</i> 2010)	Método de avaliação de vulnerabilidade	Poucos parâmetros	Utilizado para se determinar o tempo de permanência de determinado contaminante no aquífero cárstico
EPIK (Doerfliger & Zwahlen 1998)	Utilizado no planejamento do uso e ocupação, proteção de áreas de captação sendo obtido por um índice de proteção final	Poucos parâmetros, fácil avaliação e rápido resultado	Utilizado para escalas locais

**Quadro 2.4** – Comparação entre métodos de análise de vulnerabilidade (adaptado de Lenhare 2014).

Em relação as variáveis fisiográficas analisadas por cada método podemos verificar em destaque os métodos DRASTIC, GOD, RISKE E EPIK. (Quadro 2.5).

**Quadro 2.5** – Parâmetros caracterizados em cada método (adaptado de Lenhare 2014).

Método / Fatores	DRASTIC	GOD	RISKE	EPIK
Topografia / Declividade		X		X
Rede de drenagem		X	X	X
Tipo de solo		X	X	X
Vegetação			X	
Zonas de recarga	X	X	X	X
Epicarste			X	X
Profundidade nível d'água	X	X	X	X
Caracterização	X	X	X	X
Rede cárstica		X	X	X
Uso do solo				X

Segundo Paixão (2006), os potenciais poluentes das sub-bacias dos rios Verde Grande (como por exemplo a sub-bacia do rio Vieira), Riachão e Jequitaiá, área estudada, estão correlacionados às atividades urbanas e agrícolas, agravados por disputa de uso das águas e à baixa disponibilidade hídrica superficial.

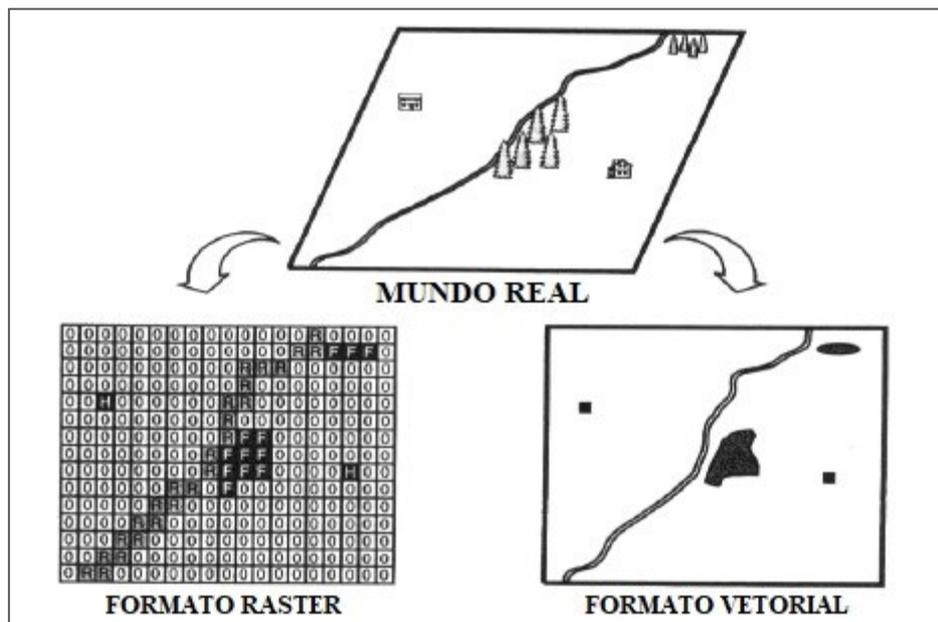
Logo, o método EPIK (Doerfliger & Zwahlen 1998) foi o escolhido para a metodologia aplicada neste trabalho, pois além de ser desenvolvido especificamente para ambientes cársticos, é o que tem avaliação com resultados mais rápidos utilizando poucos parâmetros (quatro mapas de sobreposição), sendo adotado também por auxiliar no planejamento do uso e ocupação do solo na região.

## 2.5 APLICAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO NA CARACTERIZAÇÃO E MONITORAMENTO DOS SISTEMAS CÁRSTICOS

O termo sensoriamento remoto, foi inicialmente utilizado em 1960 caracterizando apenas a aquisição de informações de uma região sem contato físico direto com os alvos (Novo & Panzoni 2001). Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são ferramentas ideais para delimitação de áreas, descrição das relações espaciais e para implementar modelos estatísticos e, desta forma, passíveis de serem testados (Walker 1990).

O SIG é a principal ferramenta de geoprocessamento, permitindo compilar diferentes formatos de dados e realizando análises otimizadas. O termo geoprocessamento caracteriza as técnicas matemáticas e computacionais empregadas no tratamento dos dados geográficos e em sua interpretação (Novo & Panzoni 2001). A organização do banco de dados numa plataforma SIG permite uma elevada agilidade para a geração de modelos dinâmicos auxiliares às decisões, interpretações e consequentemente uma maior eficácia na avaliação multiparamétrica de uma região.

A transcrição dos dados espaciais pode ser feita utilizando dois formatos: o matricial (*raster*) e o vetorial (Figura 2.7).



**Figura 2.7** - Diferenças entre os formatos vetorial e matricial (adaptado de Davis 2000).

Os vetores permitem descrever a posição e direção dos dados. O formato vetorial delimita os objetos alvos com maior acurácia que os dados matriciais, em função desse formato utilizar linhas contínuas, sem o efeito de generalização que ocorre no formato matricial. (Davis 2000).

O formato matricial é estruturado em células de grade, sendo que cada célula pode representar uma feição única podendo ser atribuído um número ou um rótulo, logo, a célula define a unidade mínima de mapeamento e caracterizando o menor tamanho que um atributo da paisagem pode ser representado.

O ajuste do tamanho da célula pode ser feito de acordo com a estrutura da grade (100 x 200 células) ou por unidades de terreno (cada célula = 30m), dependendo das especificidades do projeto (Davis, 2000).

O banco de dados deste trabalho será delimitado através de *shapefiles* em formato vetorial, para a maior acurácia possível, e depois será convertido em formato matricial (*raster*) para embutir os valores classificados em cada parâmetro determinante ao método EPIK.

Deste modo, os quatro mapas temáticos determinantes do método EPIK (Epicarste, Cobertura de solos, Condições de infiltração e Rede cárstica), delimitarão as regiões sensíveis aos problemas ambientais com o uso do SIG e modelos estatísticos, permitindo classificar a vulnerabilidade na unidade aquífera.

### 3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS E BASES TEMÁTICAS

Os dados utilizados para a elaboração dos mapas temáticos deste trabalho foram:

- Imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*)

As imagens do satélite SRTM foram adquiridas na página da *United States Geological Survey* (USGS). O sistema de coordenadas foi padronizado em UTM, *Datum* SIRGAS 2000. As imagens de Radar foram utilizadas para caracterizar a fisiografia da área de estudo.

- Imagens de satélite Landsat 8 – Alos Palsar, adquiridas na página UAF – Alaska Facilities.
- Sistema de informações geográficas (SIG) do Projeto Águas do Norte de Minas (PANM 2019)
- Folhas topográficas e relatórios técnicos, na escala 1:100.000 (Figura 3.1).

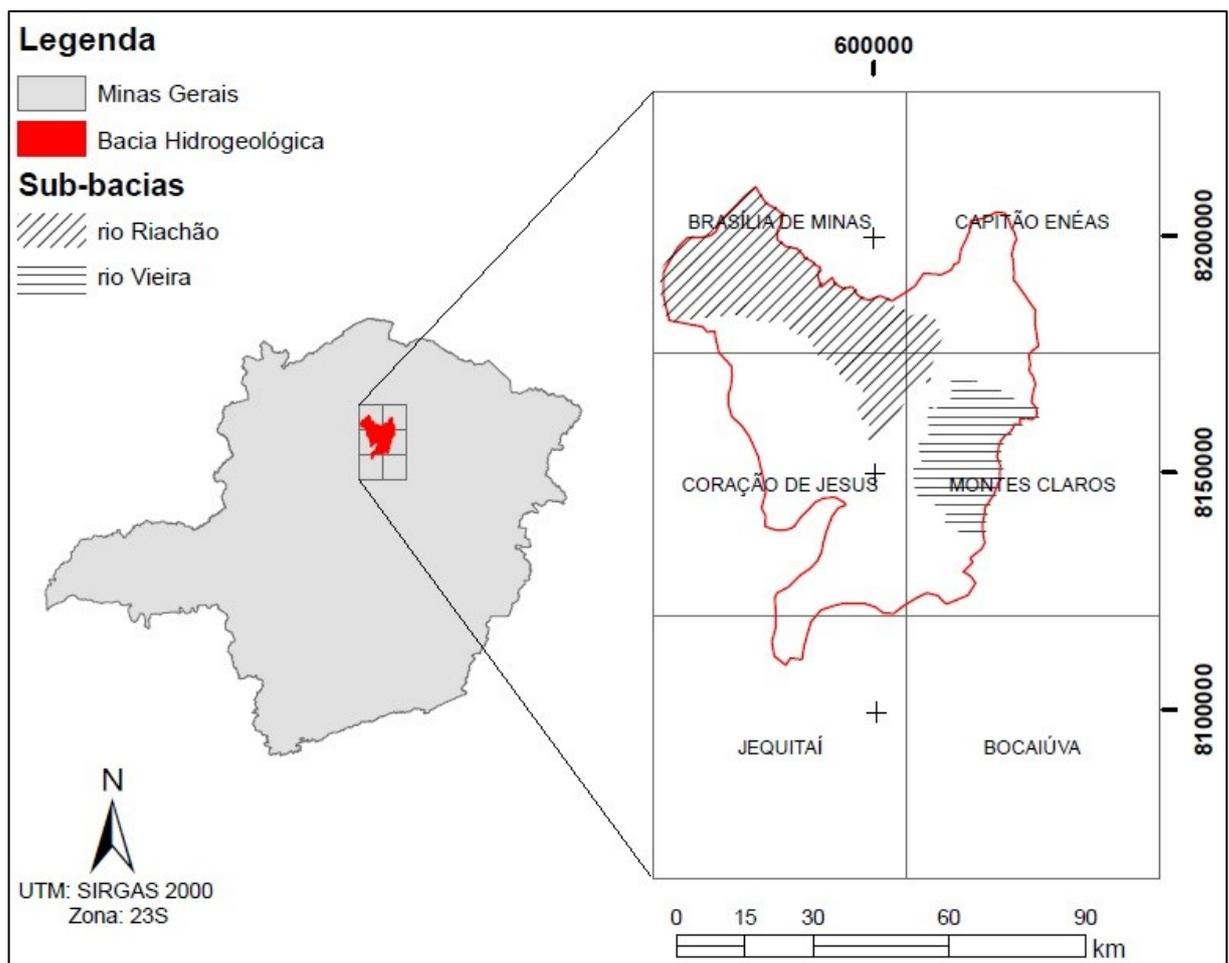


Figura 3.1 – Articulação das folhas topográficas em relação à área de estudo

- Mapa de solos do Estado de Minas Gerais Estado 1:100.000 (UFV *et al.* 2010);
- Espeleologia: Cavidades Naturais Subterrâneas Brasileiras (CECAV 2018)
- Shapefiles dos poços tubulares cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS 2018)

Para a caracterização global dos parâmetros foram utilizados dados hidrogeológicos, quantitativos e meteorológicos, objetivando estabelecer a influência dos diversos fatores relacionados ao meio físico e evolução das formas de uso e ocupação.

Utilizando a ferramentas de análise *Zonal Statistics as Table (Spatial Analyst)* do software ArcGis 10.5 na base de dados de Radar (SRTM), foi possível gerar o mapa hipsométrico (Figura 3.6).

A caracterização das faixas altimétricas e o comportamento médio para a bacia hidrogeológica e as sub-bacias do rio Riachão e rio Vieira, pode ser vista a seguir (Quadro 3.1).

**Quadro 3.1** – Caracterização hipsométrica (adaptado de PANM 2019).

Altimetria (m)			
Referencial	Mínima	Máxima	Média
Área de estudo	439	1107	810
Sub-bacia rio Riachão	626	989	829
Sub-bacia rio Vieira	544	1040	744

### 3.2 MÉTODO EPIK

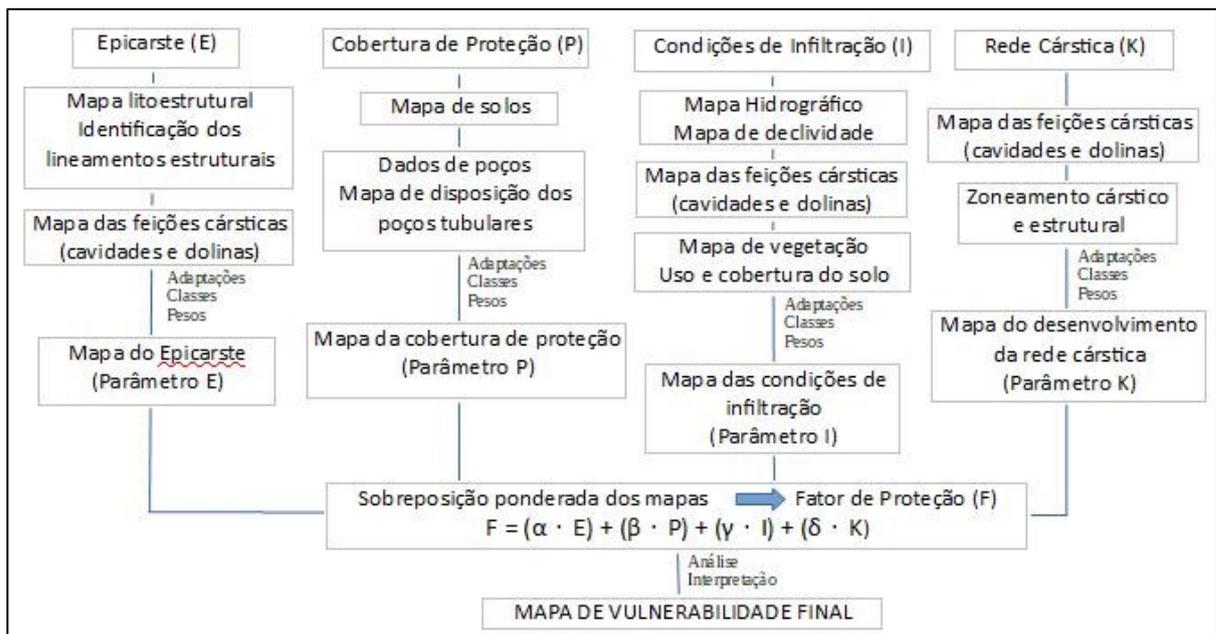
Para caracterizar a vulnerabilidade na unidade hidrogeológica composta pelas sub-bacias do rio Riachão e rio Vieira, na bacia do rio São Francisco, norte de Minas, foram utilizados sistemas de informação geográfica (SIG) conjuntamente com técnicas de processamento digital de imagens (PDI).

O método EPIK (Doerfliger & Zwahlen 1997) foi escolhido para a área de estudo por ter sido desenvolvido para a análise da vulnerabilidade de aquíferos em regiões cársticas, obtendo sucesso na determinação do fator de proteção mesmo quando alguns parâmetros são adaptados às condições hidrodinâmicas regionais (Lenhare 2014), por isso será aqui descrito com maior detalhamento.

O método EPIK (Doerfliger & Zwahlen 1997) é um modelo paramétrico, desenvolvido pelo *Centre of Hydrogeology of the University of Neuchâtel* associada a *Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL)* em parceria com a *National Hydrological and Geological Survey*

(SNHGS), sendo utilizado para avaliar a vulnerabilidade em aquíferos cársticos, analisando os parâmetros referentes ao: E – Epicarste; P – Cobertura de Proteção; I – Condições de Infiltração; e K – Rede cárstica.

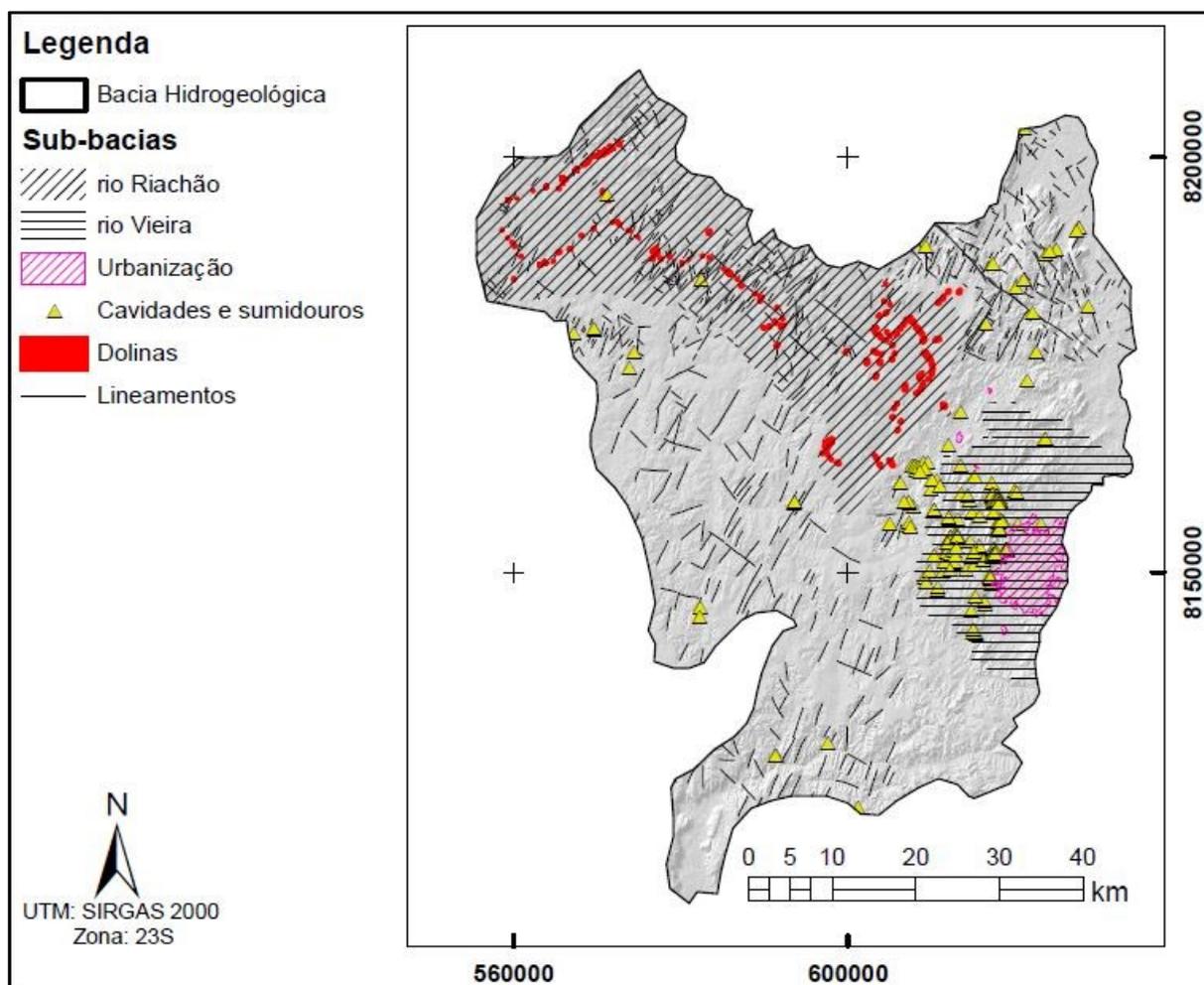
Cada parâmetro é classificado de acordo com valores de ponderação específicos, desta forma o somatório destes valores gera o índice de vulnerabilidade ou fator de proteção (F), quanto maior for o fator de proteção, menos vulnerável a área estará. O fluxograma (Figura 3.2) representa as etapas para a aplicação deste método.



**Figura 3.2**– Fluxograma com as etapas da análise do mapa de vulnerabilidade final utilizando o método EPIK (adaptado de Ribeiro *et al.* 2016).

### 3.2.1 Epicarste (E)

A construção do mapa Epicarste foi baseada nas feições observadas no mapa de feições cársticas da área, abrangendo as dolinas e cavidades (CANIE 2018), bem como no mapa de lineamentos (mapa litoestrutural). O mapa com as feições cársticas e lineamentos identificados na região de estudo é visto a seguir (Figura 3.3).



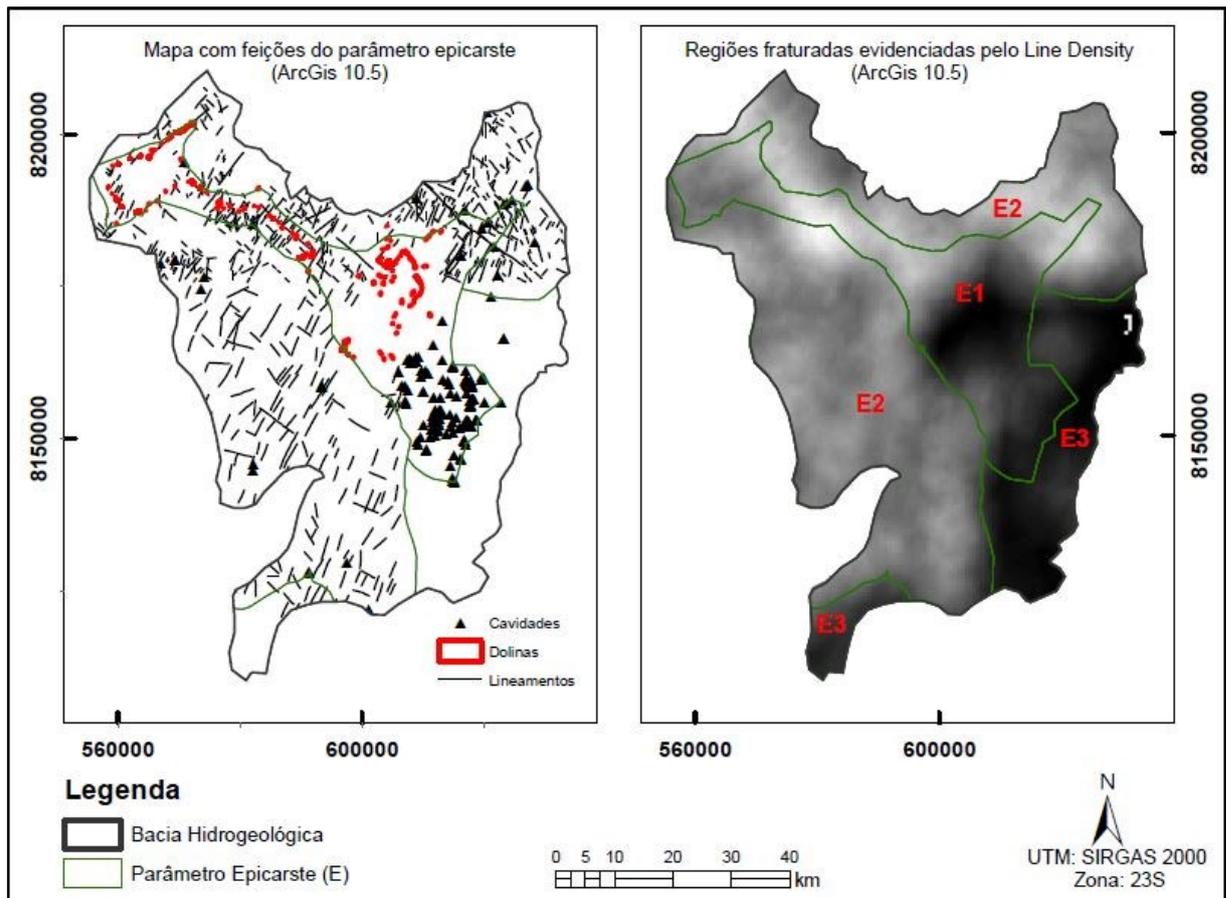
**Figura 3.3** – Mapa com as feições cársticas e estruturais determinantes do mapa Epicarste (adaptado de CANIE 2018).

A caracterização do parâmetro epicarste é altamente subjetiva (Goldscheider 2002), visto que não existe um modelo específico disponível para identificar o epicarste. Devido a grande extensão da área de estudo, foi realizada a setorização das classes E1, E2 e E3 através de ferramentas de análise espacial do software *ArcGis 10.5*. A seguir estas classes são detalhadas, conforme as considerações de Doerfliger & Zwahlen (1998).

A **classe E1** indica a região onde o epicarste encontra-se mais vulnerável, estando associada a depressões e cavidades com forte fluxo de água, dolinas, alívios em regiões de mina e afloramentos intensamente fraturados. Para a delimitação da classe E1 foi criado um polígono abrangendo as regiões com alta densidade de feições cársticas (cavidades e dolinas). O polígono construído abrange um *buffer*

de 250 m circundante às feições cársticas identificadas regionalmente, caracterizando portanto as zonas mais sensíveis aos contaminantes.

A **classe E2** incorpora zonas geomorfologicamente intermediárias associadas aos maciços fraturados. O mapa de lineamentos foi aplicado ao estudo de caso conforme Doerfliger (1998), de tal forma que as áreas de interseções de lineamentos definem as zonas altamente fraturadas. Aplicando a ferramenta *line density* (ArcGis 10.5) na *shapefile* de lineamentos, foi possível identificar as regiões com características geomorfológicas da classe E2 (Figura 3.4).



**Figura 3.4** – Aplicação da ferramenta *line density* para setorizar as regiões fraturadas (adaptado de CANIE 2018).

A **classe E3** incorpora o restante da área da bacia e não possui as características morfológicas já mencionadas (região escura do mapa obtido pela ferramenta *line density*). Essa classe define regiões com impermeabilização do solo, alta urbanização, além da ausência de feições cársticas e lineamentos estruturais.

### 3.2.2 Cobertura de Proteção (P)

O termo cobertura de proteção se refere não apenas ao solo, mas também às outras formações que podem se sobrepor a um aquífero cárstico, como depósitos quaternários ou formações não cársticas pré-quaternárias (Doerfliger 1996). Os parâmetros pedológicos variam espacialmente, logo, não são facilmente determinados, assim devem ser analisados em conjunto com os litotipos aflorantes na região de estudo.

Conforme Doerfliger & Zwahlen (1998), tem-se:

A **classe P1** é omitida para formações de baixa permeabilidade, que são inferiores a 20 cm, caracterizadas para fornecer baixa proteção.

A **classe P2** representa uma formação geológica combinada com solo, tendo de 20 a 100 cm.

A **classe P3** representa uma formação geológica combinada de solo com outro litotipo de baixa permeabilidade, porém tem mais de um metro e menos que 8 m de profundidade.

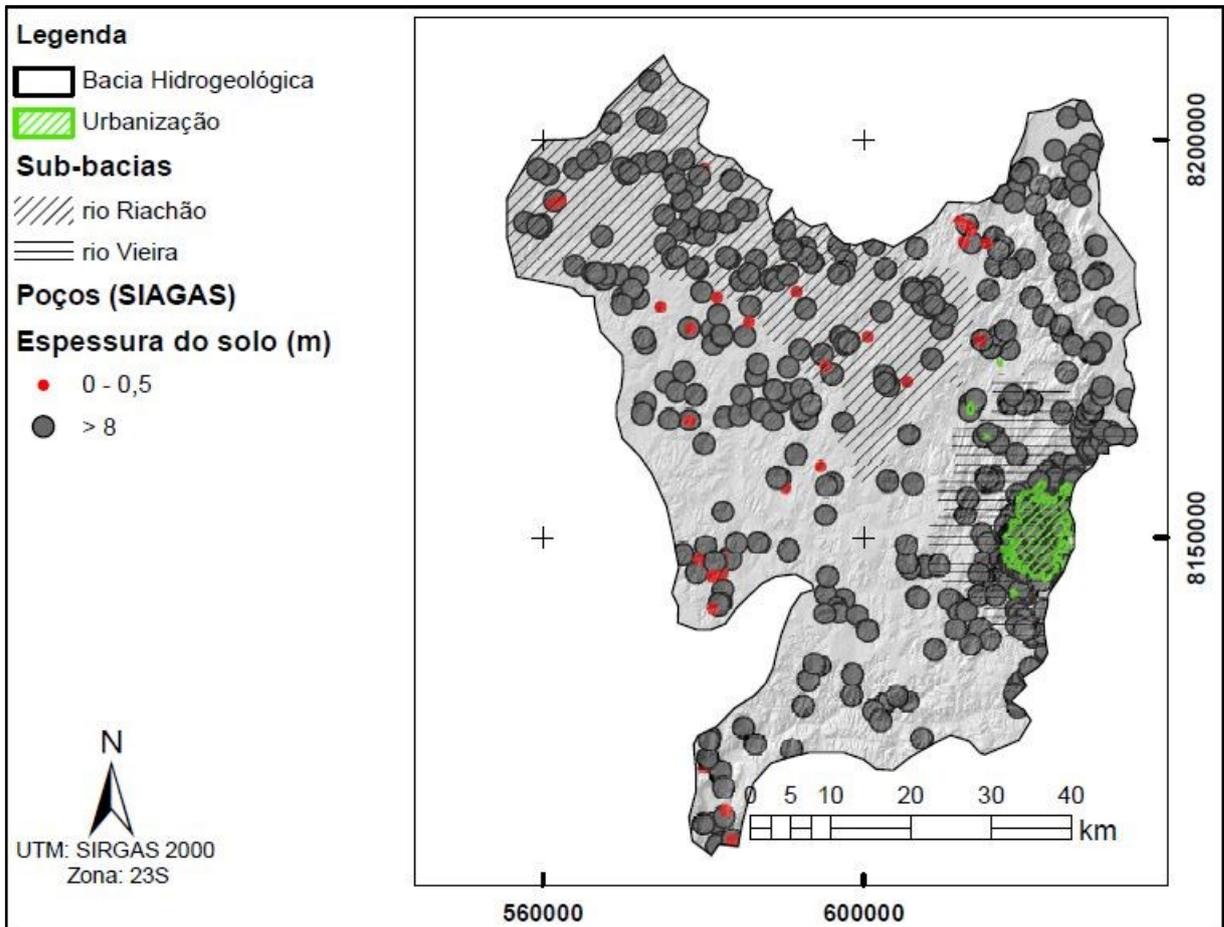
A **classe P4** representa uma cobertura de mais de 8 metros e com baixa permeabilidade, como verificado em formações muito siltosas ou muito argilosas.

Para as coberturas de proteção de solo diretamente sobrejacente às formações cársticas ou muito permeáveis, tem-se a classificação de acordo com as espessuras do solo acima do aquífero (sintetizadas no Quadro 3.2).

**Quadro 3.2** - Parâmetro Cobertura de Proteção. Adaptado de Doerfliger & Zwahlen 1998 e Pereira 2018.

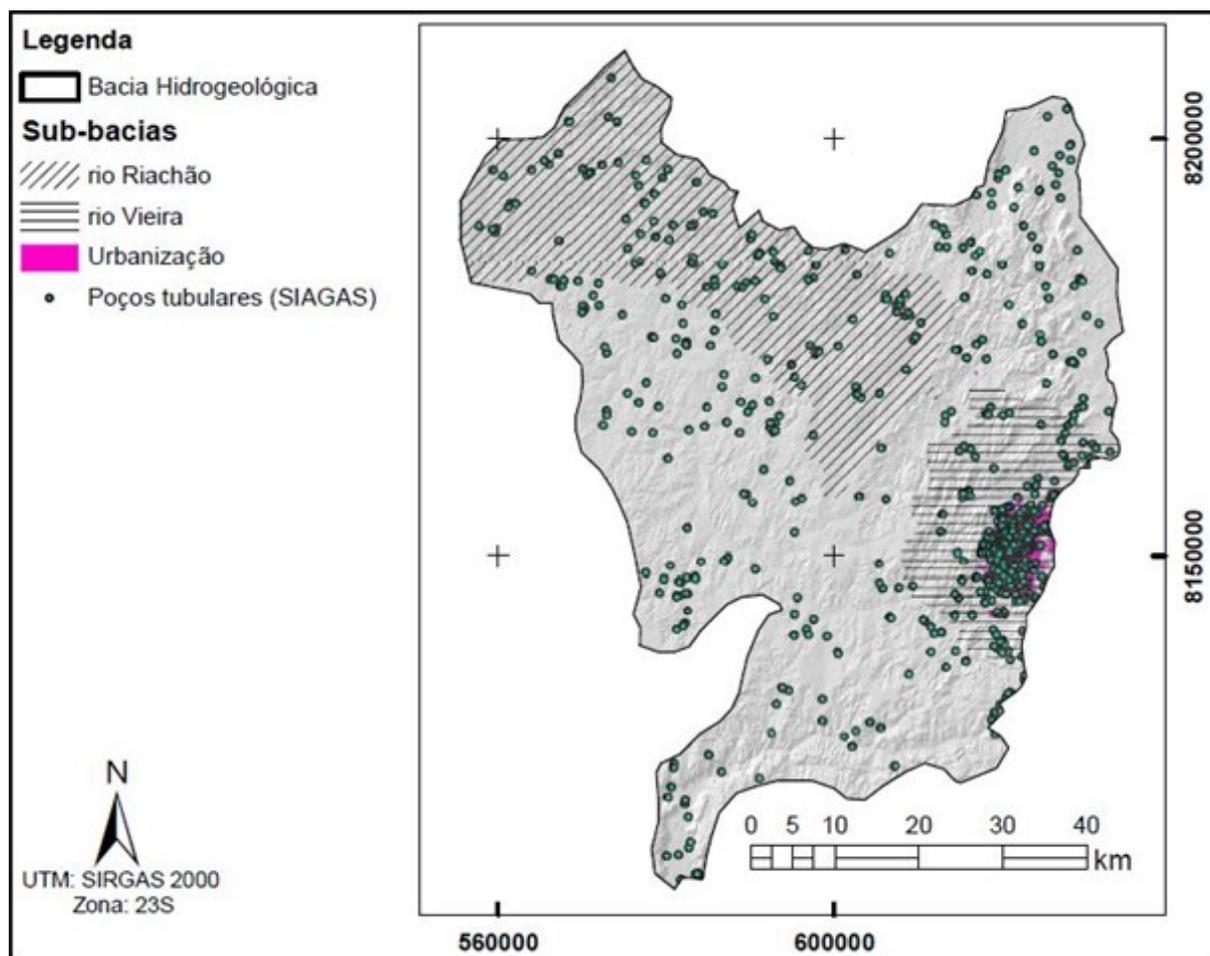
Cobertura de proteção	Espessura do solo acima do aquífero cárstico	Classificação
P1	0 cm – 20 cm	1
P2	20 cm – 1 m	2
P3	1 m – 8 m	3
P4	> 8 m	4

A localização dos poços tubulares que exploram os recursos hídricos subterrâneos é ilustrada no mapa a seguir (Figura 3.5).



**Figura 3.5** – Mapa com a espessura do solo tendo como referência a profundidade dos poços tubulares determinantes do mapa de cobertura de proteção (adaptado de SIAGAS 2018).

O presente trabalho adaptou o método EPIK de forma que a profundidade da zona freática delimitasse a espessura da cobertura de proteção. O geoprocessamento dos dados dos poços cadastrados na plataforma SIAGAS utilizou a ferramenta *clip* do software *ArcGis 10.5*, permitindo a elaboração do mapa de poços tubulares (Figura 3.6) e a caracterização da exploração da água nos aquíferos regionais.



**Figura 3.6** - Mapa de poços tubulares (adaptado de SIAGAS 2018).

Dos 740 poços identificados na área de estudo, pode-se analisar a distribuição espacial pela bacia hidrogeológica que abrange as sub-bacias do rio Riachão e rio Vieira (Quadro 3.3)

**Quadro 3.3**– Distribuição dos poços tubulares (adaptado de SIAGAS 2018).

Distribuição dos poços tubulares	
Bacia hidrogeológica	740
Sub-bacia do rio Riachão	121
Sub-bacia do rio Vieira	362

A distribuição dos mesmos 740 poços, conforme os limites dos municípios, ocorre da seguinte forma: 25 poços em Brasília de Minas; 25 em Claro dos Poções; 118 poços em Coração de Jesus; 21 em Mirabela; 522 em Montes Claros; e 29 em São João da Lagoa.

Aplicando a ferramenta *Zonal Statistics as table* foi possível extrair os dados da cobertura de solos (UFV 2010) para os limites da área de estudo e cada tipo de solo, em termos percentuais, é identificado a seguir (Quadro 3.4).

**Quadro 3.4** – Distribuição dos tipos de solo (UFV 2010).

Cobertura de solos	
Argilossolos	10,09%
Cambissolos	7,81%
Latossolos	54,22%
Neossolos	6,66%
Nitossolos	21,22%
TOTAL	100%

Para o desenvolvimento do mapa de uso e ocupação foi utilizada a *shapefile* do Projeto Águas do Norte de Minas (PANM 2019), criada a partir de um compilado de diversos trabalhos regionais como:

- Atlas Digital da Flora Nativa e Reflorestamento de Minas Gerais - (IEF/UFLA 2009);
- Mapa de solos do estado de Minas Gerais (UFV *et al.* 2010),
- Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil (ANA/EMPRAPA 2014)
- Mapa de uso das terras do Brasil (IBGE 2014).

Após a conferência dos dados e cálculo da área de cobertura para cada tipo de uso, utilizando a ferramenta *Calculate geometry* do software *ArcGis 10.5*, foram geradas onze classes de uso e ocupação do solo, sendo seis classes naturais e cinco relacionadas com uso antrópico, sucintamente observadas no mapa de uso e ocupação (Figura 3.7).

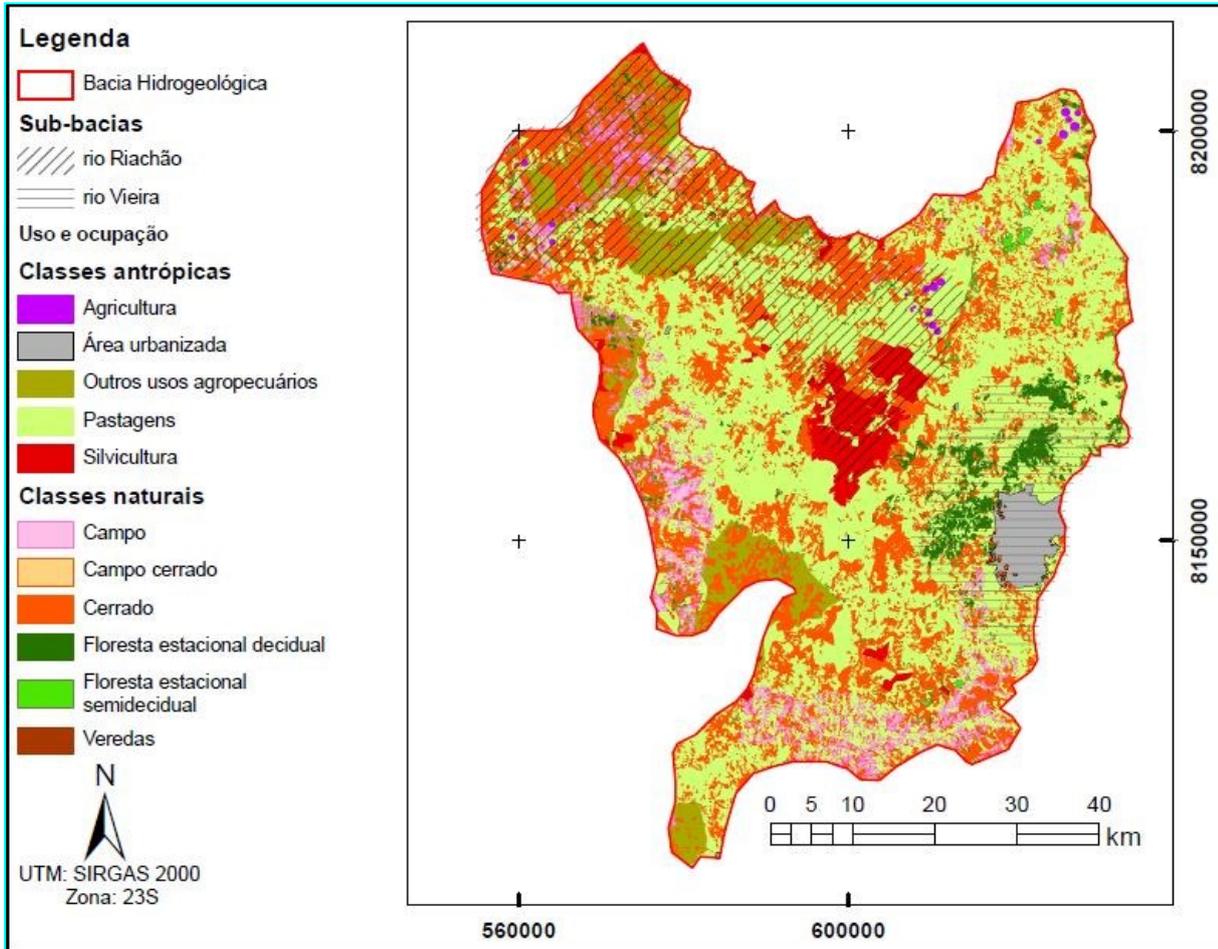


Figura 3.7 – Mapa de uso e ocupação (adaptado de PANM 2019).

A análise quantitativa das classes de uso e ocupação que recobrem a região pode ser observada a seguir (Quadro 3.5).

**Quadro 3.5** – Caracterização do uso e ocupação (adaptado de UFV *et al.* 2010, PANM 2019).

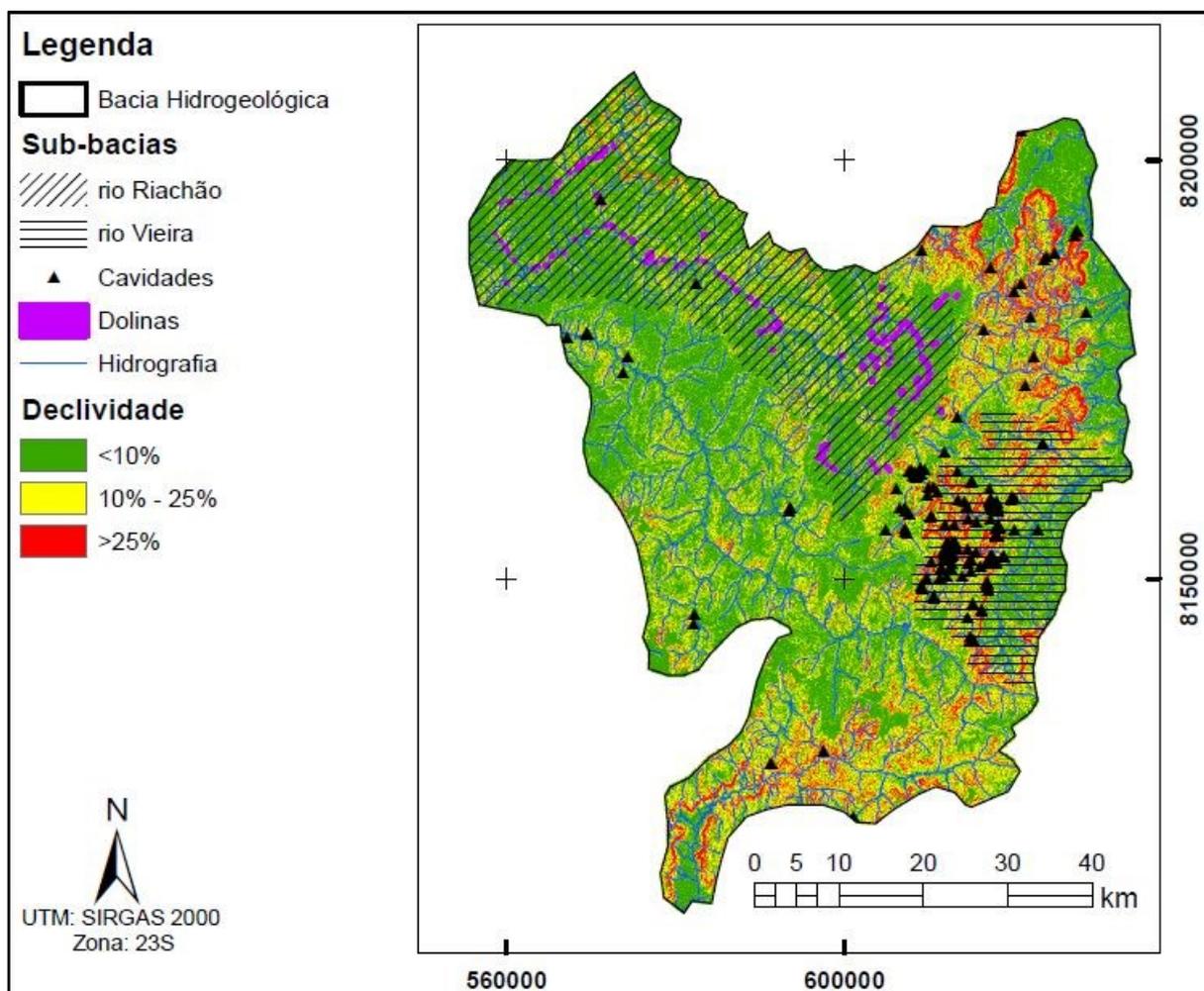
Classes antrópicas		Classes naturais	
Agricultura	0,28%	Campo	3,61%
Área urbanizada	2,17%	Campo cerrado	3,83%
Outros usos agropecuários	6,17%	Cerrado	28,49%
Pastagens	46,94%	Floresta estacional decidual	3,28%
Silvicultura	3,70%	Floresta estacional semidecidual	1,48%
		Veredas	0,03%
Total	59,26%	Total	40,72%

### 3.2.3 Condições de Infiltração (I)

Este parâmetro distingue entre as zonas de infiltração concentradas e as áreas de infiltração difusas. Ambas são caracterizadas pelo coeficiente de escoamento, que depende do uso e ocupação e da declividade do terreno (Doerfliger & Zwahlen 1998). A vulnerabilidade aumenta com a inclinação crescente, devido ao escoamento superficial ser direcionado para pontos de infiltração nas zonas carstificadas.

As condições de infiltração no método EPIK foram desenvolvidas para regiões utilizadas exclusivamente para pastagem e agricultura. Nas adaptações do método para as condições de infiltração foram utilizados os contornos dos sistemas aquíferos correlacionada a declividade, predominante para os litotipos aflorantes verificados pelo sensoriamento remoto.

Para classificar a região conforme as condições de infiltração, foi utilizada a imagem de radar - *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução de 30 m no sistema de coordenadas UTM, datum SIRGAS 2000, disponibilizadas pela UAF (Alaska Satellite Facility). Aplicando a ferramenta *slope* do software ArcGis 10.5 na imagem de radar (*raster*), foi criado um Modelo Digital de Terreno (MDT), gerando um mapa de declividade em porcentagem (Figura 3.8).



**Figura 3.8** – Mapa com as feições determinantes do mapa de cobertura de proteção (adaptado de SIAGAS 2018).

Para a elaboração do mapa de parâmetros de infiltração foram utilizados:

- Base de dados de feições cársticas (CANIE 2018)
- Shapefile com as dolinas presentes na área de estudo;
- Mapa de declividade, elaborado pela ferramenta *slope* do software *ArcGis10.5*.

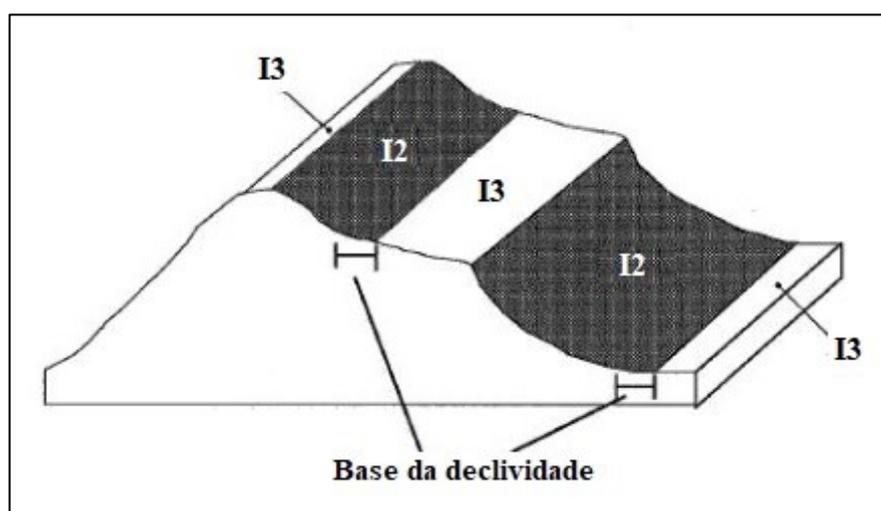
Utilizando a ferramenta *slope*, foi possível calcular a taxa de mudança dos valores de uma célula em relação a sua vizinhança. O resultado obtido pela ferramenta *slope* aplicada ao modelo digital de elevação (imagem de radar SRTM) foi o mapa de declividade regional do terreno, que norteará a setorização do parâmetro I.

As classes foram divididas em I1, I2, I3 e I4 conforme as condições de infiltração adaptadas (Quadro 3.6).

**Quadro 3.6** - Parâmetro Condições de Infiltração (adaptado de Doerfliger & Zwahlen 1998, Pereira 2018).

Condições de infiltração	Tipo	Condições de infiltração (adaptado)	Classificação
I1	Cursos de água perene ou temporário alimentadores de sumidouros e dolinas	Cursos de água perene ou temporários e cavidades	1
I2	Áreas com inclinação maior que 10% em áreas cultivadas e maior que 25% em pastagens	Inclinação > 10%	2
I3	Áreas com inclinação menor que 10% em áreas cultivadas e menor que 25% em pastagens	Inclinação < 10%	3
I4	Restante da bacia hidrográfica	Restante da bacia hidrográfica	4

Conforme Pereira (2018), as influências da declividade do terreno para a análise do comportamentos dos fluxos foi aplicada ao estudo de caso (Figura 3.9).



**Figura 3.9** – Influência da declividade regional no mapa de condições de infiltração (adaptado de Doerfliger & Zwahlen 1998).

Nas adaptações feitas para delimitar as classes I2 e I3 foram analisadas as declividades predominantes dos sistemas aquíferos, delimitados no mapa de fontes contaminantes. A classe I2 é mais vulnerável que a classe I3, pois as interações dos fluxos hídricos que correm sobre o relevo são aceleradas em função da rampa acentuada por declividades superiores a 10%.

As condições para a classificação I4 caracteriza o alto adensamento urbano da cidade de Montes Claros, que gera a impermeabilização do solo devido a pavimentação, reduzindo a absorção direta dos contaminantes identificados no mapa de fontes poluentes. Todavia, é imprescindível salientar a importância que os aterros sanitários, redes de esgotamento urbano, cemitérios e postos de gasolina devam ser contruídos de modo a proteger as camadas subterrâneas de eventuais infiltrações dos contaminantes que elas retém.

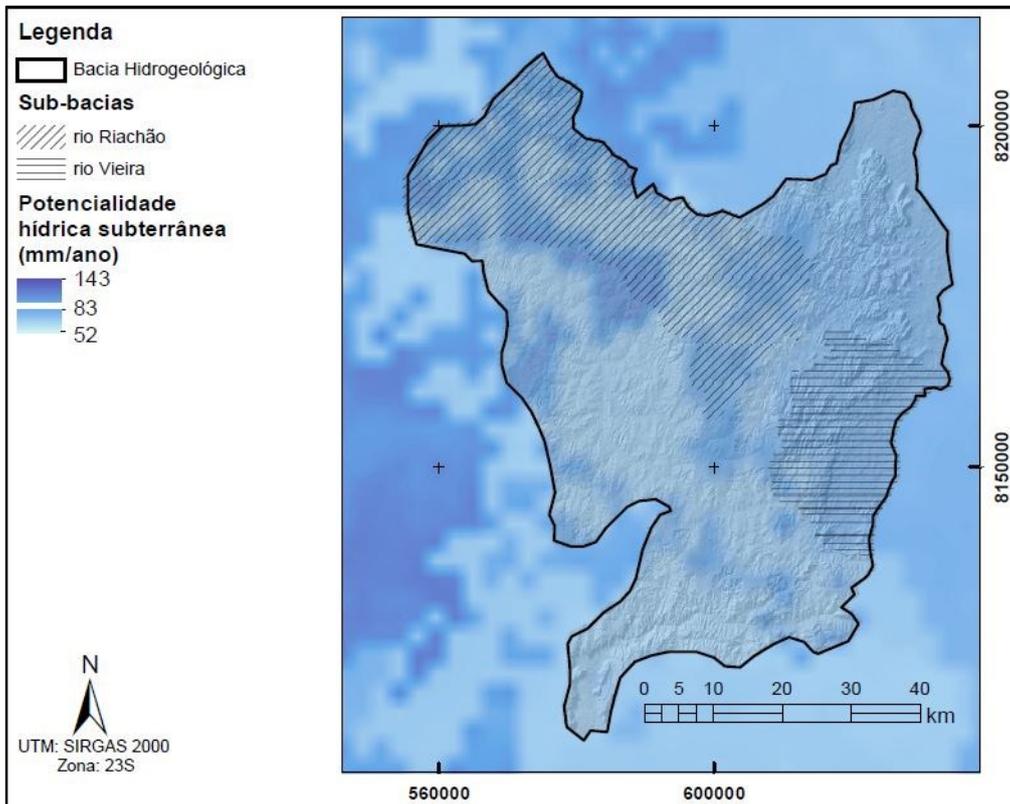
A elaboração do mapa de recarga hídrica subterrânea, que auxiliou a caracterização das condições de infiltração, foi feita a partir da ferramenta *Zonal Statistics as table* aplicada na base de dados do Projeto Águas do Norte de Minas. A análise do parâmetro que avalia a recarga subterrânea média está sintetizada no Quadro 3.7.

**Quadro 3.7** – Caracterização da recarga hídrica subterrânea média (adaptado de PANM 2019).

Recarga hídrica subterrânea média (mm/ano)			
Referencial	Mínima	Máxima	Média
Área de estudo	48	134	76
Sub-bacia rio Riachão	50	129	81
Sub-bacia rio Vieira	60	116	83

A partir da extração dos dados referentes a área de estudo, com a ferramenta *clip do software ArcGis 10.5* que foi aplicada aos dados da *shapefile* de precipitação, foi possível caracterizar a heterogeneidade na distribuição espacial das chuvas. A pluviosidade média anual (Figura 3.9) varia de 800 a 1200 mm/ano, e as regiões menos chuvosas estão localizadas na porção norte, oscilando entre 800 a 1000 mm/ano, abrangendo quase toda a sub-bacia do rio Riachão e norte da sub-bacia do rio Vieira (PANM 2019).

O potencial hídrico subterrâneo refere-se ao volume anual de água que o aquífero pode potencialmente disponibilizar. A delimitação da potencialidade subterrânea depende da análise conjunta com outras características, como a reserva permanente, recarga e transmissividade. O mapa de potencialidade hídrica subterrânea (Figura 3.10) foi obtido pela ferramenta *Zonal Statistics as table* do software *ArcGis 10.5*.



**Figura 3.10** – Potencialidade hídrica subterrânea (adaptado de PANM 2019).

A caracterização da distribuição espacial deste parâmetro está sintetizada no Quadro 3.8.

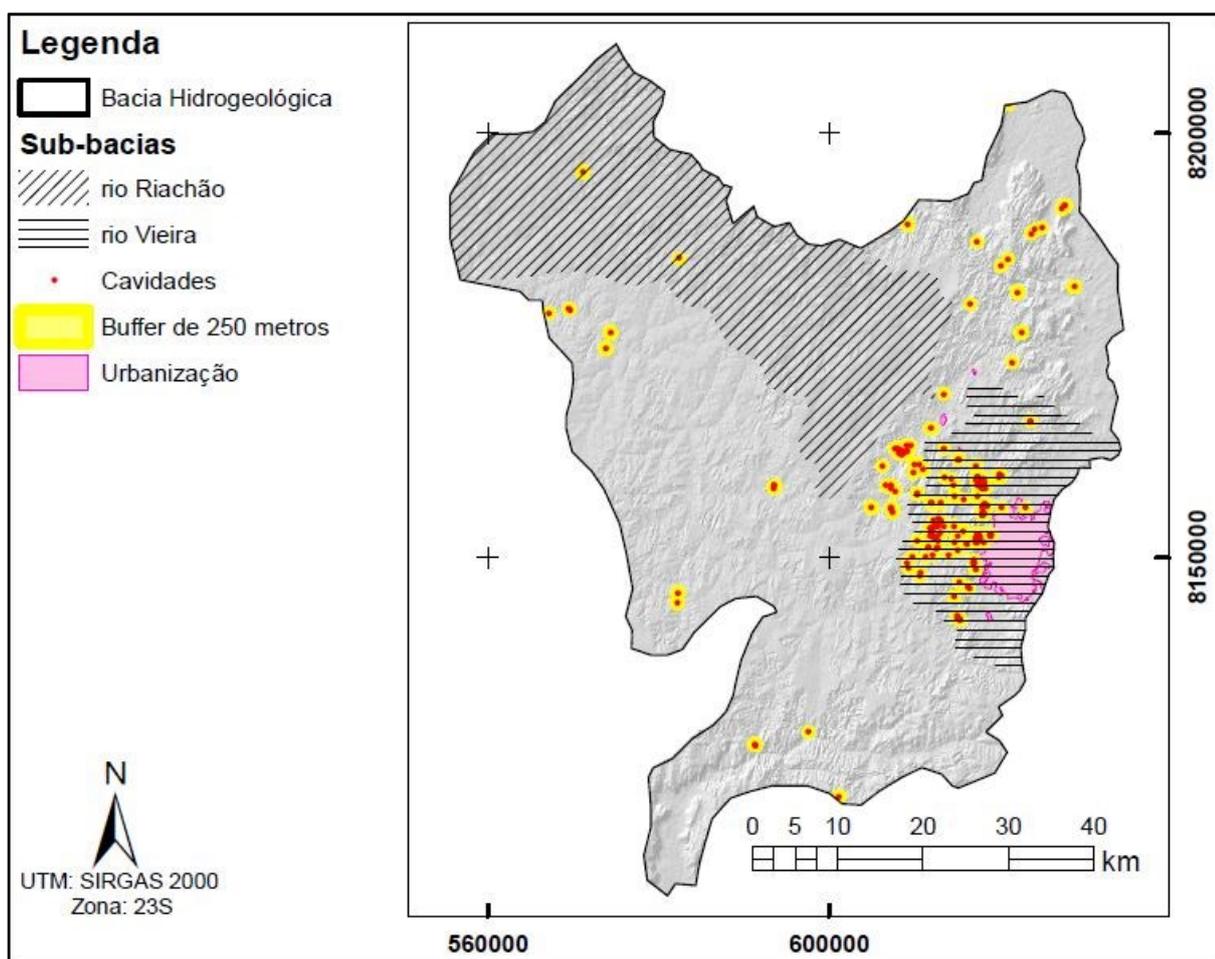
**Quadro 3.8** – Caracterização da potencialidade hídrica subterrânea média (adaptado de PANM 2019).

Potencialidade hídrica subterrânea média (mm/ano)			
Referencial	Mínima	Máxima	Média
Área de estudo	52	143	83
Sub-bacia rio Riachão	53	137	89
Sub-bacia rio Vieira	64	123	59

### 3.2.4 Desenvolvimento Cárstico (K)

Para determinar a relevância desta rede em relação ao volume da rocha de baixa permeabilidade circundante, esteja ela fissurada ou maciça, são considerados diferentes indicadores. O primeiro indicador é a identificação direta de características componentes desta rede cárstica, como cavernas, buracos e sistemas de cavernas na captação considerada. Se não houver estes indicadores aparentes, deve-se recorrer a métodos complementares como testes com traçadores e exames de qualidade da água.

Através dos bancos de dados cartográficos podemos observar a distribuição espacial das feições cársticas presentes no mapa (Figura 3.11).



**Figura 3.11** – Mapa com as cavidades e respectivos perímetros de proteção determinantes do mapa de desenvolvimento cárstico (adaptado de CANIE 2018).

A vulnerabilidade para o parâmetro de desenvolvimento cárstico é avaliada em termos da presença ou ausência de uma rede cárstica e seu respectivo grau de desenvolvimento (Quadro 3.9).

**Quadro 3.9** - Parâmetro Desenvolvimento Cárstico (adaptado de Doerfliger & Zwahlen 1998, Pereira 2018).

Rede Cárstica	Grau de desenvolvimento	Classificação
K1	Moderado a muito desenvolvido	1
K2	Fraco	2
K3	Aquífero sem carstificação	3

A classe K1 designa os perímetros circundantes às cavidades identificadas (CANIE 2018), obtida pelo buffer de 250 m.

A classe K2 foi caracterizada por um polígono abrangendo os principais adensamentos de cavidades. Para a delimitação desta classe foram observadas as feições do relevo identificadas na imagem de satélite da área.

A classe K3 delimita o restante da área, onde não ocorrem cavernas, nem há feições observadas pelo sensoriamento remoto descrita nas classes anteriormente definidas.

Utilizando a ferramenta *Zonal Statistics as table* aos dados espaciais da reserva aquífera permanente (PANM 2019) foram verificados os valores específicos para as sub-bacias e área total estudada (Quadro 3.10).

**Quadro 3.10** – Reserva aquífera permanente (adaptado de PANM 2019).

Reserva permanente (mm)			
Referencial	Mínima	Máxima	Média
Área de estudo	426	5649	2028
Sub-bacia rio Riachão	426	3405	1185
Sub-bacia rio Vieira	802	5649	4892

### 3.2.5 Índice de Proteção (F)

Para a caracterização do índice de proteção (F), devem ser classificados individualmente os mapas temáticos em formato *raster* de cada parâmetro determinante ao método EPIK (Doerfliger & Zwahlen 1998):

- epicarste (E),
- cobertura de proteção (P),
- condições de infiltração (I),
- desenvolvimento da rede cárstica (K)

O índice de proteção (obtido pela Equação 2.5) analisa as influências das notas atribuídas a cada uma das classificações dos parâmetros determinantes com a sobreposição destes mapas temáticos e atribuição de pesos específicos (Quadro 3.11).

$$F = \alpha \times E + \beta \times P + \gamma \times I + \delta \times K \text{ (Equação 2.5)}$$

**Quadro 3.11** - Coeficiente de ponderação padrão para os parâmetros EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1998).

Parâmetro	Epicarste	Cobertura de Proteção	Condições de infiltração	Rede Cárstica
	<b>E</b>	<b>P</b>	<b>I</b>	<b>K</b>
Coeficiente	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
Peso	3	1	3	2

Aplicando os pesos relativos aos coeficientes do método EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1998), foi obtida a equação final para a determinação do índice de proteção (Equação 2.6)

$$F = 3 \times E + P + 3 \times I + 2 \times K \text{ (Equação 2.6)}$$

Com os valores obtidos no Índice de Proteção, caracteriza-se as diferentes classes de vulnerabilidade, permitindo o melhor manejo do recurso aquífero (Quadro 3.12).

**Quadro 3.12** - Classes de vulnerabilidade EPIK (adaptado de Doerfliger & Zwahlen, 1998, Pereira 2018).

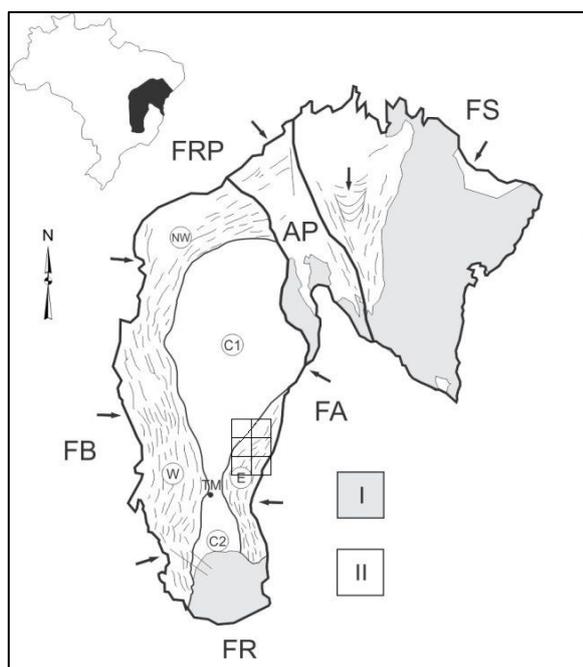
Fator de Proteção	Classe de vulnerabilidade	Classe de vulnerabilidade (adaptado)
$F \leq 19$	Muito Alta	Alta
$19 < F < 25$	Alta	Moderada
$F \geq 25$	Moderada a baixa	Baixa

# CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 4.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

Almeida (1977) definiu que o cráton do São Francisco não fora envolvido nos processos orogênicos do Evento Brasileiro. A Bacia do São Francisco (inserir uma referência mais atual aqui) é caracterizada como uma bacia intracratônica deformada predominantemente em suas bordas, que são ladeadas por duas faixas móveis: Faixa Brasília (oeste) e Faixa Araçuai (leste). A macrorregião de estudo se insere na interface do limite sudeste do Cráton São Francisco e da Faixa Araçuai (Figura 3.2)

A localização das folhas topográficas conforme o acondicionamento geológico pode ser verificado a seguir (Figura 3.2), sendo que a faixa Brasília (FB), faixa Araçuai (FA) e a vergência tectônica são indicadas pelas setas. O compartimento I define o embasamento e II define as coberturas pré-cambrianas.



**Figura 4.1** – Compartimentos estruturais do Cráton São Francisco (adaptado de Alkmim *et al.* 1993).

A bacia está inteiramente contida no Cráton do São Francisco, entidade composta principalmente por rochas arqueanas e paleoproterozóicas (Alkmim & Martins-Neto 2001).

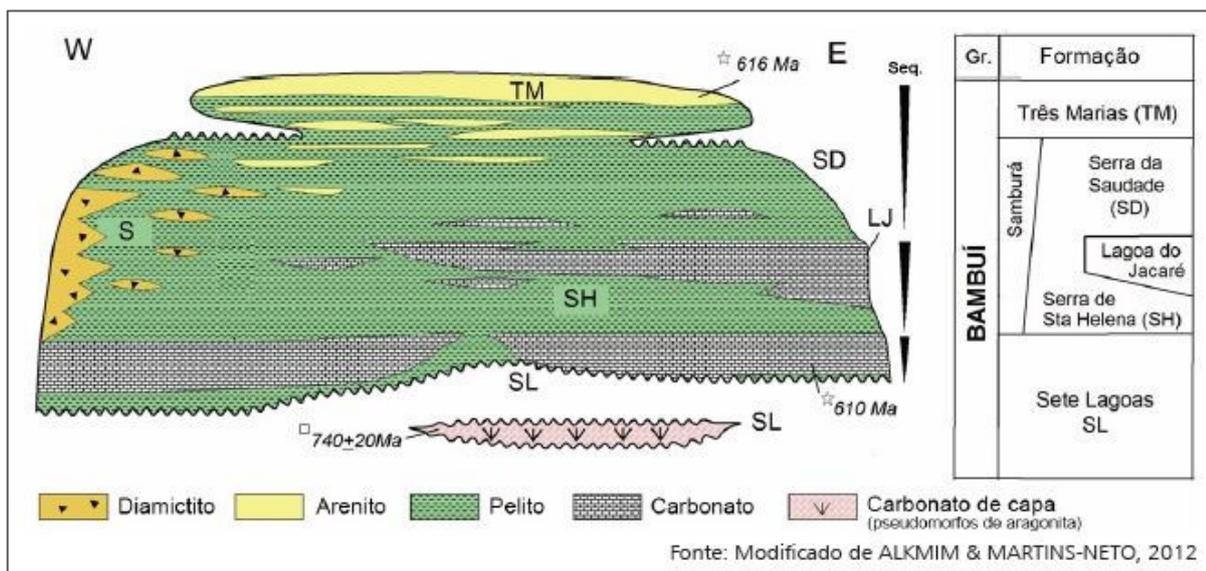
Conforme estudos de Zalán (2007), a bacia é preenchida predominantemente por rochas sedimentares proterozóicas (Supergrupo Espinhaço e Grupos Arai, Paranoá, Macaúbas e Bambuí), cobertas por rochas sedimentares permo-carboníferas (Grupo Santa Fé), eocretáceas (Grupo Areado), por rochas vulcânicas neocretáceas (Grupo Mata da Corda) e por uma chapada composta por arenitos

de idade neocretácea (Grupo Urucuia). Na região de estudo afloram unidades do Grupo Bambuí, Grupo Areado, Grupo Urucuia, coberturas detrito-lateríticas e coberturas elúvio-colúvio-aluvionares.

#### 4.1.1 Grupo Bambuí

Costa & Branco (1961) e Dardenne (1978) foram pioneiros nos estudos da região, posteriormente novos trabalhos foram feitos com o objetivo de analisar a estratigrafia da região. O Grupo Bambuí aflora ao longo de toda a Bacia do São Francisco composto por uma sucessão pelito-carbonática plataformar, depósitos tempestíticos e sucessões areno-argilosas e arcoseanas, também marinhas (Dardenne 1978)

Depreende-se, portanto, o conhecimento de cinco formações, datadas do Neoproterozóico ao Eocambriano, sendo elas caracterizadas resumidamente neste trabalho. O Grupo Bambuí pode ser setorizado da base para o topo em: Formação Sete Lagoas, Formação Serra de Santa Helena, Formação Lagoa do Jacaré, Formação Serra da Saudade e Formação Três Marias. A disposição espacial das unidades litológicas do Grupo Bambuí é ilustrada sucintamente a seguir (Figura 4.2).



**Figura 4.2** – Coluna estratigráfica do Grupo Bambuí. (Fonte: adaptado de Alkmim & Martins-Neto 2012).

O Embasamento Cristalino destas unidades é formado por gnaisses, granitos e dioritos sendo estes de idade Proterozóica, porém tanto o embasamento quanto a Formação Sete Lagoas não afloram na região de estudo.

A Formação Sete Lagoas (Costa & Branco 1961) é representada por dolomitos, calcários, brechas lamelares, níveis estromatolíticos e oolíticos. Essa unidade basal é interrompida por uma falha normal (direção E-W), retornando apenas em uma estreita faixa (região de Montalvânia).

De acordo com os furos de sondagens da CPRM (Abreu-Lima 1997) há uma diferença na espessura das rochas aflorantes, já que em algumas regiões ocorrem a 200 metros, enquanto em outras

a Formação chega a 330 e 500 metros. Esse fato foi explicado por uma possível subsidência do embasamento enquanto ocorria a sedimentação da Formação Sete Lagoas. As rochas carbonáticas expressam uma ocorrência de deposição devido a uma transgressão marinha, ocorrendo, portanto, em um ambiente marinho raso.

A Formação Serra de Santa Helena (Costa & Branco 1961) é caracterizada por margas laminadas, siltitos, folhelhos e calcários oolíticos intercalados. O fato de as margas ocorrerem finamente laminadas e transicionarem para siltitos, bem como a presença de estruturas sedimentares como estratificação plano-paralela, marcas de onda e ripples, demonstram a subsidência gradual da Formação Sete Lagoas e uma nova deposição sobre esta, em um ambiente de plataforma marinho influenciado por ondas. Ocorre então a Formação Santa Helena que, sucintamente, é caracterizada por metassiltitos rosados com intercalações de folhelhos adosianos. As espessuras mínimas das rochas da formação Santa Helena são estimadas entre 250 e 300 m de espessura (Chaves & Benitez 2006, Chaves & Andrade 2009). O contato destas duas unidades com a Formação Jequitai (unidade inferior), não é observada na área de estudo, já o contato superior com a Formação Lagoa do Jacaré (unidade superior) é concordante e transicional, apresentando uma sedimentação rítmica em direção ao topo (Chaves & Andrade 2014 cj).

A Formação Lagoa do Jacaré (Costa & Branco 1961) é demarcada por um contato gradacional com a Formação Santa Helena. A associação litológica desta unidade é densamente caracterizada por calcários, sendo estes finos e em algumas fácies são vistos estilólitos, intercalações de silito e margas. As estruturas sedimentares descritas são marcas onduladas, gretas de ressecamento, estratificações cruzadas, *hummocky* e estrutura estromatolítica colunar, que demonstram uma alta energia do sistema, sujeita a um retrabalhamento, além de episódios de tempestades e períodos de calmaria nos quais a plataforma fora exposta. Sobreposta a essa unidade ocorre a Formação Serra da Saudade (Costa & Branco 1961, Dardenne 1978), que é representada predominantemente por siltitos (argilosos e não argilosos), folhelhos e margas.

Encerrando a sequência do Grupo Bambuí na região ocorre a Formação Três Marias. Esta unidade é caracterizada por arcósios, arenitos, siltitos, lentes de argilitos e conglomerado com matriz arcoaseana. Segundo Iglesias & Uhlein (2008) essa unidade depositou-se em um contexto de borda de bacia, com espessuras aumentando para SW, diferentemente das unidades inferiores que mostram espessamento para leste. Dessa forma, os depocentros das unidades citadas anteriormente são diferentes do depocentro da Formação Três Marias. As estruturas sedimentares, como as estratificações cruzadas, as acanaladas e sigmoidais indicam um ambiente flúvio-deltaico que anteriormente passou por uma regressão, ou seja, ambiente de plataforma continental, sob ações de ondas e tempestades.

Analisando a coluna estratigráfica da bacia do São Francisco e correlacionando as coberturas litológicas aflorantes, verificamos que a unidades do Grupo Areado e Grupo Urucuia recobrem as unidades litológicas do Grupo Bambuí na região de estudo.

#### **4.1.2 Grupo Areado**

O Grupo Areado é caracterizado por arenitos, conglomerados e siltitos. Barbosa (1965) dividiu a unidade em três formações da base para o topo: Abaeté, Quiricó e Três Barras. Observa-se grande quantidade de vazios na estrutura destas rochas (maior que 20%), com parte preenchida por matriz oxidada de argilominerais. Na parte superior do Grupo Areado identifica-se conglomerados e arenitos.

Neste trabalho o Grupo Areado será tratado de forma indivisa, caracterizando a unidade pelas características predominantes dos arenitos, com espessura máxima de 100 m, aflorando predominantemente em cotas entre 730 e 830 m (Chaves & Andrade 2014 cj).

Os afloramentos configuram chapadas e morros testemunhos fortemente intemperizados, o contato basal desta unidade com as formações Lagoa do Jacaré ou Serra da Saudade é brusco, marcado por discordância angular e erosiva. Na Folha Brasília de Minas os três principais litotipos identificados são: pelitos, arenitos avermelhados e arenitos beges (identificados no topo da unidade), conforme Kuchenbecker et al. 2014.

#### **4.1.3 Grupo Urucuia**

Segundo Campos & Dardenne (1997), o Grupo Urucuia corresponde a um conjunto de rochas neocretáceas que se caracterizam por siltitos, conglomerados e arenitos quartzosos imersos em uma matriz de calcedônia e óxidos de ferro. A presença de minerais acessórios como a turmalina, muscovita e grãos de hidróxido de ferro também caracterizam o grupo. Este grupo foi dividido nas formações: Posse (unidade inferior) e Serra das Araras (unidade superior), porém neste presente trabalho foi tratado de modo indiviso.

Conforme o relatório da Folha Coração de Jesus (Chaves & Andrade 2014), as estruturas sedimentares presentes, como estratificações cruzadas de grande porte, estratificação plano-paralela e estratificação cruzada de baixo ângulo com base tangencial, ocorrendo nos arenitos maduros, evidenciam um tipo de transporte eólico (fluxo de grãos), com um regime de fluxo que varia do inferior até o superior, com a presença de dunas e interdunas (ambiente desértico).

#### **4.1.4 Cobertura Detrito-laterítica**

As coberturas detrito-lateríticas ocorrem restritamente na porção sudeste da Folha Montes Claros, sendo caracterizada por uma couraça laterítica ferruginosa e por solos arenosos vermelhos formados a partir do intemperismo destas couraças. Ocorrem preferencialmente entre as altitudes de 950

e 1050 m, sendo tipicamente observadas em todo o norte do estado de Minas Gerais, constituindo chapadas nos altiplanos (Chaves & Andrade 2014 mc).

#### 4.1.5 Cobertura Elúvio-Colúvio-Aluvionar

As coberturas elúvio-colúvio aluvionares ocorrem geralmente nas regiões mais aplainadas, porém alçadas em relação as encaixantes, sendo caracterizados pela presença de litotipos de diversas formações do Grupo Bambuí. O aspecto geomorfológico desta unidade é muito suavizado, ocorrendo entre 850 e 900 m de altitude, diferenciada das coberturas detrítico-lateríticas que ocorrem em cotas superiores a 950 m. A espessura varia de poucos metros até aproximadamente 15 m, a noroeste da Folha Montes Claros (Chaves & Andrade 2014 mc).

O mapa litoestrutural da área de estudo (Figura 4.3) ilustra o contexto geológico regional.

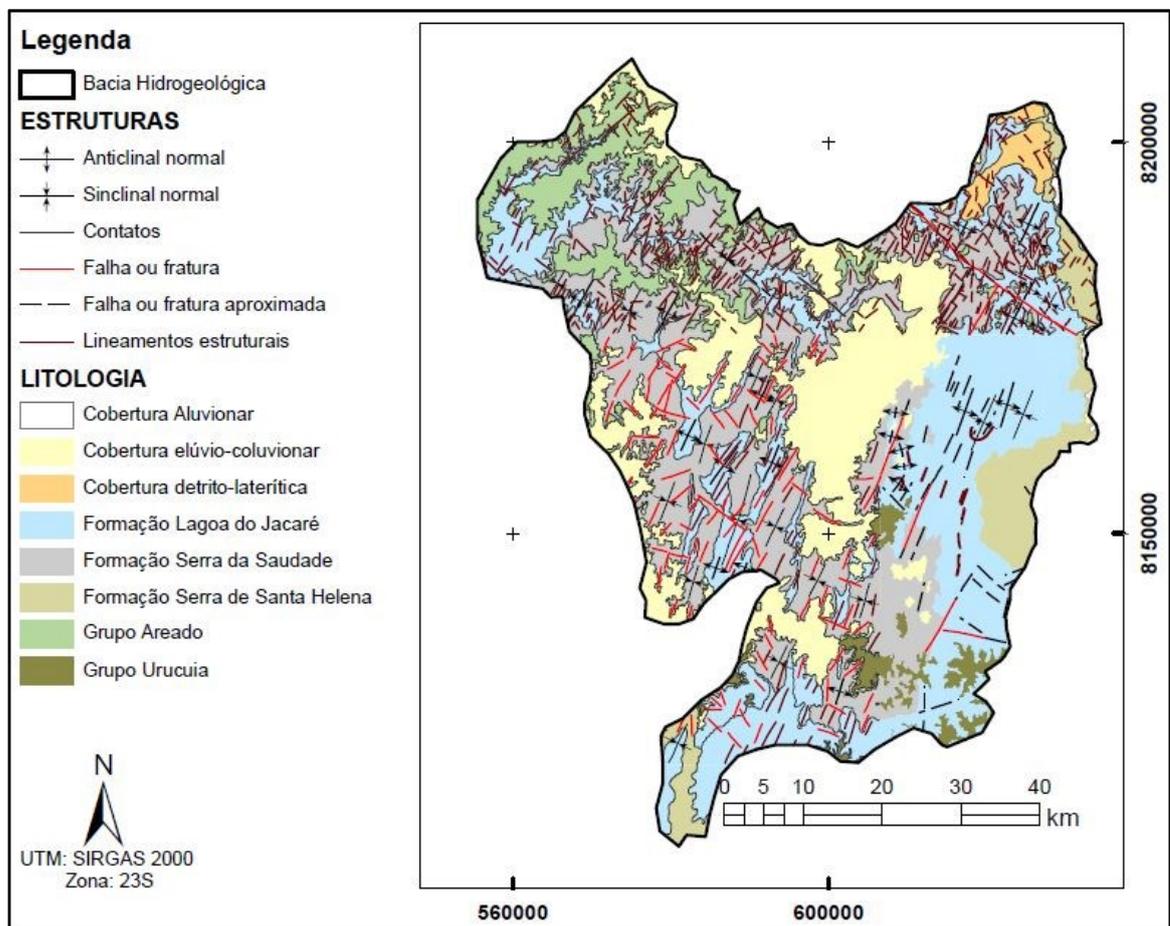
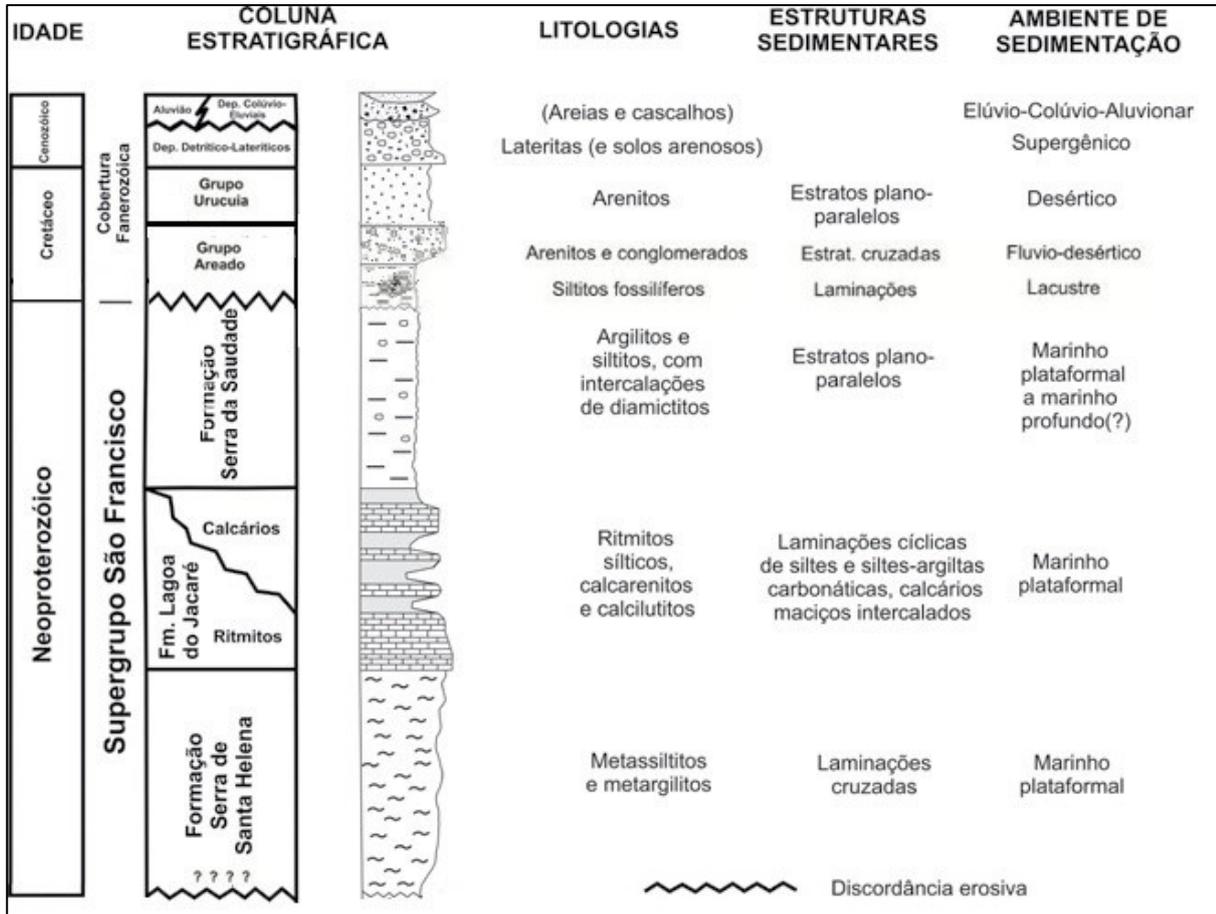


Figura 4.3 – Mapa litoestrutural regional (adaptado de PANM 2019).

As unidades geológicas aflorantes caracterizadas anteriormente podem ser vistas na coluna estratigráfica da bacia intracratônica do São Francisco (Figura 4.4).



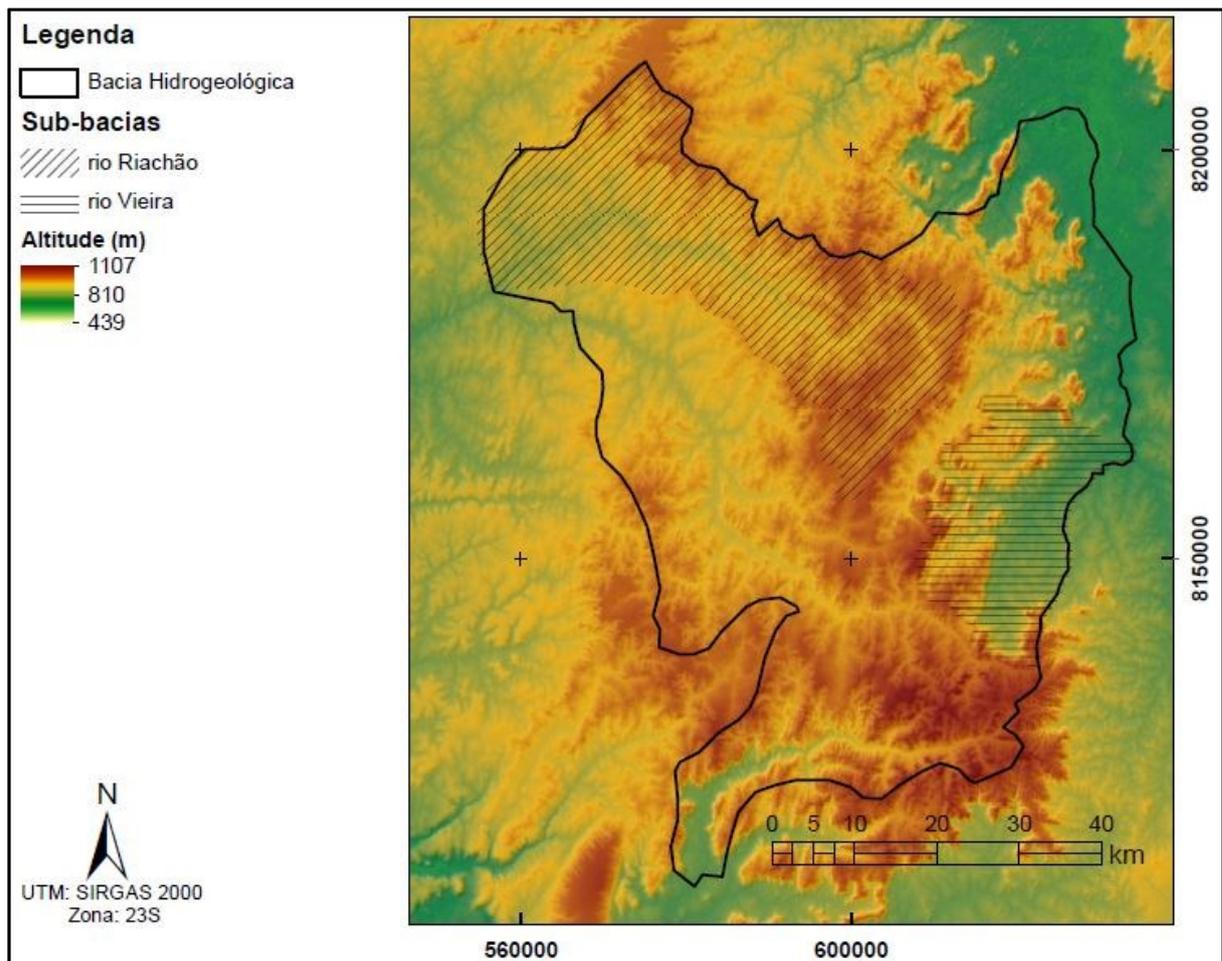
**Figura 4.4** – Coluna estratigráfica simplificada da bacia intracratônica do São Francisco. (adaptado de Chaves & Andrade 2014 <sup>1</sup>, Chaves & Andrade 2014 <sup>2</sup>)

## 4.2 HIPSOMETRIA

Os mapas hipsométricos representam a elevação de um terreno (altitude) através de gradientes de cores. Normalmente a escala de cores segue um padrão de definição sendo, a cor verde indicativa das regiões de menor altitude, passando pelas cores amarela, vermelha, marrom, cinza e branco conforme a altitude se eleva.

Para o valor máximo de altitude, pela classificação de cores do mapa hipsométrico, é utilizado a cor branca fazendo alusão as grandes elevações do planeta, que normalmente são porções do relevo em regiões de picos nevados. Logo, para a elaboração de um mapa hipsométrico plausível ao objeto de estudo, foi definido o gradiente hipsométrico do verde até o marrom, pois a região está inserida em região de clima tropical, não cabendo a coloração máxima com simbologia em branco.

A caracterização das faixas altimétricas e o comportamento médio para a bacia hidrogeológica e as sub-bacias do rio Riachão e rio Vieira, pode ser vista no mapa hipsométrico a seguir (Figura 4.5).



**Figura 4.5** – Mapa hipsométrico regional (adaptado de PANM 2019).

### 4.3 COBERTURA DE SOLOS

No mapa de cobertura de solos da região estudada (Figura 4.6), foram identificados cambissolos háplicos aflorantes, classificados como eutróficos (CXbe8) e distróficos (CXbd18, CXbd21), latossolos vermelho-amarelos (LVAd1, LVAd3, LVAd12, LVAd21 e LVAd22), latossolos vermelho-amarelos da fase caatinga hipoxerófila (LVd3), nitossolos háplicos eutróficos (NXe1, NXe2), nitossolo háplico distrófico (NXd1), argissolos vermelho-amarelos (PVAe9), neossolos litólicos eutróficos chernossólicos (RLe1 e RLe2).

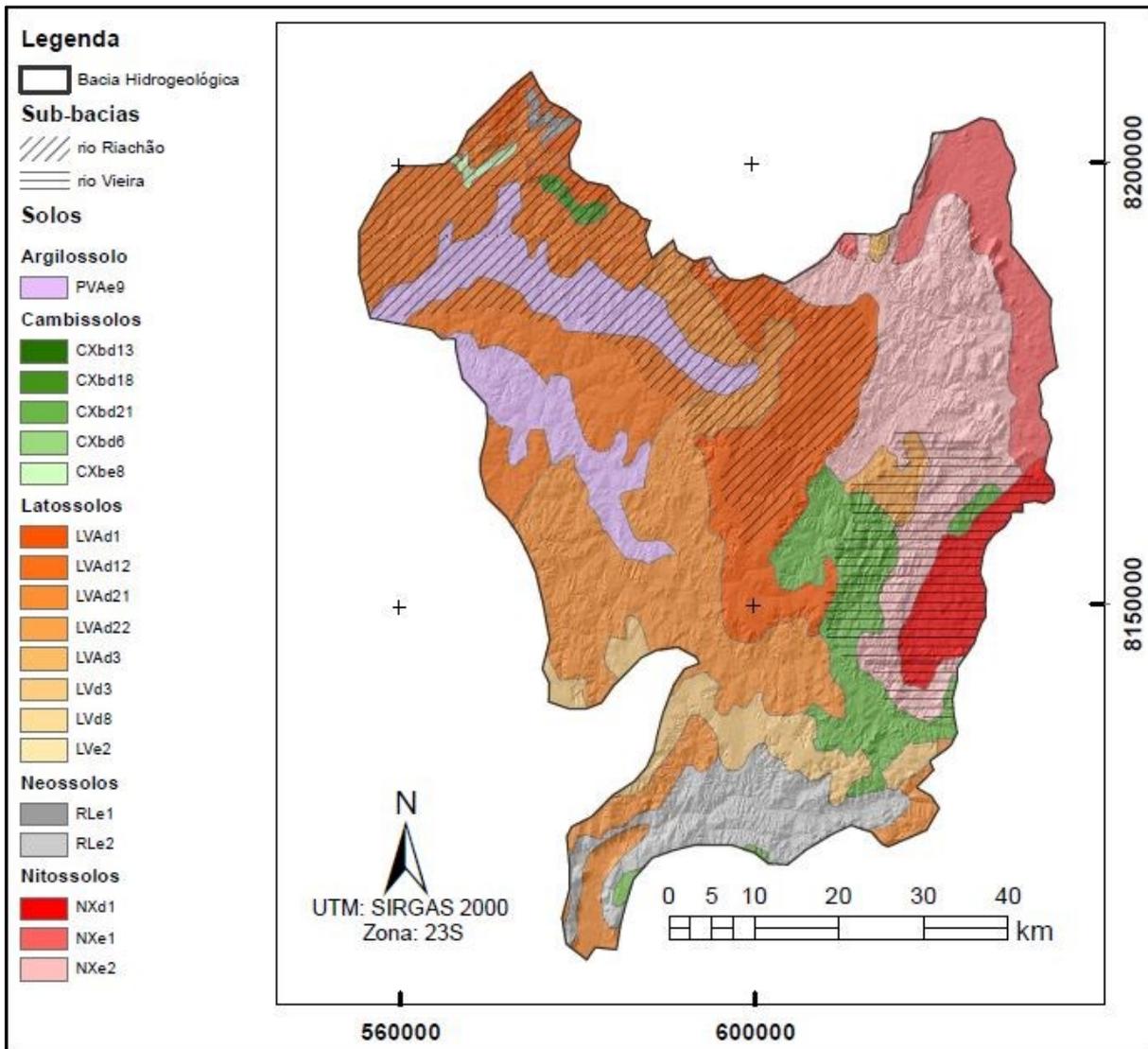


Figura 4.6 – Mapa de solos (adaptado de UFV et al. 2010).

#### 4.4 CLIMA

A área de estudo está inserida na zona tropical, de acordo com a classificação de climas do Brasil desenvolvida pelo IBGE (2002), no domínio climático Clima Tropical do Brasil Central, marcado por duas estações bem definidas: verões chuvosos e quentes e invernos secos e brandos.

Segundo o mapa climático, adaptado do IBGE (2002) a partir do geoprocessamento da base de dados, foi verificado que a classificação quente semi-úmido é predominante na região da sub-bacia do rio Riachão, com temperatura média para o mês mais frio de 18 °C, marcado por um período de 4 a 5 meses de seca durante o ano. Na sub-bacia do rio Vieira, região nordeste da bacia hidrogeológica e porção leste da sub-bacia do rio Riachão, o tipo climático quente semiárido predomina, com secas durante seis meses do ano. Os tipos climáticos regionais podem ser resumidamente visualizados no mapa de climas (Figura 4.7).

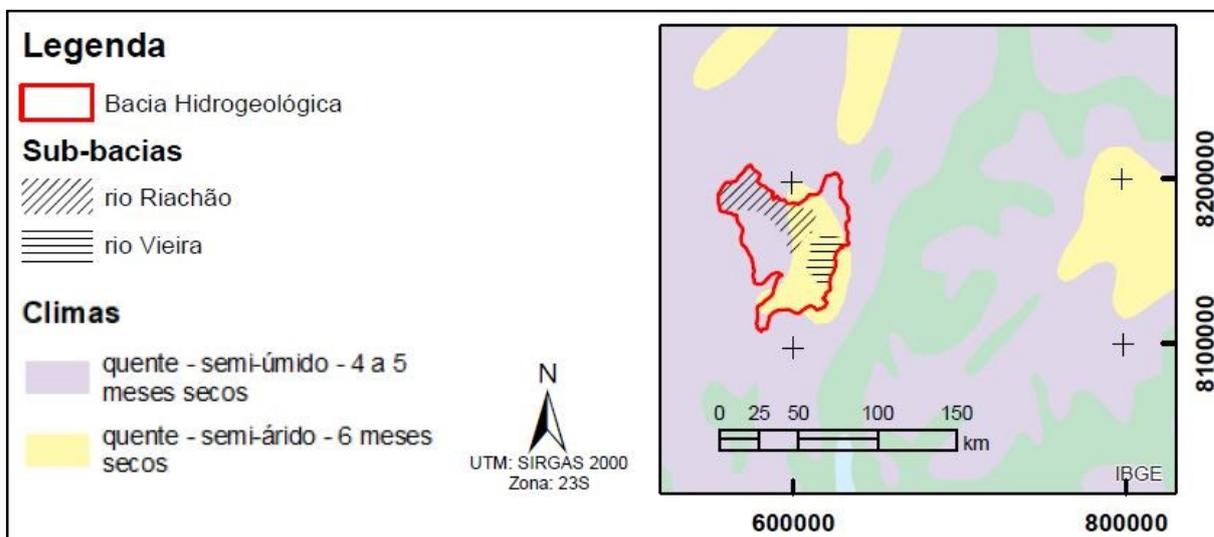


Figura 4.7 – Mapa climático regional (adaptado de IBGE 2002).

#### 4.5 PLUVIOSIDADE

As porções mais chuvosas podem ser identificadas no extremo sul da sub-bacia do rio Riachão e na parte sul da sub-bacia do rio Vieira, com variação entre 1000 e 1200 mm/ano. Do total precipitado anualmente, mais de 90% das chuvas concentram-se no verão, se estendendo de outubro a abril, com umidade máxima entre dezembro e fevereiro. Caracterizado por expressiva estiagem de maio a setembro, os períodos mais secos predominam durante o inverno, podendo ter de 4 a 6 meses com secas prolongadas (PANM 2019, ANA 2018).

A caracterização da precipitação, ilustrada pelo mapa de pluviosidade (Figura 4.8), está diretamente ligada a determinação de outros parâmetros, como clima, solo, vegetação, evapotranspiração e os demais parâmetros hidrogeológicos.

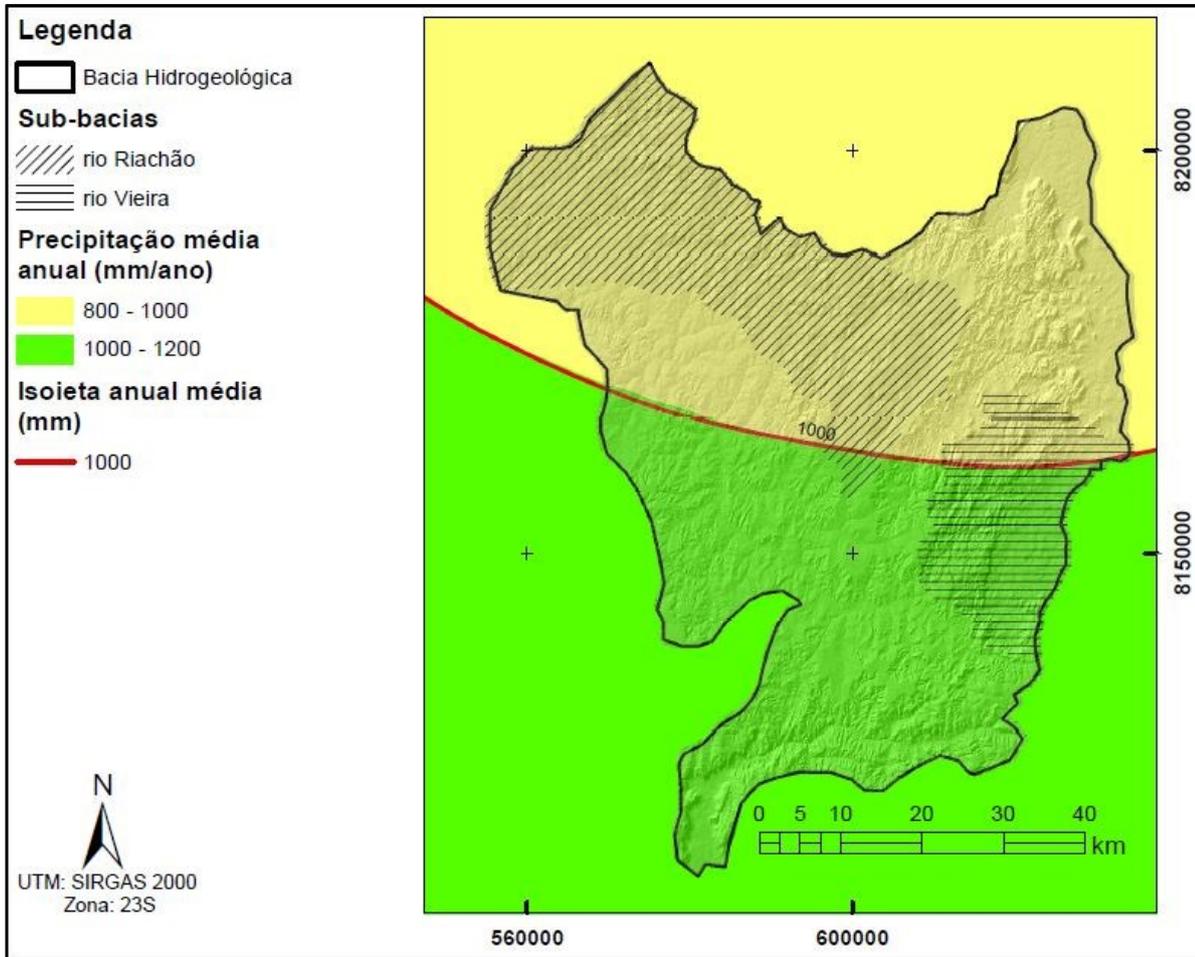


Figura 4.8 – Mapa de precipitação média anual (adaptado de PANM 2019).

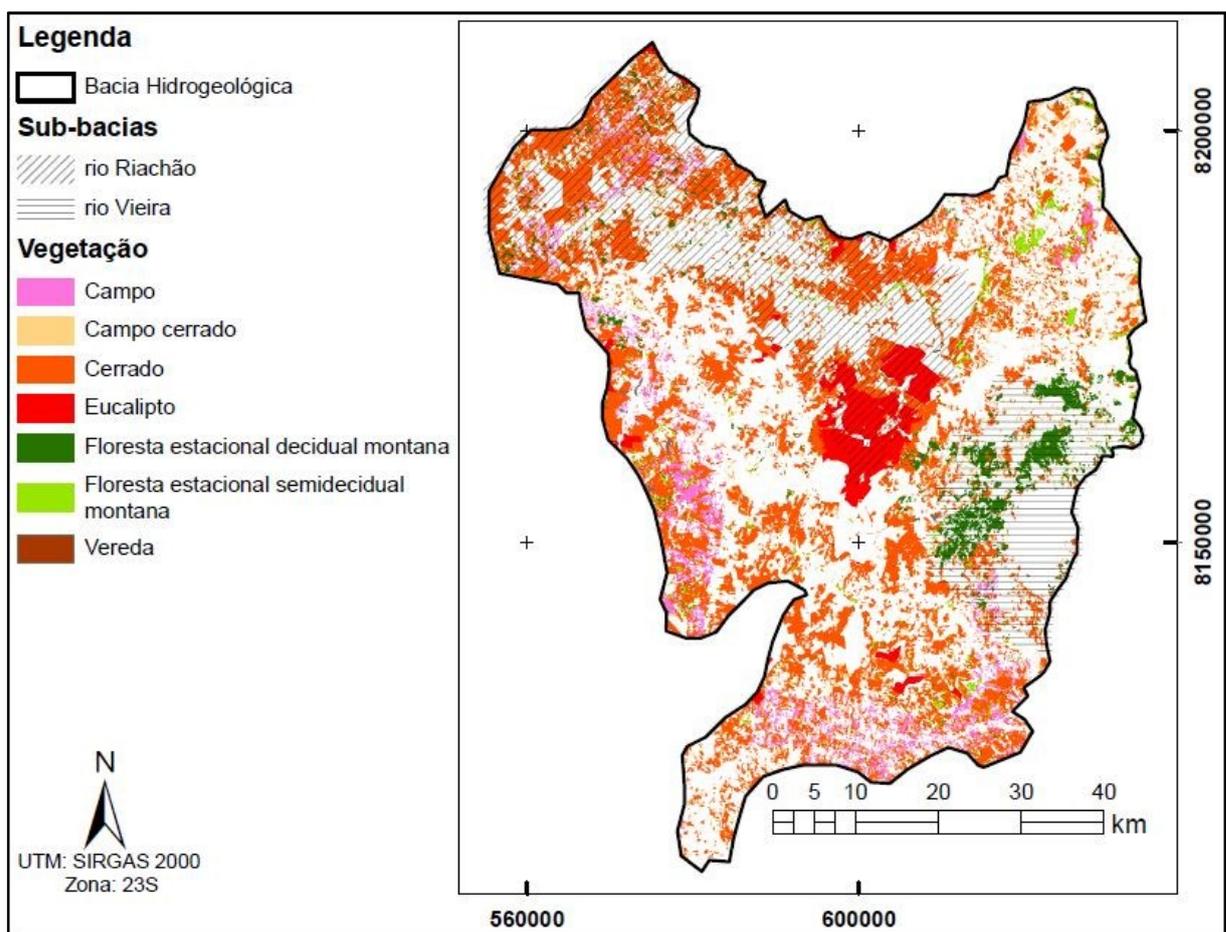
#### 4.6 VEGETAÇÃO

Para a elaboração do mapa temático de vegetação foi utilizada a base de dados de uso e ocupação do Projeto Águas do Norte de Minas, que foi bem delimitado para a área de estudo. Aplicando a ferramenta *clip* aos dados vetoriais, foi possível extrair a cobertura vegetal regional. Com a aplicação da ferramenta *Calculate geometry* do software *Arcgis 10.5*, foi possível determinar os domínios de vegetação como: cerrado, campo-cerrado, campo, florestas estacionais decíduas e semidecíduas, veredas e regiões de reflorestamento voltado a indústria (eucaliptais).

O cerrado é a vegetação predominante nos sistemas aquíferos carbonático e pelítico-carbonático da região estudada. Grande parte do cerrado, campo-cerrado, campo e veredas que recobrem a área de estudo já sofreram intervenções antrópicas, sendo degradadas pelas pastagens e outros empreendimentos agropecuários.

Os cerrados têm fisionomia arbórea-arbustiva, já a transição campo-cerrado e campo apresentam árvores de pequeno porte e gramíneas, sendo biomas explorados como pasto natural. As florestas estacionais decíduas e semidecíduas são fortemente influenciadas pela estacionalidade climática, marcadas pelas estações seca e chuvosa.

As veredas são florestas predominantemente freatófitas e de galerias, devido ao profundo enraizamento sua vegetação absorve água diretamente da zona freática, estando localizadas adjacente a nascentes e regiões continuamente úmidas. Na porção central da área em estudo, há grandes cultivos de eucalipto e pinus voltados a indústria da madeira, carvão e papel. Resumidamente podemos observar a cobertura vegetal, pelo mapa de vegetação (Figura 4.9).

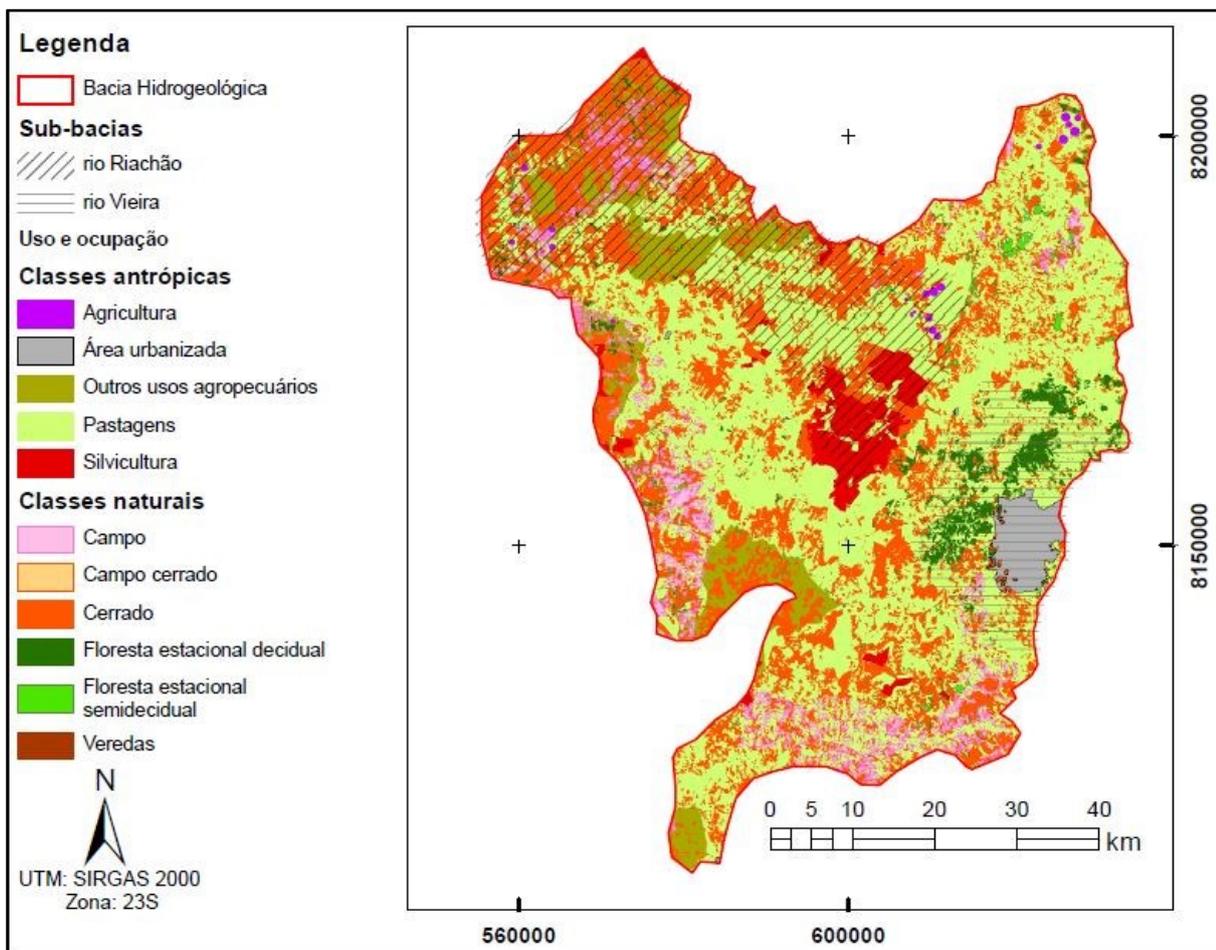


**Figura 4.9** – Mapa de vegetação (adaptado de UFV et al. 2010, PANM 2019).

A presença das florestas decidual e semidecidual está condicionada ao fluxo do rio Vieira e cobertura de solos regional, sendo muito marcados pelo clima.

## 4.7 USO E OCUPAÇÃO

A agricultura analisada refere-se aos pivôs centrais irrigados e grandes plantios. As plantações de pequeno porte e demais usos não identificados são caracterizados nos outros usos agropecuários. Culturas de eucalipto e pinus são identificadas no campo de silvicultura, cuja região de reflorestamento é voltada à indústria, estando concentrados nas regiões mais planas que facilitam o plantio e escoamento da produção madeireira (PANM 2019). O cenário de uso e ocupação da região estudada está apresentado na Figura 4.10.

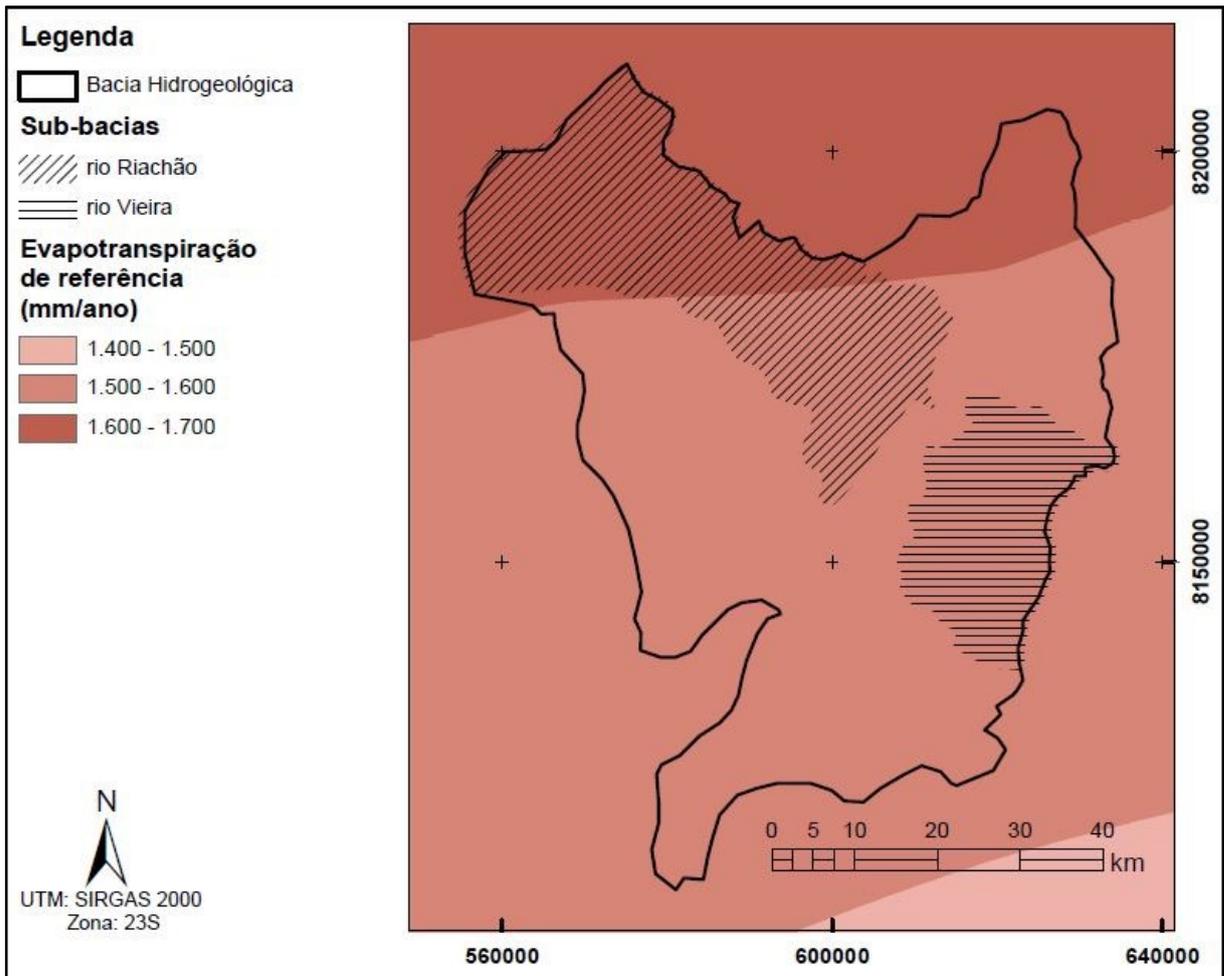


**Figura 4.10** – Mapa de uso e ocupação (adaptado de PANM 2019).

As áreas urbanas recobrem apenas 2,17% do terreno, destacando-se o adensamento urbano na cidade de Montes Claros. Embora seja proeminente o crescimento da urbanização nos limites de Montes Claros, é possível identificar que há impactos em função da cobertura por pastagens. Estas impactam diretamente as vegetações nativas que já são escassas.

## 4.8 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A Evapotranspiração Real (ETR) é a somatória de todo vapor transferido para a atmosfera proveniente da transpiração vegetal e da umidade do solo; a Evapotranspiração Potencial (ETP) caracteriza o potencial máximo de transpiração de uma região vegetada contínua em um intervalo específico de tempo (CIIAGRO 2020). O mapa de Evapotranspiração da região estudada (Figura 4.11), pode ser visto a seguir.



**Figura 4.11**– Mapa de Evapotranspiração de referência (adaptado de PANM 2019).

Na região de cobertura do projeto, a Evapotranspiração de Referência (ETR) varia de 1500 a 1700 mm/ano, sendo que a região norte da área apresenta os maiores valores, com um intervalo médio de 1600 a 1700 mm/ano. Nas porções centrais e sul as médias de evapotranspiração oscilam entre 1500 a 1600 mm/ano.

## 4.9 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

Conforme PANM (2019), a área estudada apresenta sistemas aquíferos dispostos em domínios cárticos, cárticos-fraturados e granulares. Segundo Paixão (2006), os aquíferos cársticos associados as sub-bacias do rio Verde Grande, Jequitai e Riachão correspondem a calcários, em geral, horizontalizados, tendo a porosidade interparticular como resultado da dissolução de descontinuidades presentes, formando condutos de circulação para a água. O maior potencial hidrogeológico estão nas localidades com espessas camadas carbonáticas.

Concordante ao trabalho de Mourão *et al.* (2001), o aquífero fissurado-cárstico do Grupo Bambuí agrupa rochas pelíticas e carbonáticas, representadas por margas, siltitos e ardósias com níveis calcários e dolomíticos. A variação no comportamento hidráulico ocorre devido aos litotipos e as características estruturais. A recarga direta é proveniente da infiltração da água meteórica (precipitação), e quando transcorre indiretamente, associa-se a drenagens estruturalmente conectadas com o sistema subterrâneo e pela influência dos aquíferos granulares subjacentes.

Sabendo que os sistemas aquíferos predominantes na região estudada são aquíferos cárticos ou fissurados-cárticos, logo, torna-se necessário caracterizá-los conforme a seguir.

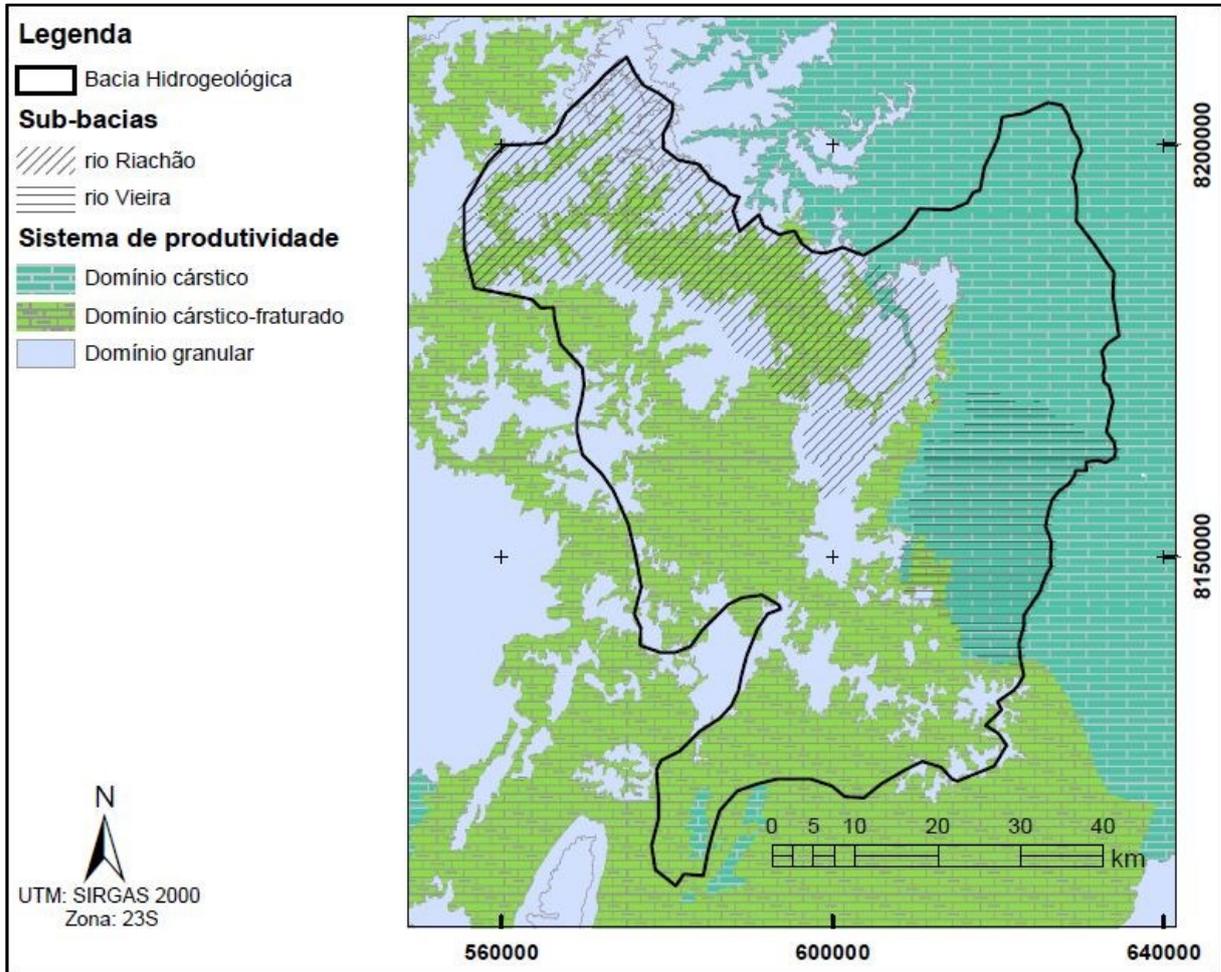
Aquíferos fissurados-cársticos:

- Oscila de 2,3 a 506 m<sup>2</sup> /dia, com valor médio de 109 m<sup>2</sup> /dia.
- Tem capacidade específica média de 2,23m<sup>3</sup> /h\*m.
- Apresenta condutividade elétrica média de 427 µS/cm.
- Em média, o pH é 8, devido a composições bicarbonatadas magnesianas, sódicas e mistas.

Aquíferos cársticos:

- Oscila de 233 a 7700 m<sup>2</sup> /dia.
- Tem capacidade específica média é de 12,7 m<sup>3</sup> /h\*m.
- pH médio de 7,8, com valor máximo igual a 9,0.
- A condutividade elétrica oscila de 420 a 2.336 µS/cm, com média de 463 µS/cm.

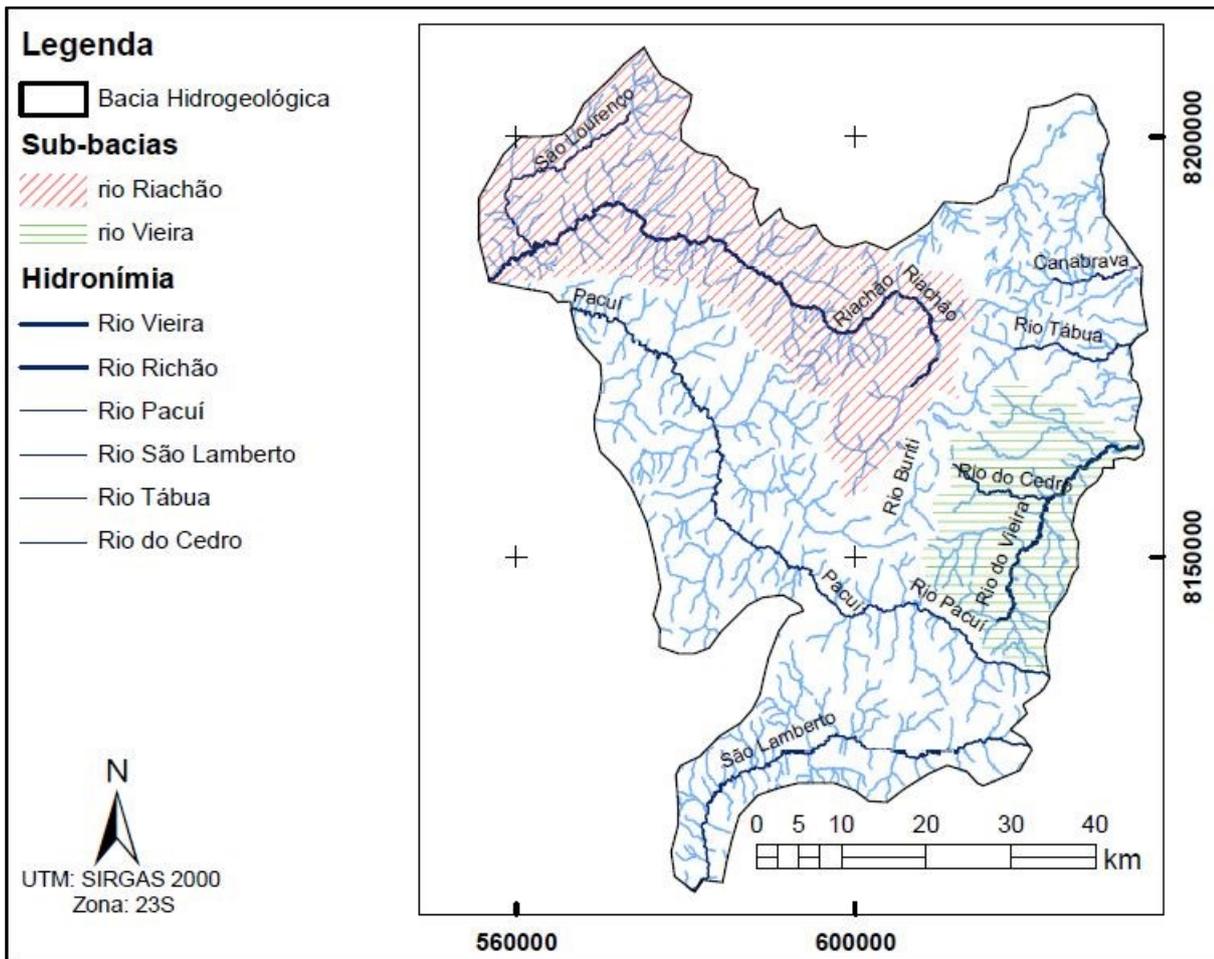
O mapa de sistemas de produtividade aquífera (Figura 4.12), ilustra o contexto hidrogeológico exposto, evidenciando três sistemas de produtividade na área de estudo: cárstico, cárstico-fraturado e granular.



**Figura 4.12**– Sistemas de produtividade aquífera (adaptado de PANM 2019).

Inicialmente o trabalho tem por expectativa proteger os domínios cársticos, porém devemos ressaltar que a identificação do aquífero cárstico-fraturado localizado na sub-bacia do rio Riachão evidencia uma nova região com necessidade de proteção por ter um comportamento hidrogeológico mais vulnerável a possíveis contaminações antrópicas.

O mapa hidrográfico revela os principais rios e drenagens regionais das sub-bacias do rio Riachão e rio Vieira, além das zonas de influência que definem a bacia hidrogeológica estudada, pertencendo a bacia do rio São Francisco. (Figura 4.13). O rio Vieira é um importante afluente do rio Verde Grande, sendo a bacia hidrográfica do rio Vieira totalmente inserida no município de Montes Claros (Leite et al. 2011).



**Figura 4.13** – Mapa hidrográfico (adaptado de Chaves & Benitez 2006, Chaves & Andrade 2009, Chaves & Andrade 2014, Chaves 2014).

As sub-bacias do rio Riachão e rio Vieira são estudadas de forma independente, porém a identificação de reservas aquíferas permanentes e sumidouros na região de interseção entre as duas sub-bacias indicam que na verdade são um único sistema, logo, a compreensão desses aquíferos ressalta o risco do impacto da contaminação de uma delas afetar outra devido as conexões subterrâneas existentes.

#### 4.10 FONTES CONTAMINANTES

As fontes contaminantes identificadas na região estudada (Figura 4.14) são provenientes do material orgânico em decomposição proveniente de cemitérios, esgotamento sanitário, lixões e aterros sanitários, além de resíduos químicos de postos de combustíveis. Diferentes fontes poluentes ao atingirem a superfície são carreados pela água meteórica infiltrando nos aquíferos. No geral, nos ambientes cársticos o impacto tende a ser mais alto devido a maior velocidade dos fluxos de água subterrânea e de seus processos de dissolução típicos.

As fontes poluentes estão adensadas principalmente junto a área urbanizada do município de Montes Claros, tendo alta densidade de pontos expostos aos poluentes mencionados.

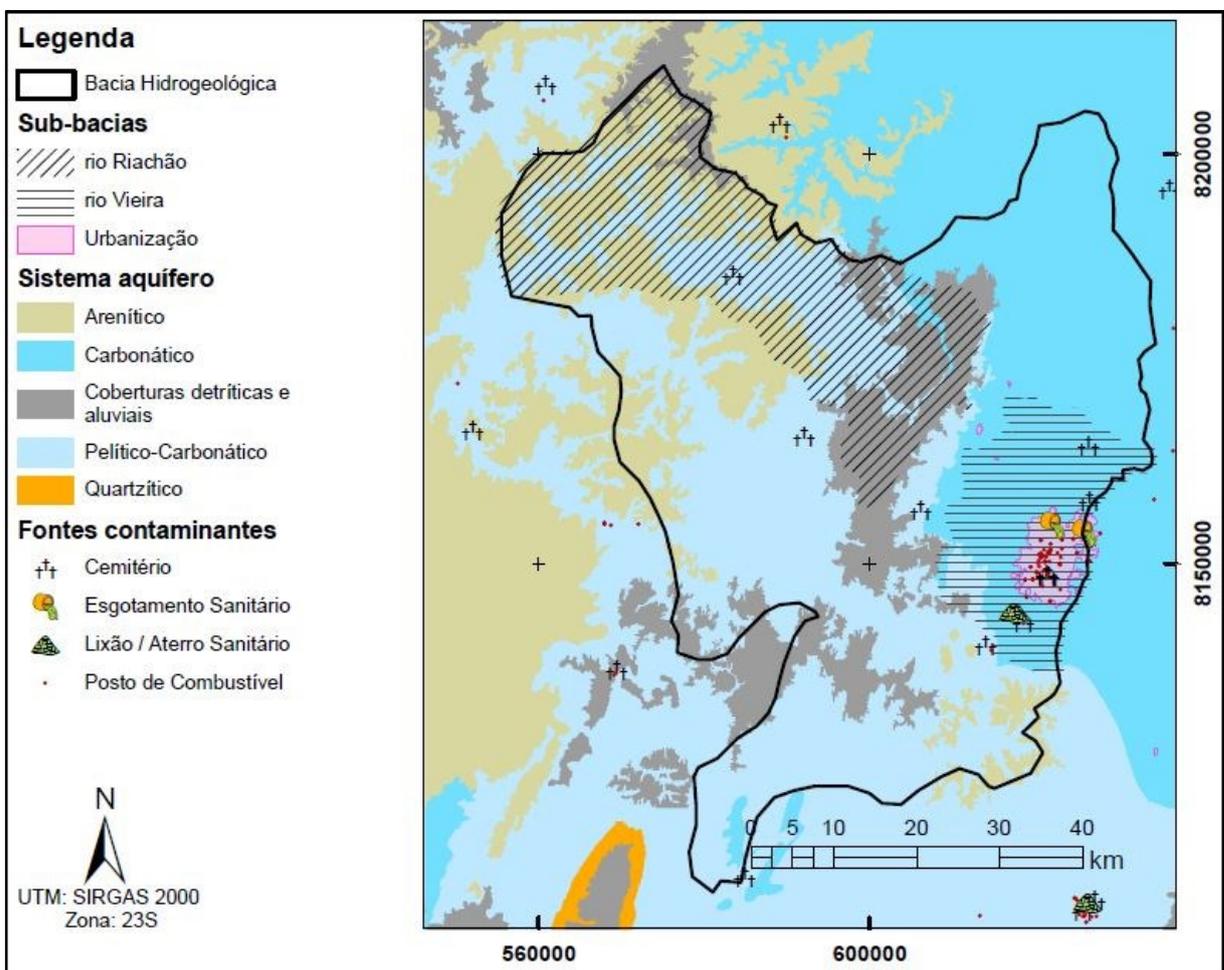
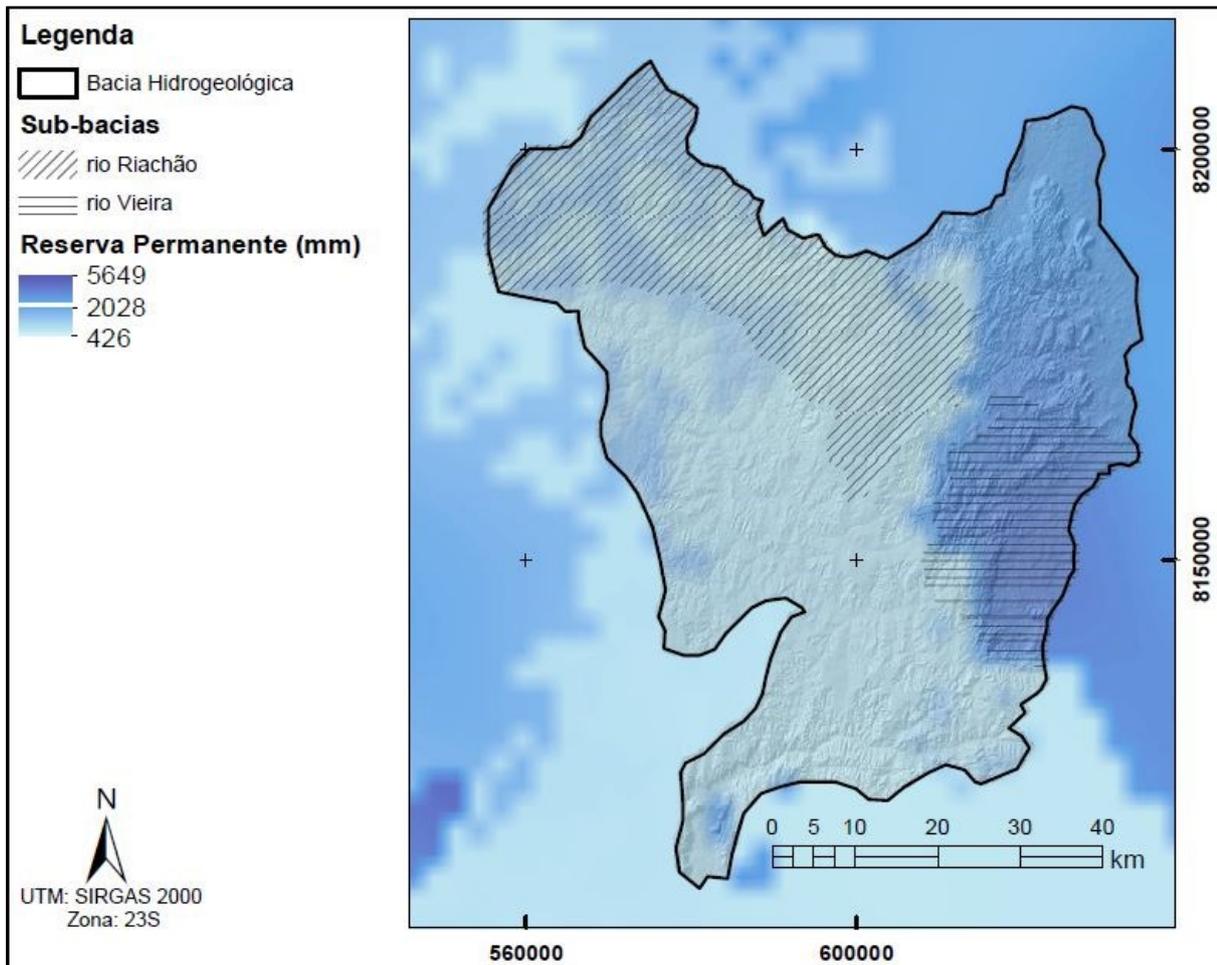


Figura 4.14 – Domínios hidrogeológicos e principais fontes contaminantes (adaptado de PANM 2019).

#### 4.11 RESERVA AQUÍFERA PERMANENTE

De acordo com PANM (2019), a reserva aquífera permanente define o aporte de água armazenada durante o tempo geológico, logo, analisa o recurso hídrico armazenado como invariável, pois desconsidera a sazonalidade climática e fluutuabilidade da superfície freática.

O mapa de reservas aquíferas permanentes (Figura 4.15), foi obtido pela ferramenta *Zonal Statistics as table* do software ArcGis 10.5 aplicado a shapefile de reservas permanentes (PANM 2019).



**Figura 4.15** – Reserva aquífera permanente (adaptado de PANM 2019).

A sub-bacia do rio Riachão possui uma reserva permanente de aproximadamente 700 mm, já a reserva da sub-bacia do rio Vieira é pelo menos três vezes maior com valor médio de 2100 mm. No mapa a porção com maior rugosidade característica da Formação Lagoa do Jacaré apresenta alta hidratação com valor médio de 2028 mm de reserva permanente.

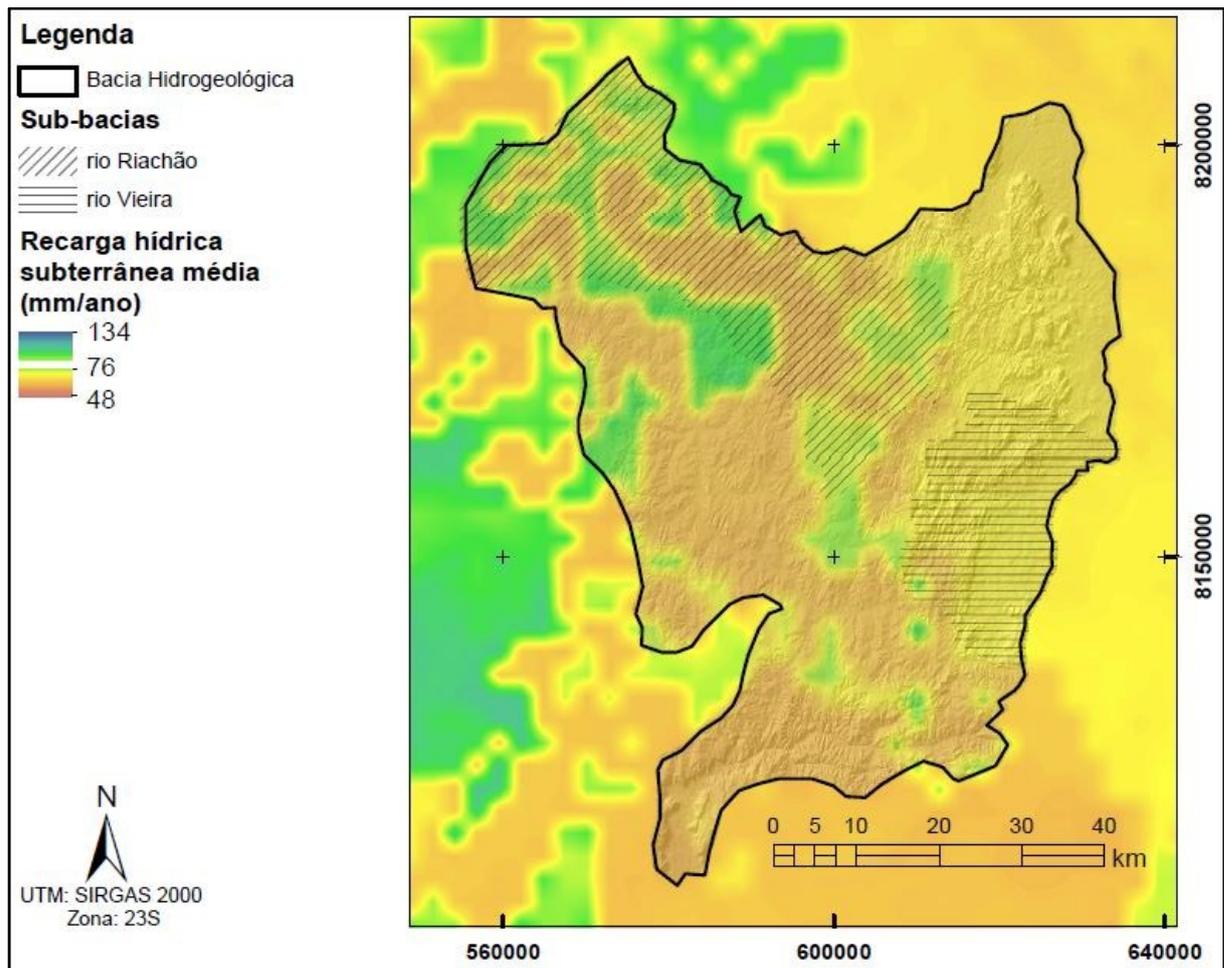
Os valores de referência da espessura da zona saturada (Quadro 4.1) caracterizam os sistemas aquíferos arenítico, carbonático, pelito-carbonáticas e coberturas detríticas e aluviais analisados neste trabalho.

**Quadro 4.1** – Espessura típica da zona saturada de cada sistema aquífero (adaptado de PANM 2019).

Sistema aquífero	Espessura saturada (m)		
	Mínima	Máxima	Média
Arenítico	27,9	90,2	51,6
Carbonático	26,1	99,7	53,6
Coberturas detríticas e aluviais	2,1	15,1	8,2
Pelito-Carbonático	25,7	105,1	56,2

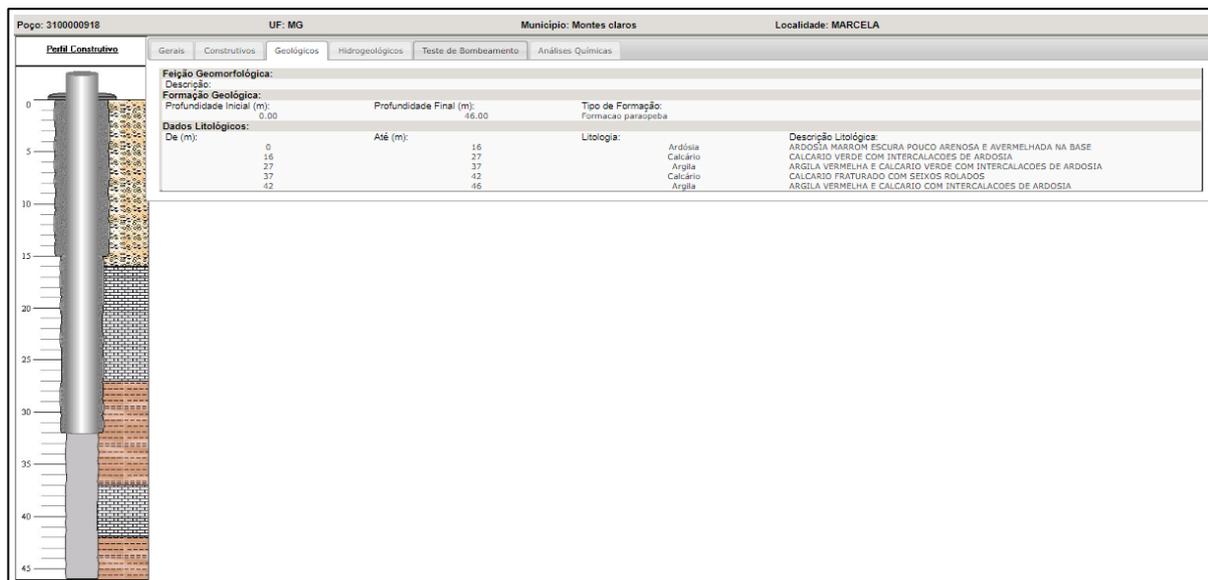
#### 4.12 RECARGA HÍDRICA SUBTERRÂNEA

Conforme Doerfliger & Zwahlen (1998), a reposição das águas em um aquífero recebe o nome de recarga, dependendo intrinsecamente da pluviosidade associada a infiltração, escoamento e evaporação (Figura 4.16).

**Figura 4.16**– Recarga hídrica subterrânea média (adaptado de PANM 2019).

### 4.13 POÇOS TUBULARES

Para a caracterização da exploração das águas subterrâneas foram utilizadas as informações georeferenciadas dos 740 poços da região, cadastrados no SIAGAS, com descrição geológica dos furos e profundidade da zona freática. A descrição do poço 3100000918 na cidade de Montes Claros, exemplifica os dados que foram compilados (Figura 3.19).



**Figura 4.17** – Poço com perfil geológico em Montes Claros (Fonte: SIAGAS 2018).

A demanda hídrica da área da sub-bacia do rio Vieira, projetada até o ano 2030, é verificada a seguir (Quadro 4.2).

**Quadro 4.2** – Demanda hídrica regional (adaptado de ANA 2018).

Demanda Hídrica da área piloto do Rio Vieira (m <sup>3</sup> /dia)				
Usos Consultivos	2015	2020	2025	2030
Abastecimento Humano	139147	145007	149480	152486
Industrial	63	75	90	108
Dessedentação Animal	6589	6637	6684	6732
Agricultura	42376	34525	28129	22918
TOTAL	188175	186244	184383	182244

É projetado até o ano de 2030 a redução da demanda hídrica. Para isso ocorrer será reduzida a água destinada a agricultura e haverá aumento da disponibilidade de água para a indústria, o aumento da demanda para o abastecimento público é justificada pela expansão, crescimento populacional e urbanização da região de Montes Claros, norte de Minas Gerais.

#### 4.14 ESPELEOLOGIA

O mapeamento das feições cársticas é de extrema importância para o presente trabalho, devido a predominância dos sistemas aquíferos cársticos e fissuro-cársticos (PANM 2019) na região de enfoque do trabalho. Algumas dessas feições cársticas, identificadas neste trabalho, foram:

- **Dolinas:** feições cársticas comuns marcadas por depressões plásticas superficiais formadas por processos de dissolução e intemperismo que ocorrem internamente com os litotipos solúveis (Goldscheider & Drew, 2007).
- **Sumidouros e surgências:** sumidouros são pontos de recarga do sistema hidrogeológico cárstico, onde a água proveniente do escoamento superficial migra para regiões subterrâneas. Surgências são regiões onde ocorre a descarga da água subterrânea, que promoveu a dissolução interna da rocha, é novamente canalizada para superfície (Ford & Williams, 2007).
- **Cavernas:** caracterizam todo espaço natural subterrâneo, às vezes, acessível aos seres humanos, podendo estender-se horizontalmente ou verticalmente, sendo também chamada de gruta, lapa, toca e abismo (BRASIL 2008).

A base de dados correspondente aos estudos em zonas cársticas foi obtida através do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), órgão ambiental do governo brasileiro, criado pela lei 11.516, de 28 de agosto de 2007, tendo o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV) como responsável pelo estudo, proteção e manejo de cavernas.

Foram identificadas no total 283 cavidades na área de estudo, estando localizadas, 1 em Brasília de Minas, 1 em Claro dos Poções, 9 em Coração de Jesus, 2 em São João da Lagoa e 270 em Montes Claros. Quanto a distribuição dessas cavidades na bacia hidrogeológica (Quadro 4.3), temos que:

**Quadro 4.3** – Distribuição das cavidades de acordo com a bacia hidrogeológica e sub-bacias (adaptado de CANIE 2018).

Distribuição espacial das cavidades	
Bacia hidrogeológica	283
Sub-bacia do rio Riachão	2
Sub-bacia do rio Vieira	224

A localização das feições cársticas pode ser observada a seguir (Figura 4.18).

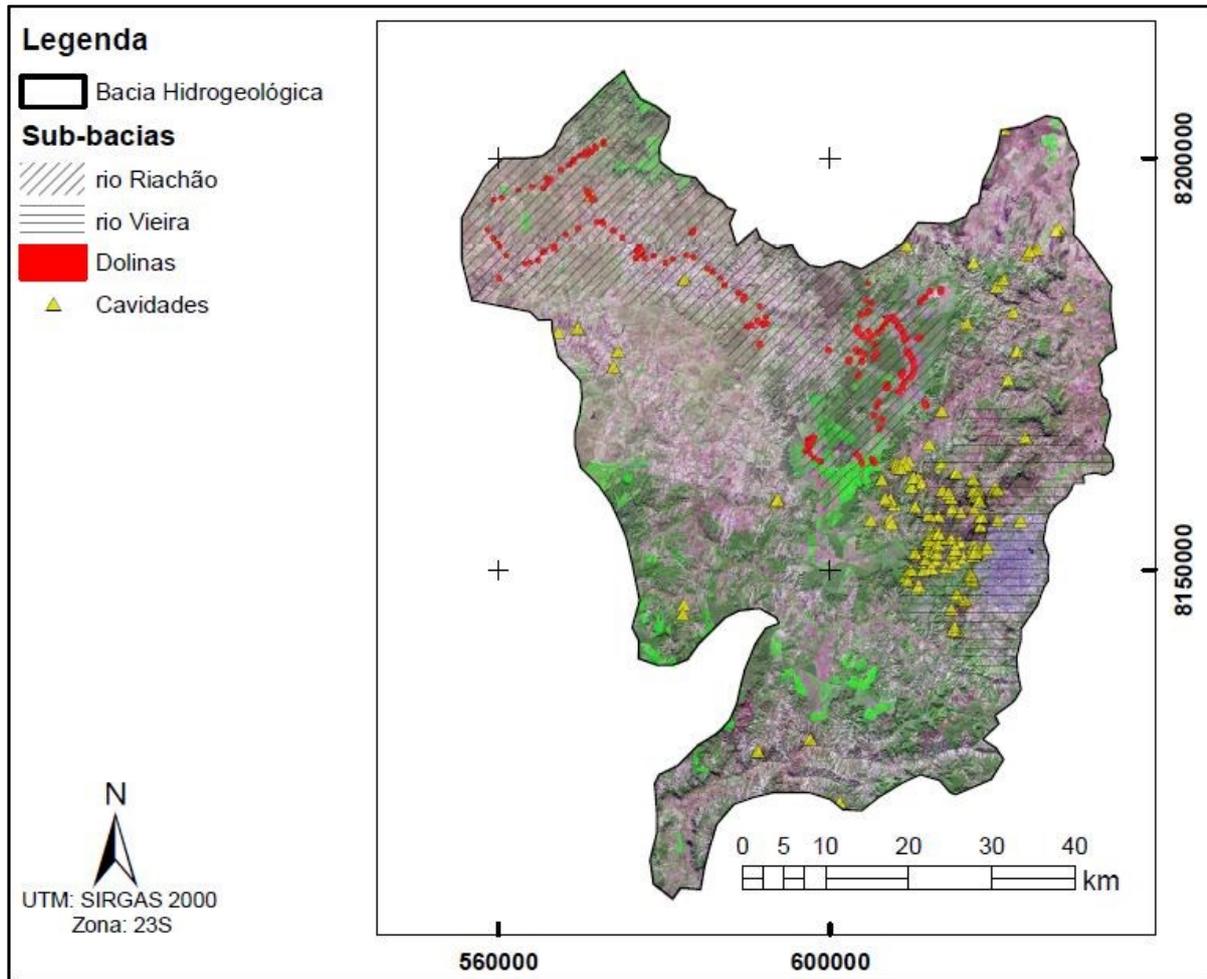
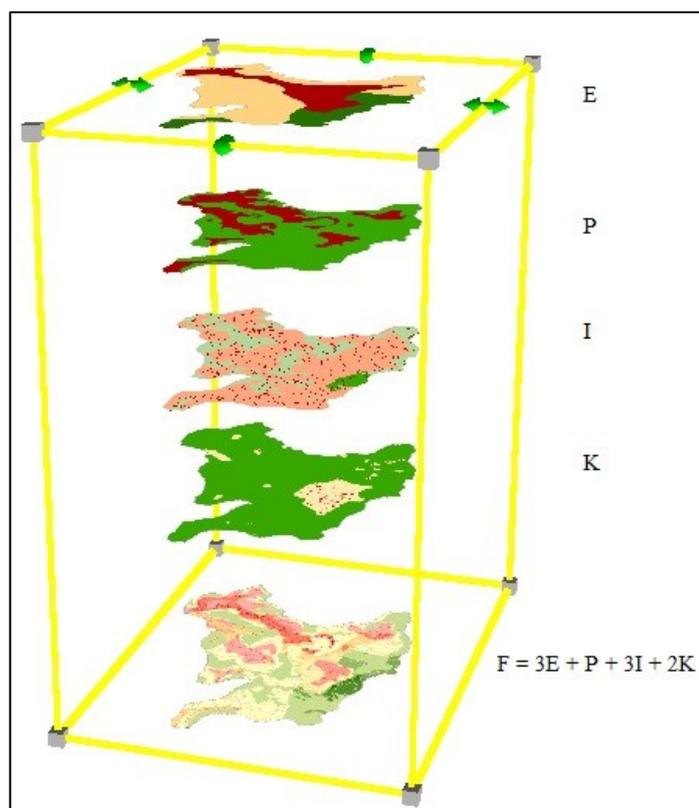


Figura 4.18 – Mapa de feições cársticas (adaptado de CANIE 2018).

#### 5.1 INTRODUÇÃO

A organização e validação da base de dados foi a etapa fundamental para a geração dos mapas temáticos descritivos das condições ambientais regionais. Para a aplicação do método EPIK com o objetivo final de gerar o mapa de vulnerabilidade dos aquíferos da região de estudo, foi necessário antes utilizar das ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto para caracterizar todos os parâmetros que caracterizam a bacia hidrogeológica e assim conhecer as peculiaridades das sub-bacias do rio Riachão e rio Vieira.

O mapa de fator de proteção foi gerado através da sobreposição dos valores classificados, com a adaptação do método para cada um dos parâmetros. Para melhor ilustrar o método EPIK, os parâmetros foram dispostos no software *ArcScene 10.5* (Figura 5.1)

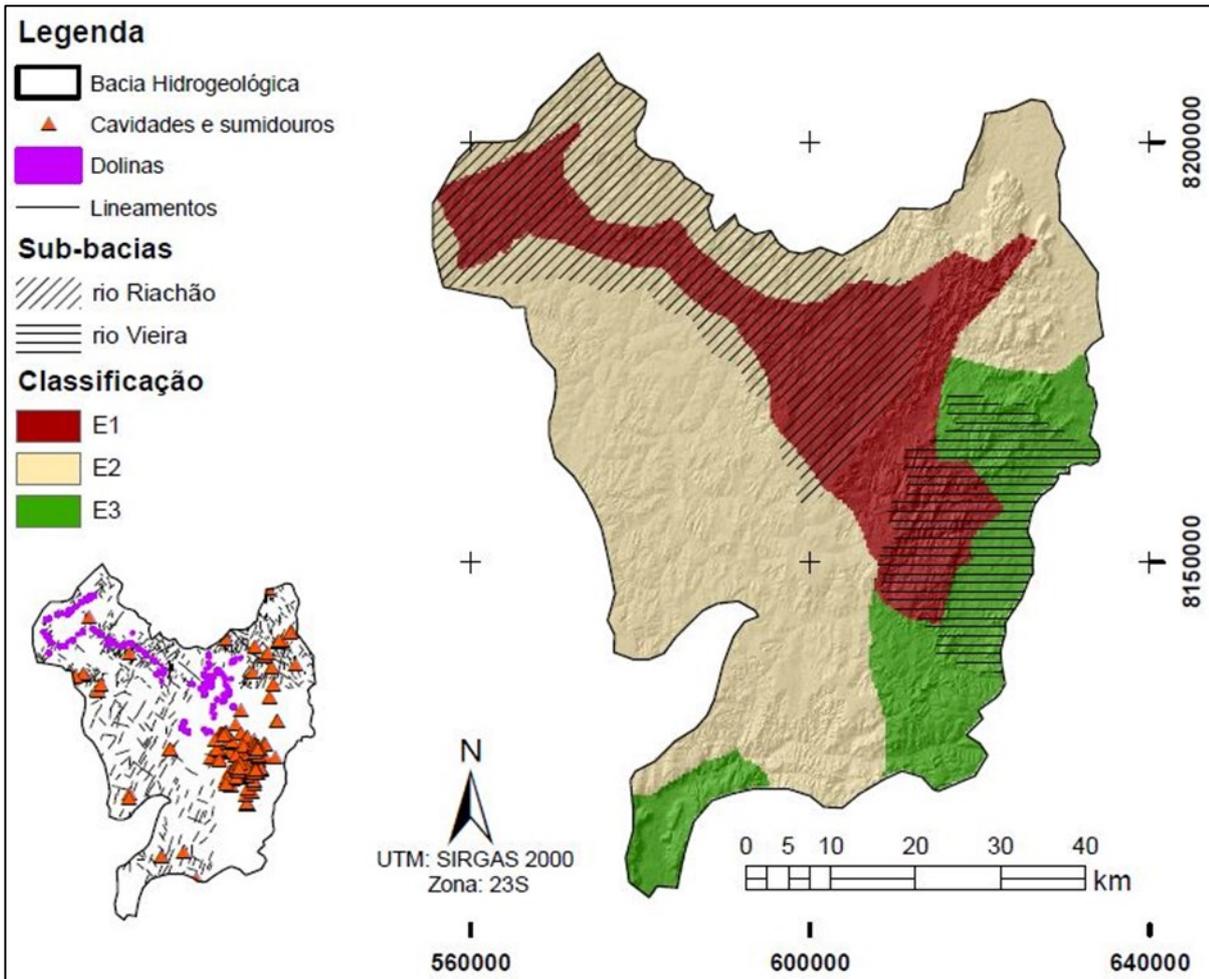


**Figura 5.1** – Parâmetros do método EPIK determinando o fator de proteção

A seguir será exposto os resultados obtidos para cada parâmetro: Epicarste, Cobertura de proteção, condições de infiltração e rede de desenvolvimento cárstico

### 5.1.1 Epicarste

A construção do mapa Epicarste baseou-se nos estudos das feições cársticas (CANIE 2018) presentes na área, além do condicionamento estrutural da área. A setorização das classes E1, E2 e E3, foram determinadas a partir das feições cársticas identificadas. A partir do arquivo no formato vetorial que classificou a região nas classes E1, E2 e E3, foi utilizada a ferramenta do *ArcGis 10.5* para converter este mapa para o formato matricial (Figura 5.2).



**Figura 5.2** – Mapa do Epicarste e feições analisadas no parâmetro E (adaptado de Doerfliger & Zwahlen 1998, CANIE 2018)

As regiões setorizadas como E1 (maior vulnerabilidade) evidenciaram as feições cársticas das sub-bacias do rio Riachão e rio Vieira, a classe E2 (intermediária) revela a influência estrutural no comportamento dos aquíferos e a classe E3 região com menor rugosidade no terreno (menores declividades), sem as características já expostas anteriormente.

As porcentagens de área de cobertura para cada classe do parâmetro Epicarste foram determinadas e dispostas a seguir (Quadro 5.1).

**Quadro 5.1** – Quantificação da cobertura dos parâmetros do mapa do epicarste (adaptado de Doerfliger & Zwahlen 1998, CANIE 2018).

Quantificação das classes do mapa do epicarste (E)		
Epicarste	Classificação	Área de cobertura
E1	1	24,41%
E2	3	58,43%
E3	4	17,16%

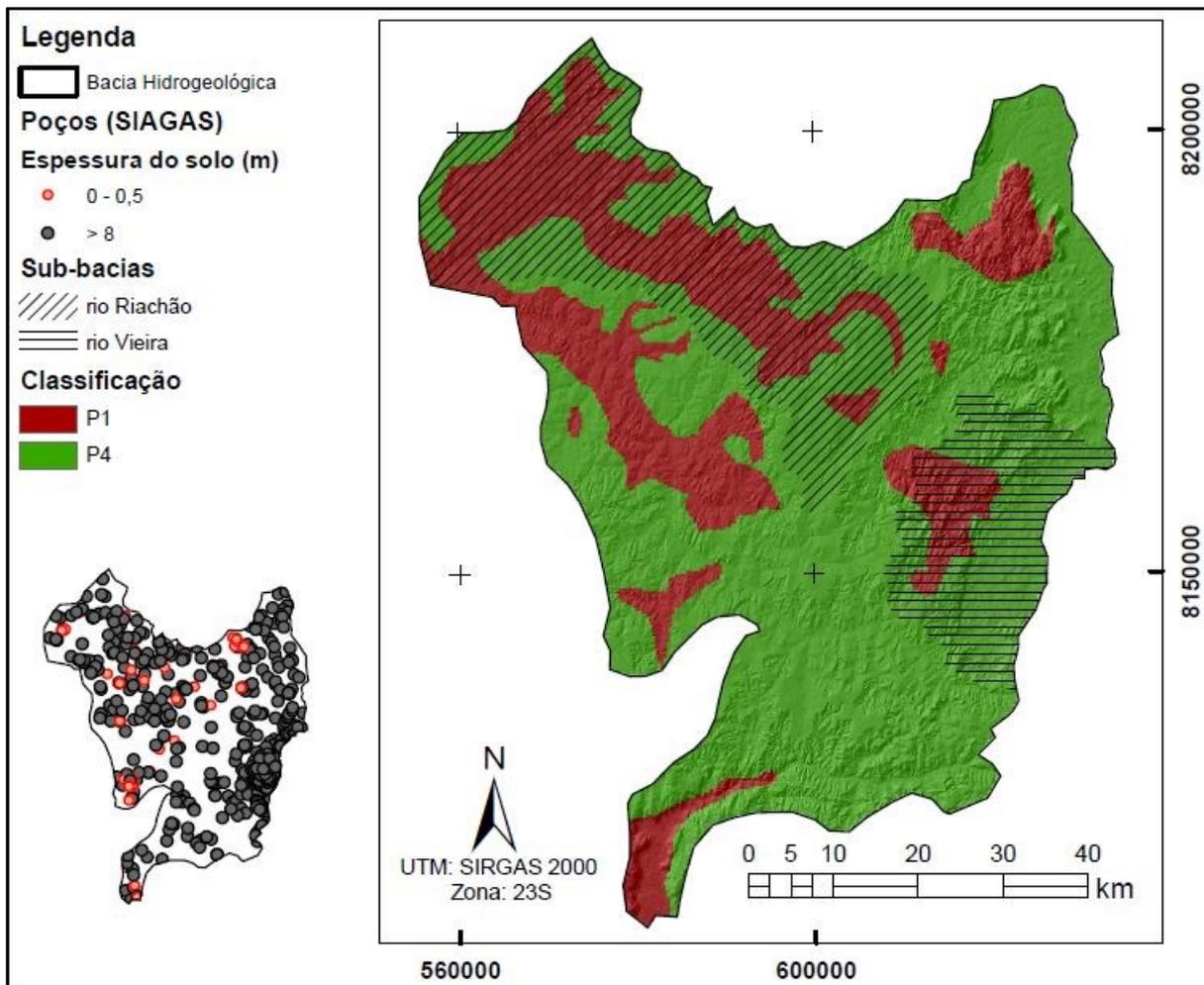
Resumidamente as classes do parâmetro epicarste foram delimitadas a partir dos aspectos da geomorfologia cárstica observada regionalmente (Quadro 5.2).

**Quadro 5.2** - Parâmetro Epicarste (retirado de Pereira 2018, adaptado de Doerfliger & Zwahlen 1998).

Epicarste	Aspectos da geomorfologia cárstica	Aspectos geomorfológicos (adaptado)	Classificação
E1	Sumidouros, dolinas e afloramentos muito fraturados	Polígono abrangendo o buffer de 250 m nas feições cársticas identificadas pelo sensoriamento remoto	1
E2	Zonas intermediárias no alinhamento de dolinas, vales secos e afloramentos com fraturação média	Zonas com interseções de lineamentos	2
E3	Ausência	Restante da área	3

### 5.1.2 Cobertura de Proteção (P)

Para a criação do mapa de parâmetros da cobertura de proteção foram utilizados os dados das shapefiles fornecidas pelo SIAGAS, com dados geológicos e com a espessura dos solos acessados por poços tubulares. A partir do mapa em formato vetorial do parâmetro epicarste, os dados foram convertidos para o formato matricial (Figura 5.3).



**Figura 5.3** – Mapa do Cobertura de Proteção e feições analisadas no parâmetro P (adaptado de Doerfliger & Zwahlen 1998, SIAGAS 2018).

A partir dos dados obtidos pelo geoprocessamento dos dados da shapefile dos poços tubulares (SIAGAS 2018) foram identificadas as porções onde os aquíferos são explorados em níveis mais rasos (círculos vermelhos), indicando a classe P1 e em profundidades maiores que 8 m indicando a classe P4.

As classes P2 e P3 não foram delimitadas pois não foram identificados poços tubulares nas profundidades características destas classes de cobertura de proteção (Doerfliger & Zwahlen 1998).

Os poços tubulares localizados na região estudada (SIAGAS 2018) foram classificados conforme a profundidade que alcançam a zona freática, correlacionando esta medida com a espessura de solo que estabelece a cobertura de proteção (Quadro 5.3).

**Quadro 5.3** – Caracterização dos parâmetros do mapa de cobertura de proteção (adaptado de Doerfliger & Zwahlen 1998, SIAGAS 2018).

Cobertura de proteção	Espessura do solo acima do aquífero cárstico	Classificação
P1	0 cm – 20 cm	1
P4	> 8 m	4

Para a classificação P1 foram compartimentadas as regiões mais vulneráveis onde a espessura dos solos acessados pelos poços tubulares registrados no SIAGAS tem espessuras inferiores a 0,5 metros, estando estes setores diretamente relacionadas às drenagens da sub-bacia do rio Riachão.

Na porção oeste da sub-bacia do rio Vieira altamente carstificada, a influência da litologia, feições de drenagem e alta rugosidade a Formação Lagoa do Jacaré observado em relevo pela fotointerpretação também forma classificações como E1 devido a alta exposição das regiões cársticas a poluentes uma vez que nesta classe existe pequena cobertura de solo sobre a região cárstica.

As classes de vulnerabilidade P2 e P3 não puderam ser diferenciadas devido à insuficiência de dados geológicos dos poços tubulares cadastrados na plataforma SIAGAS e pelo trabalho ter sido feito apenas utilizando técnicas de sensoriamento remoto. de campo para a conferência das espessuras de solos, logo, não entraram no mapa final de cobertura de proteção.

Para a classe de vulnerabilidade P4, foram selecionadas as áreas com profundidades superiores a 8 metros, sendo as menos vulneráveis a contaminação devido a maior tempo de degradação de possíveis contaminantes pelos horizontes granulares subjacentes antes de atingir o aquífero cárstico em profundidade.

Através da ferramenta *Calculate Geometry* foi possível quantificar as áreas classificadas P1 e P4 (Quadro 5.4).

**Quadro 5.4** – Quantificação das classes determinantes do mapa de cobertura de proteção (adaptado Doerfliger & Zwahlen 1998, SIAGAS 2018).

Quantificação das classes do mapa de cobertura de proteção (P)		
Cobertura de proteção	Classificação	Área de cobertura
P1	1	28,3%
P4	4	71,7%

As adaptações feitas para a determinação do parâmetro P visaram proteger as regiões intimamente associadas ao carste (Formação Lagoa do Jacaré) e as drenagens da sub-bacia do rio Riachão. A setorização dessas regiões com a classe P1 superaram as expectativas iniciais pois não se restringiu em proteger a zona cárstica, mas também evidenciou a importância da hidrografia regional.

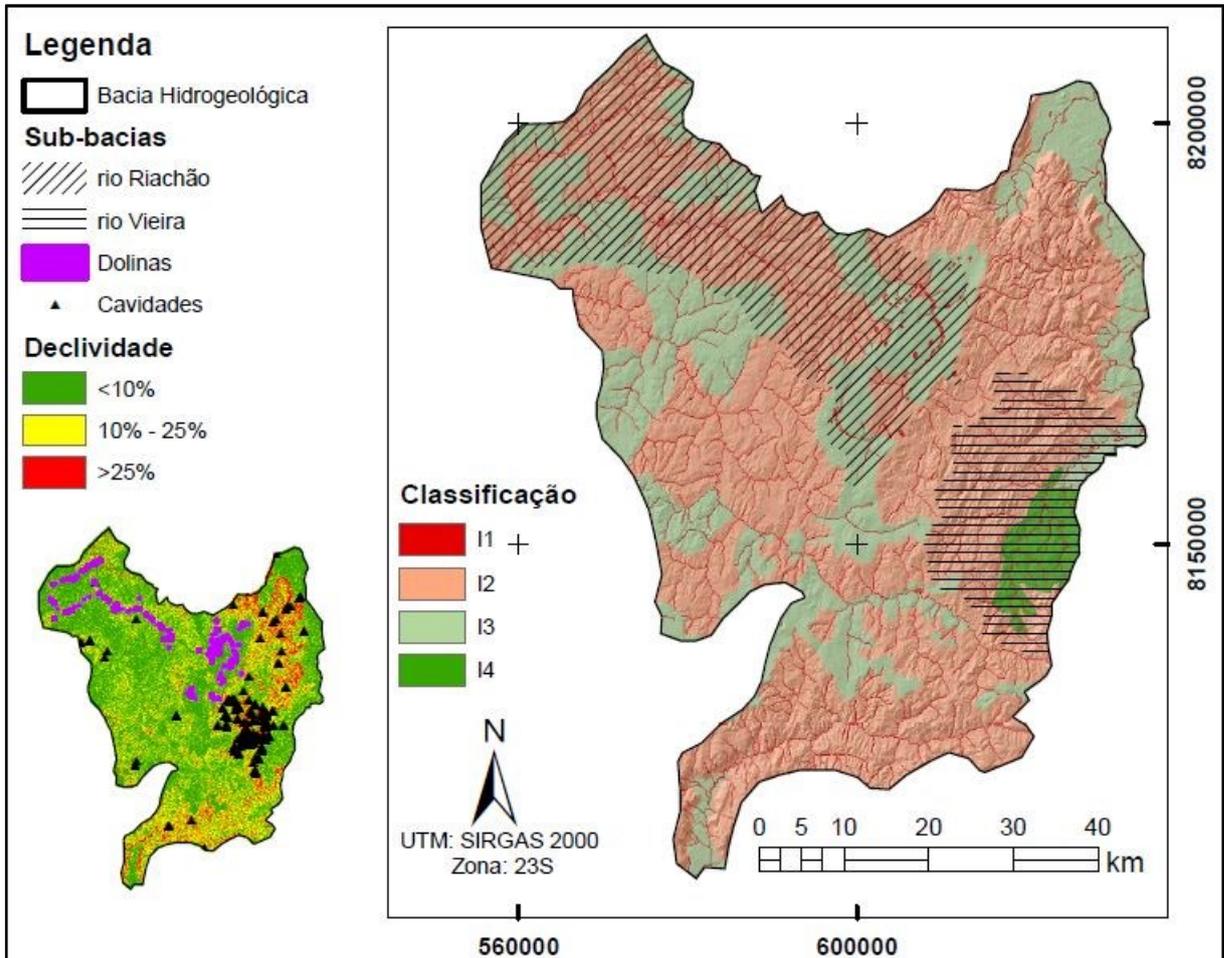
Como dado complementar ao parâmetro cobertura de solos, a quantificação de cada cobertura vegetal medida através do processamento digital da shapefile de vegetação, pode ser resumida a seguir (Quadro 5.5).

**Quadro 5.5** – Caracterização vegetal (adaptado de UFV et al. 2010, PANM 2019).

Vegetação	
Campo	3,61%
Campo cerrado	3,83%
Cerrado	28,49%
Eucalipto / Pinus	3,70%
Floresta estacional decidual	3,28%
Floresta estacional semidecidual	1,48%
Veredas	0,03%
TOTAL	44,42%

### 5.1.3 Condições de Infiltração (I)

O mapa das condições de infiltração da mesma forma que o mapa de desenvolvimento do epicarste, apresentam os maiores coeficientes de ponderação do método EPIK (Figura 5.4).



**Figura 5.4** – Mapa de Condições de infiltração e feições analisadas no parâmetro I (adaptado de Doerfliger & Zwahlen 1998, CANIE 2018).

As classes I1, I2, I3 e I4 delimitaram o mapa do parâmetro de infiltração, do método EPIK (Doerfliger & Zwahlen 1998).

A classe I1 delimitou as regiões onde há a presença de cursos de água perene, temporários ou feições cársticas (cavidades), sendo a mais vulnerável. Para a caracterização E1 foi utilizado os mapas hidrográfico e espeleológico pois continham as feições determinantes ao parâmetro.

As classes I2 e I3 foram classificadas de forma adaptada em relação ao método EPIK original, desconsiderando se a área é utilizada como pastagem ou se está sendo cultivada, esta adaptação foi feita passando a caracterizar as classes apenas conforme a inclinação regional, pois embora classificadas

individualmente pelo mapa de uso e ocupação estas áreas já sofreram forte intervenção antrópica e devastação da vegetação original sendo muito difícil discrimina-los individualmente.

A região classificada por I4, delimitou o restante da bacia hidrográfica, delimitando as áreas menos vulneráveis a contaminação uma vez que considerou a impermeabilização do solo na região densamente urbanizada de Montes Claros.

As classes do parâmetro de condição de infiltração foram adequadas as particularidades da bacia hidrogeológica (Quadro 5.6).

**Quadro 5.6** – Caracterização das classes determinantes ao mapa de condições de infiltração (adaptado de Doerfliger & Zwahlen 1998, CANIE 2018, PANM 2019).

Condições de infiltração	Tipo	Condições de infiltração (adaptado)	Classificação
I1	Cursos de água perene ou temporário alimentadores de sumidouros e dolinas	Cursos de água perene ou temporários e cavidades	1
I2	Áreas com inclinação maior que 10% em áreas cultivadas e maior que 25%	Inclinação > 10%	2
I3	Áreas com inclinação menor que 10% em áreas cultivadas e menor que 25%	Inclinação < 10%	3
I4	Restante da bacia hidrográfica	Restante da bacia	4

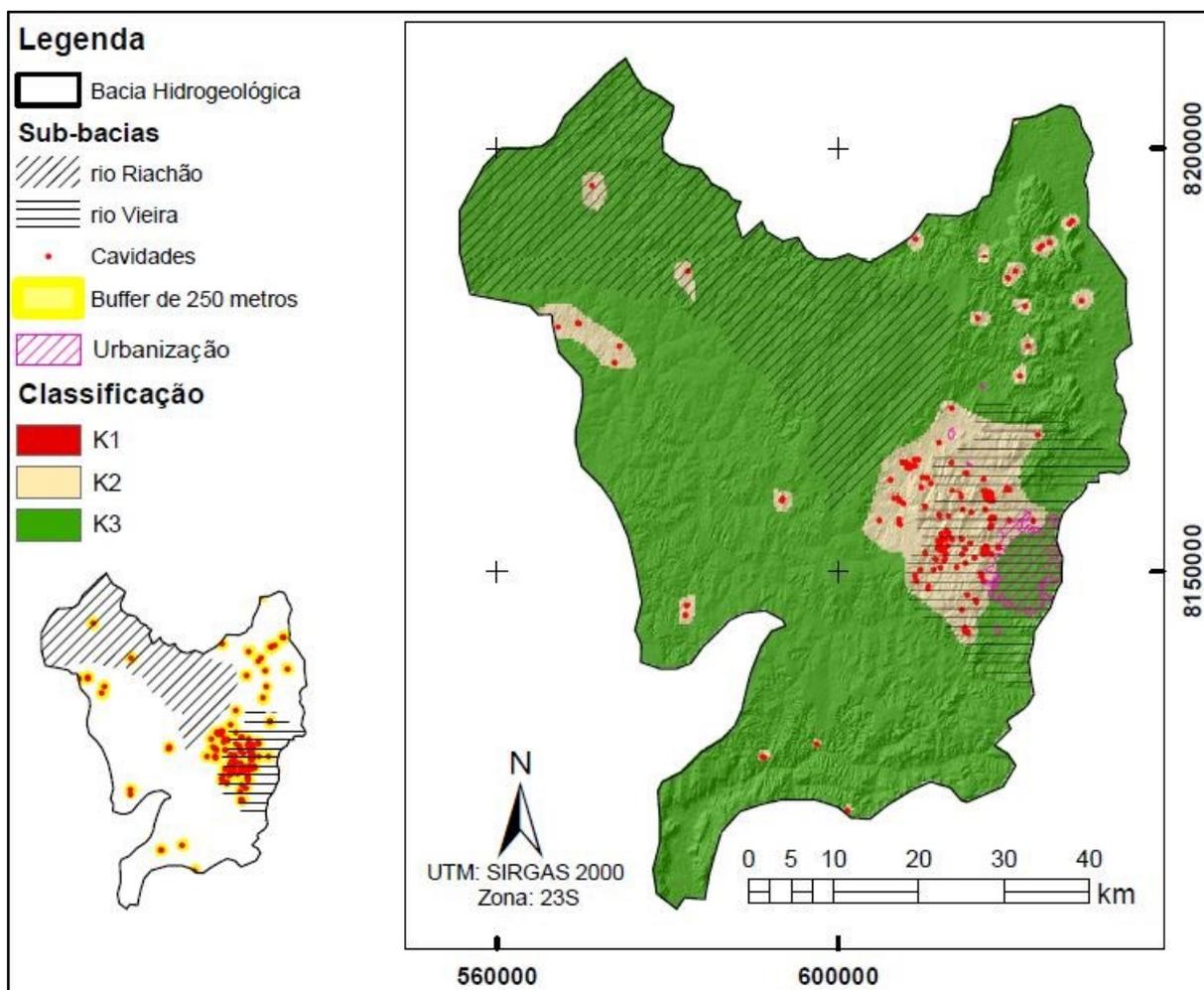
A quantificação da área coberta por cada uma das classes do parâmetro de condições de infiltração, pode ser observada no quadro, obtido pela ferramenta *Calculate Geometry* do software *ArcGis 10.5* (Quadro 5.7).

**Quadro 5.7** – Quantificação das classes determinantes do mapa de condições de infiltração (adaptado de Doerfliger & Zwahlen 1998, CANIE 2018, PANM 2019)

Quantificação das classes do mapa de condições de infiltração (I)		
Condições de infiltração	Classificação	Área de cobertura
I1	1	5,95%
I2	2	62,53%
I3	3	29,23%
I4	4	2,29%

### 5.1.4 Desenvolvimento da rede cárstica (K)

Para a elaboração do mapa do desenvolvimento da rede cárstica foi utilizado o mapa espeleológico com as feições cársticas observadas na área de estudo (Figura 5.5) foi obtido a partir dos dados cadastrados das cavidades (CANIE 2018).



**Figura 5.5** - Mapa do desenvolvimento da rede cárstica e caracterização das feições analisadas no parâmetro K (adaptado de CANIE 2018)

A classe K1 delimitou as cavidades naturais (CANIE 2018) e sua respectiva área de proteção (buffer de 250 metros) garantidos legalmente (Resolução CONAMA nº 347/2004). A classe K2 delimitou o entorno das regiões da classe K1, classificando as regiões com fraco desenvolvimento cárstico, mas que ainda influenciam diretamente nos parâmetros hidrogeológicos das regiões com alto grau de desenvolvimento cárstico. A classe K3 delimitou o restante da bacia hidrogeológica, onde não foram identificadas cavidades cadastradas (CANIE 2018).

A região da bacia hidrogeológica que apresentou a maior vulnerabilidade a contaminação, pode ser observada na porção oeste da sub-bacia do rio Vieira, onde há um grande adensamento de pontos

que descrevem cavidades, indicando uma possível rede cárstica subterrânea interligando parte dessas cavidades vistas superficialmente de forma pontual.

A classificação do parâmetro de desenvolvimento da rede cárstica avaliou a presença ou ausência de uma rede cárstica e seu respectivo grau de desenvolvimento (Quadro 5.8).

**Quadro 5.8-** Caracterização dos parâmetros que determinam o mapa de desenvolvimento da rede cárstica (adaptado de Doerfliger & Zwahlen 1998, Pereira 2018).

Rede Cárstica	Grau de desenvolvimento	Classificação
K1	Moderado a muito desenvolvido	1
K2	Fraco	2
K3	Aquífero sem carstificação	3

Após a identificação dos pontos georreferenciados que descrevem cavidades regionais, foi aplicado um *buffer* de 250 m em torno deles, com base no art. 4º, § 3º, da Resolução CONAMA nº 347/2004, que dispõe que a área de influência das cavidades naturais subterrâneas é a projeção horizontal da caverna acrescida de um *buffer* de 250 m.

Após definir as classes K1, K2 e K3, foi utilizada a ferramenta *Zonal Statistics as table* do software *ArcGis 10.5*, determinando a cobertura em área por cada uma das classes (Quadro 5.9).

**Quadro 5.9** – Quantificação das classes determinantes do mapa de desenvolvimento da rede cárstica (adaptado de Doerfliger & Zwahlen 1998, CANIE 2018, PANM 2019)

Quantificação das classes do mapa de desenvolvimento da rede cárstica (K)		
Desenvolvimento da rede cárstica	Classificação	Área de cobertura
K1	1	0,6%
K2	3	10,42%
K3	4	88,98%

### 5.5 Fator de Proteção (F)

O fator de proteção (F) que determina a proteção natural intrínseca de um sistema aquífero, foi calculado pela aplicação a fórmula do método EPIK (Doerfliger & Zwahlen 1998) (Equação 2.5) substituindo os respectivos pesos relativos (Quadro 5.10)

$$I_g = \alpha \times E + \beta \times P + \gamma \times I + \delta \times K \quad (\text{Equação 2.5})$$

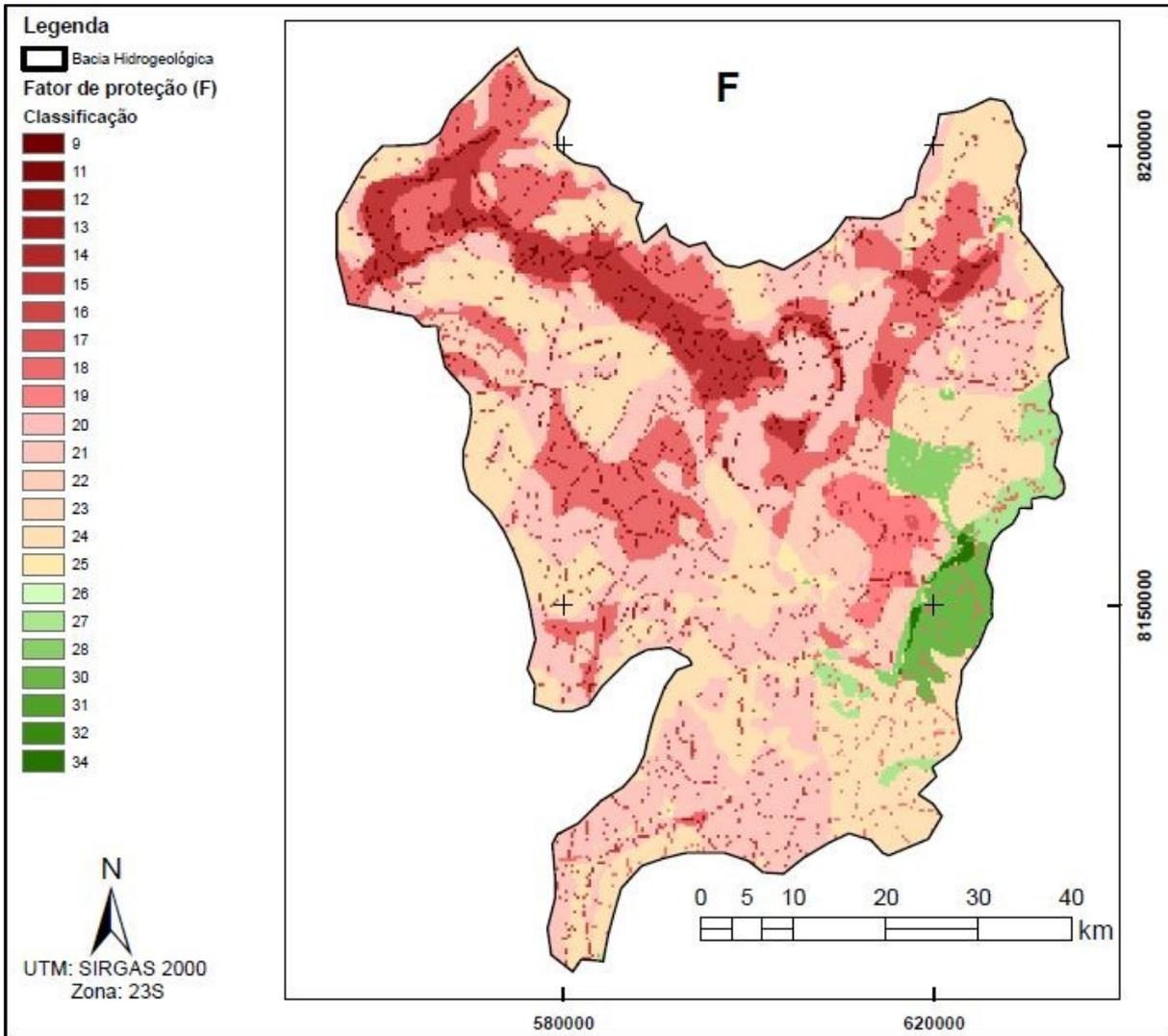
**Quadro 5.10** - Coeficiente de ponderação para os mapas temáticos determinantes ao método EPIK (Fonte: Doerfliger & Zwahlen, 1998).

Parâmetro	Epicarste	Cobertura de Proteção	Condições de	Rede Cárstica
	E	P	I	K
Coeficiente	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
Peso relativo	3	1	3	2

A fórmula final, que determinou o fator de proteção pode ser verificada a seguir (Equação 2.6):

$$I_g = 3 \times E + 1 \times P + 3 \times I + 2 \times K \quad (\text{Equação 2.6})$$

O mapa de fator de proteção (F) foi obtido pela ferramenta *Raster Calculator* do software *ArcGis 10.5*, que resume o método EPIK, para o estudo de caso deste trabalho, os índices do fator de proteção (F) calculados oscilaram de 9 a 34 (Figura 5.6).



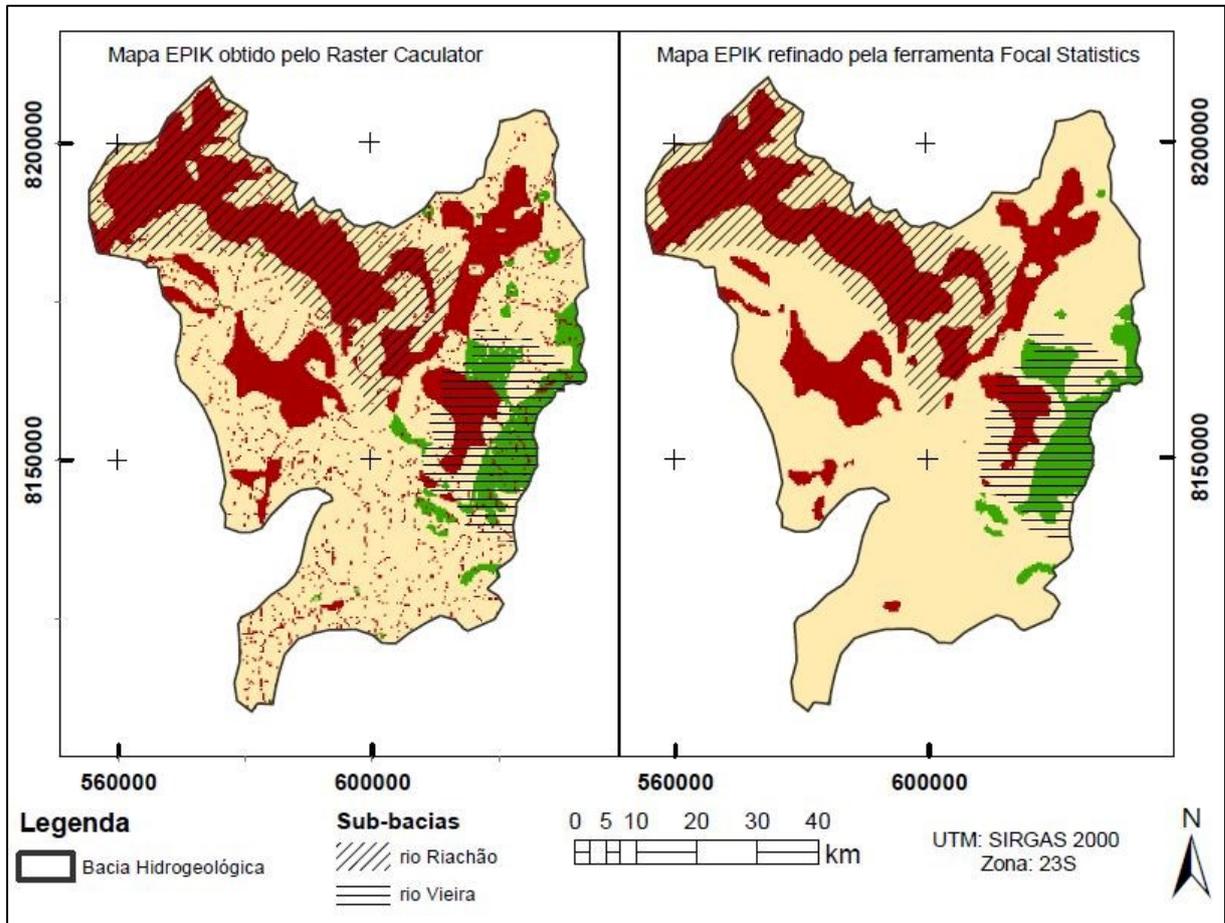
**Figura 5.6** – Mapa do fator de proteção obtido diretamente pela ferramenta *Raster Calculator*.

Para a determinação do mapa de vulnerabilidade final dos aquíferos a contaminação, os mesmos valores obtidos para os fatores de proteção foram reclassificados em três zonas:

- Alta vulnerabilidade ( $F \leq 19$ ),
- vulnerabilidade moderada ( $19 < F < 25$ )
- Baixa vulnerabilidade ( $F \geq 25$ )

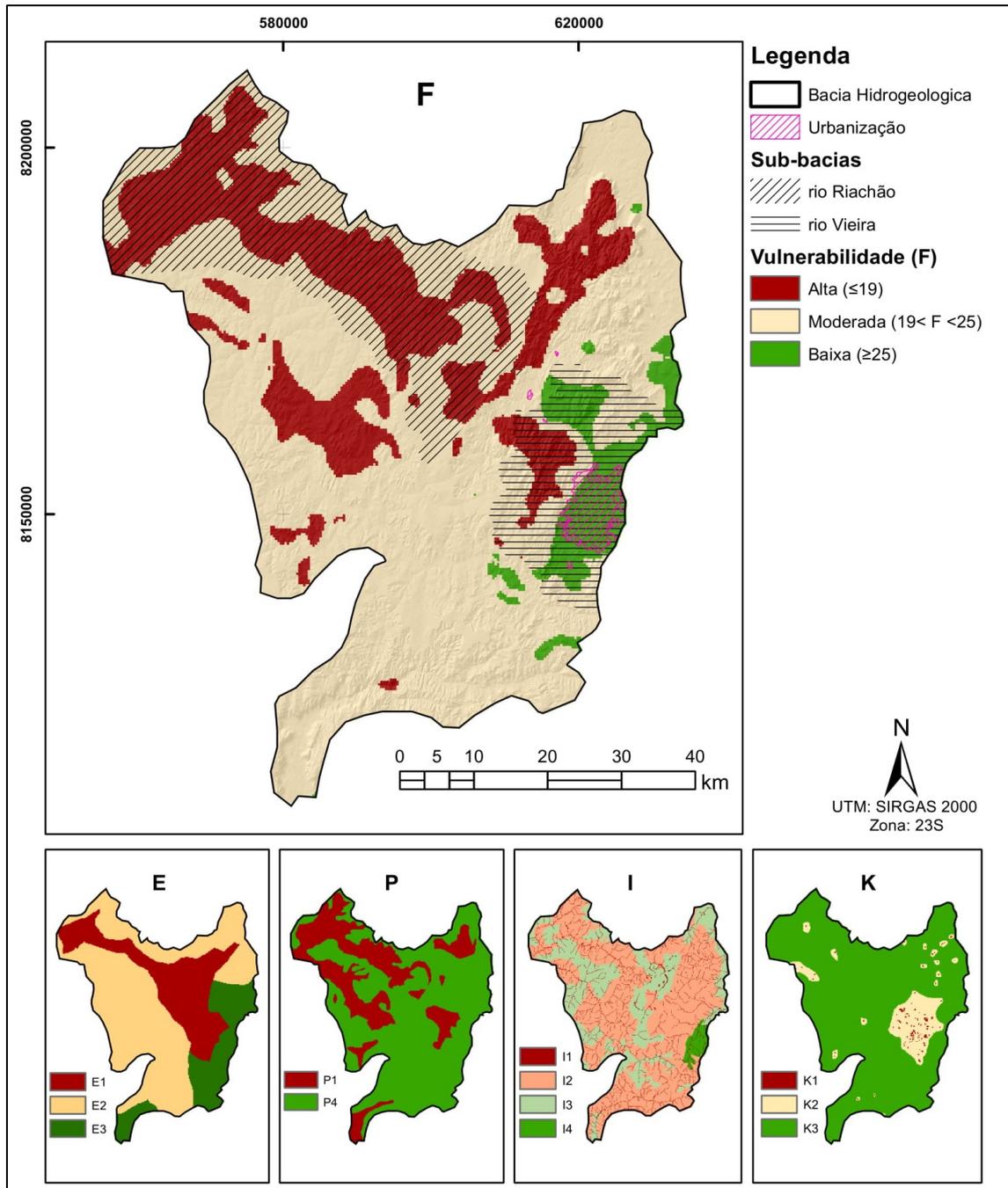
Já era esperado que a região mais habitada tivesse o maior impacto ambiental, porém não há a identificação das contribuições de contaminantes originados pelas atividades agropecuárias que ocorre na maior parte da área de estudo, mostrando a dificuldade em determinar todos os focos de contaminação.

O mapa obtido diretamente pelo cálculo dos parâmetros pela ferramenta *Raster Calculator* (Figura 4.22) foi aprimorado pela ferramenta *Focal Statistics* para melhor distinção das classes de vulnerabilidade, caracterizando a área conforme o comportamento predominante das zonas mapeadas. O detalhamento dos resultados obtidos com a aplicação da ferramenta *Focal Statistics* pode ser verificado a seguir (Figura 5.7).



**Figura 5.7** – Aprimoramento do mapa de vulnerabilidade final dos aquíferos, utilizando a ferramenta *Focal Statistics* (software *ArcGis 10.5*.)

O mapa de vulnerabilidade final (Figura 5.8) que caracteriza as sub-bacias do rio Riachão e rio Vieira pode ser visto a seguir, juntamente aos mapas temáticos que o determinaram.



**Figura 5.8** – Mapa de vulnerabilidade final dos aquíferos às fontes contaminantes com seus respectivos mapas temáticos que o determinaram.

Os valores do fator de proteção inferiores ou igual a 19 representam as áreas com alta vulnerabilidade, as regiões com vulnerabilidade média apresentam o fator de proteção oscilando de 19 a 25, as regiões com baixa vulnerabilidade apresentam o fator de proteção igual ou superior a 25.

Utilizando a ferramenta *Calculate Geometry* do software *ArcGis 10.5*, foi possível a determinação da área de cobertura para cada classe de vulnerabilidade (Quadro 5.11).

**Quadro 5.11** – Quantificação da área coberta por cada classe de vulnerabilidade

Quantificação das classes do mapa de vulnerabilidade aquífera final		
Fator de proteção	Vulnerabilidade	Área de cobertura
$F \leq 19$	Alta	30,73%
$19 < F < 25$	Moderada	62,86%
$F \geq 25$	Baixa	6,41%



## CAPÍTULO 6

## CONCLUSÃO

---

A revisão multiparamétrica (parâmetros fisiográficos, hidrogeológicos e meteorológicos) da região de estudo (PANM 2019) direcionou o foco deste trabalho para a proteção dos aquíferos cársticos. A aplicação do método EPIK (Doerfliger *et al.* 1998) foi de grande importância para a realidade do cenário estudado por ser uma ferramenta complementar no planejamento do uso e ocupação, buscando proteger os mananciais aquíferos, cumprindo os objetivos iniciais deste trabalho.

Mesmo com algumas adaptações do método EPIK (Doerfliger & Zwahlen 1998), foi possível caracterizar e elaborar os quatro mapas determinantes para o mapa de vulnerabilidade final: epicarste, cobertura de proteção, condições de infiltração e desenvolvimento de rede cárstica.

O mapa de vulnerabilidade à contaminação final dos aquíferos, que foi elaborado durante este trabalho, concretizou-se em uma ferramenta que visa colaborar na gestão, preservação e exploração dos recursos hídricos subterrâneos de forma harmônica ao meio ambiente. O trabalho final não é um produto acabado, podendo ser melhor detalhado à medida que novos dados sejam adicionados ao projeto.

Devido aos coeficientes de ponderação da equação EPIK, os parâmetros epicarste (E) e condições de infiltração (I) apresentaram a maior contribuição no mapa de vulnerabilidade final.

Na sub-bacia do rio Riachão, foi evidenciado uma região de alta vulnerabilidade relacionada diretamente à drenagem hidrográfica, onde o aquífero pelito-carbonático está alojado entre as coberturas do Grupo Areado.

A porção leste da sub-bacia do rio Vieira, região onde o relevo é mais plano sem presença de fraturas, possui a maior densidade urbana da área de estudo (núcleo urbano de Montes Claros), isso faz com que o solo fique mais impermeável devido as coberturas antrópicas causadas pela urbanização, ficando, por teoria, menos vulnerável à contaminação.

O setor oeste da sub-bacia do rio Vieira, mesmo sendo mais abundantemente vegetado pelas florestas estacional decidual montana e semidecidual montana, possui alta vulnerabilidade à contaminação devido aos parâmetros do epicarste (E) e do desenvolvimento da rede cárstica (K), além de apresentar alta densidade de cavidades nesta região.

Devido a vegetação predominante ser o cerrado e ecótonos de transição, facilmente são utilizadas como pastagem. Além da devastação das vegetações primárias devemos ressaltar que problemas como compactação do solo gerando a impermeabilização dos solos são associadas a agropecuária.

Foi quantificado que 30,73% da bacia hidrogeológica estudada corresponde as áreas com alta vulnerabilidade, 62,86% tem vulnerabilidade moderada e apenas 6,41% com baixa vulnerabilidade.

Parte da região de Montes Claros com grande concentração urbana foi caracterizada no mapa final de vulnerabilidade como região de baixa vulnerabilidade. Temos que considerar que a urbanização irá se expandir a partir do perímetro urbano atual e que a projeção do desenvolvimento regional já prevê essa evolução, logo, os impactos antrópicos estarão diretamente localizados ao adensamento urbano, porém podem ser evitados com a adequada execução de obras e gestão de resíduos.

Com esse trabalho, a partir da criação do mapa de fator de proteção (F), foi possível contribuir para uma melhor gestão ambiental das águas subterrâneas, manejo, manutenção e planejamento do uso e ocupação do solo das sub-bacias do rio Riachão e rio Vieira, extrapolando as expectativas iniciais do projeto.

É fundamental compreender cada vez mais sobre os recursos hídricos. A partir do conhecimento dos diversos parâmetros fisiográficos que influenciam uma região, podemos criar políticas públicas direcionados ao uso e ocupação de forma racional e harmônica ao meio ambiente. Como sugestão para próximos trabalhos indicaria análises hidroquímicas para melhor análise de cenários de contaminação, além de aplicação de métodos voltados aos impactos oriundos as atividades agropecuárias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Abreu-Lima S.A. 1997. Fácies, ambiente deposicional e aspectos diagenéticos das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas na região norte de Minas Gerais, Bacia do São Francisco. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 121p.
- Aller L., Bennet T., Lehr, J.H., Petty R.J. 1987. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. U.S. EPA, Report 600/2-85/018.
- Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 7:285-295.
- Alkmim F.F., Brito Neves B.B., Alves J.A.C. 1993. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco - uma revisão. In: Dominguez J.M. & MISI A. (eds). O Cráton do São Francisco. Reunião preparatória do II Simpósio sobre o Cráton do São Francisco, Salvador, SBG/Núcleo BASE/SGM/CNPq. p. 45-62.
- Alkmim F.F., Martins-Neto M.A. 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: PINTO C. P.; MARTINS-NETO M. A. (Ed.). Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais. Sociedade Brasileira de Geologia, Belo Horizonte, p. 9-30.
- BARBOSA O. 1965. Geologia Econômica e Aplicada a uma parte do Planalto Brasileiro (in Simpósio das Formações Eo-Paleozoicas do Brasil). XIX Congresso Brasileiro de Geologia, Sociedade Brasileira de Geologia Rio de Janeiro
- Brasil. Decreto Federal nº 6.640 de 07 de novembro de 2008. Dá nova redação aos arts. 1o, 2o, 3o, 4o e 5o e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto no 99.556, de 1o de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 07 nov. 2008
- Cabral J. Movimento das Águas Subterrâneas. In: Feitosa, F. A. C. & Manoel Filho, J. (coord.). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 2008. p. 35 – 51.
- CANIE - CADASTRO NACIONAL DE INFORMAÇÕES ESPELEOLÓGICAS – CANIE. Disponível em <http://www.icmbio.gov.br/cecav/canie>. Acessado em 30 out 2018.
- Campos J.E.G. & Dardenne M.A. 1997. Origem e evolução tectônica da Bacia Sanfranciscana. *Revista Brasileira de Geociência.*, 27:283-294.
- Carneiro C.D.R., Campos H.C.N. S. 2012. Recursos Hídricos Subterrâneos. In: Hasui, Y., Carneiro, C.D.R., Almeida, F.F.M., Bartorelli, A. Geologia do Brasil. São Paulo, Editora Beca, p. 797-813
- CECAV – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. Disponível em . Acessado em 30 out 2018.
- Chaves M. L. S. C. & Benitez, L. 2006. *Programa Geologia do Brasil. Folha Jequitai, SE.23-X-C-II, escala 1:100.000*. CPRM, parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Chaves M. L. S. C. & Andrade K. W. 2014. *Geologia e recursos minerais da Folha Montes Claros, SE.23-X-A-VI, escala 1:100.000*. CPRM, parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Chaves M. L. S. C. & Andrade K. W. 2014. *Mapa geológico da Folha Coração de Jesus, SE.23-X-A-V, escala 1:100.000*. CODEMIG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Chaves M. L. S. C. & Andrade K. W. 2009. *Mapa geológico da Folha Bocaiúva, SE.23-X-C-III, escala 1:100.000*. CPRM-IGC/UFMG, Belo Horizonte, Relatório Final, 73p.
- CIIAGRO - Centro Integrado de Informações Agrometeorológica. Balanço Hídrico. <http://www.ciiagro.sp.gov.br/Definicoes/BalancoH%C3%ADdrico.htm>. Acessado em 1 fev. 2020.
- Cleary, R. W. Águas subterrâneas. In: Engenharia hidrológica. ABRH, 1989. p. 293-403.
- Costa M.T. & Branco J.J.R. 1961. Introdução. In: Branco J. J.R. (ed.). Roteiro para a excursão Belo Horizonte Brasília. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 14, Belo Horizonte, Anais, 15:1-119.
- Costa W. D. 2008. Uso e gestão de água subterrânea. In: Feitosa F. A. C. & Manoel Filho J. (coord.). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, p. 341-367.

- Dardenne M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, Anais, v.2, p. 507-610.
- DAVIS C.A., 2000, Múltiplas representações em sistemas de informação geográficos. Departamento de Ciência da Computação, UFMG, Belo Horizonte – MG.
- Doerfliger, N. 1996. Advances in Karst Groundwater Protection Strategy using Artificial Tracer Tests Analysis and Multi-Attribute Vulnerability Mapping (EPIK method). Ph.D. thesis Univ. Neuchâtel: 308 p.; Neuchâtel.
- Doerfliger N. & Zwahlen F. 1998. Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK), Practical Guide. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL). Berne.
- Ferreira A.N.P., Lima C.F., Cardoso F.B.F., Kettelhut J.T. 2007. Águas Subterrâneas: Um recurso a ser conhecido e protegido. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recurso Hídricos e Ambiente urbano Disponível em [http://www.mma.gov.br/estruturas/167/\\_publicacao/167\\_publicacao28012009044356.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/167/_publicacao/167_publicacao28012009044356.pdf). Acessado em 28 out 2018.
- Feitosa F.A.C. & Filho, J.M. 2008. Ocorrência das águas subterrâneas. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, p. 13–33.
- Ford D.C. & Williams P.W. 2007. Karst geomorphology and hydrology: Boston, Unwin Hyman, 601 p.
- Foster S.S.D. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Duijvenbooden W van, Waegeningh HG van (eds) Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague. Proceedings and information, **38**: 69–86.
- Foster S. S. D. & Hirata R. C. A. 1998. Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data. WHO-PAHO/HPE-CEPIS, Technical Manual, Lima, Peru. 81 p.
- Foster S.; Hirata R.; Gomes D.; D’Elia M., Paris M. Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies. World Bank, GWMATE. Washington, 101 p., 2002.
- Guiguer N. & Kohnke M. W. 2002. Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Santa Catarina, 13 p.
- Goldscheider N. 2002. Hydrogeology and Vulnerability of Karst Systems – Examples from the Northern Alps and Swabian Alp. – PhD thesis, University of Karlsruhe, Karlsruhe, 229 p.
- Goldscheider N. & Drew D. 2007. Methods in karst hydrology. Taylor & Francis Group, London, UK, 279 p.
- Iglesias M. & Uhlein A. 2008. Estratigrafia do Grupo Bambuí na Serra do Jaíba, norte de Minas Gerais. Revista Geonomos, **16**: 21-27.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Mapa de climas do Brasil. Rio de Janeiro 2002. Escala 1:5.000.000. Disponível em: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/climatologia/mapas/brasil/clima.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/clima.pdf). Acessado em 12 fev 2020.
- Katta B., Al-Fares W., Al-Charideh A. R. 2010. Groundwater vulnerability assessment for the Banyas Catchment of the Syrian coastal area using GIS and the RISKE method. Journal of Environmental Management. Elsevier. **91**:1103–1110
- Kuchenbecker M., Batista G. A. P., Pereira A. S., Pacheco F. E. R. C., Magalhães M. G., Costa R. D. 2014. *Mapa geológico da Folha Brasília de Minas, SE.23-Y-D-IV, escala 1:100.000*. CODEMIG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Le Grand H. 1964. System for evaluating contamination potential for some waste sites. American Water Work Association Journal. **56**: 959-974
- Leite M.E., Santos I.S., Almeida J.W.L. 2011. Mudança de Uso do Solo na Bacia do Rio Vieira, Montes Claros, Minas Gerais. Revista Brasileira de Geografia Física, **4**:779-792.
- Lenhare, B.D. 2014. Vulnerabilidade do carste nas cabeceiras dos Rios das Almas, São José de Guapiara (Planalto de Guapiara) e do Rio Pilões (Serra de Paranaipacaba), SP, Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo, São Paulo, **33**:686-700.
- Macêdo J.A.B. 2002. Introdução a Química Ambiental; Química & Meio Ambiente & Sociedade 1ª ed. Juiz de Fora: Jorge Macedo, 487p.

- Mourão M.A.A., Cruz W. B., Gonçalves R.L.F. 2001. Caracterização Hidrogeológica da Porção Mineira da Bacia do São Francisco. In: Pinto C. P. & Martins-Neto M.A. 2001. Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Minerais. SBG-MG, Belo Horizonte. p. 327-350.
- Novo E.M.L.M & Ponzoni F. J. 2001. Introdução ao Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de pesquisas Espaciais, Divisão de Sensoriamento Remoto. Disponível em < [http://https://www.dpi.inpe.br/Miguel/AlunosPG/Jarvis/SR\\_DPI7.pdf](http://https://www.dpi.inpe.br/Miguel/AlunosPG/Jarvis/SR_DPI7.pdf)> acesso em 03/10/2019.
- Paixão M.M.O.M. 2006. Programa de Monitoramento de Águas Subterrâneas das Sub-bacias dos Rios Verde Grande, Riachão e Jequitai. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Gerenciamento Municipal em Recursos Hídricos, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 54 p.
- Pereira D. L., Galvão P., Lucon T., Fujaco M.A.G. 2019 Adapting the EPIK method to Brazilian Hydro(geo)logical context of the São Miguel watershed to assess karstic aquifer vulnerability to contamination. *Journal of South American Earth Sciences*, **90**:191-203.
- PANM. 2019. Projeto Águas do Norte de Minas: Estudo da Disponibilidade Hídrica Subterrânea do Norte de Minas Gerais, CPRM – Belo Horizonte – MG.
- Ribeiro D.M., Nascimento S. A. M., Garcia A. J. V. 2016. Vulnerabilidade dos aquíferos cársticos Sapucari e Maruim, bacia sedimentar de Sergipe-Alagoas. *Águas Subterrâneas*, **1**, 30(3), p. 375-393
- SIAGAS – SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout>. Acesso em: 12 nov. 2018.
- Teixeira W., Taioli F., Fairchild T. R., Toledo C. 2000. Decifrando a Terra: recursos hídricos. São Paulo, Oficina de Textos, 557p.
- UAF – ALASKA SATELLITE FACILITY. Disponível em <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/about-palsar>. Acessado em 28 out 2018.
- UFV - CETEC - UFLA - FEAM. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49p. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>> Acessado em: 13 de out. 2019.
- Vrba J. & Zaporozec A. 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Contributions to Hydrogeology, 16, Verlag Heiz Heise Publication, Hannover, 131 p.
- Walker P. A. 1990. Modelling wildlife distributions using a geographic information system: Kangaroos in relation to climate. *Journal of Biogeography*, **17**:279-289.
- Zalán P.V. 2004. Evolução fanerozóica das bacias sedimentares brasileiras. In: Mantesso-Neto V.; Bartorelli A.; Carneiro C. D. R.; Brito Neves B. B. (Ed.). Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca. p. 595-612.