



UFOP
Universidade Federal
de Ouro Preto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



ESCOLA DE MINAS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DAS CONDICIONANTES HIDROGEOLÓGICAS NO
COMPLEXO METAMÓRFICO BONFIM, MINAS GERAIS

Bruno César Barbosa

MONOGRAFIA nº 369

Ouro Preto, agosto de 2020

**ANÁLISE DAS CONDICIONANTES HIDROGEOLÓGICAS
NO COMPLEXO METAMÓRFICO BONFIM, MINAS GERAIS**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

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

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Ms. Edson Tazava

MONOGRAFIA

Nº 369

**ANÁLISE DAS CONDICIONANTES HIDROGEOLÓGICAS NO
COMPLEXO METAMÓRFICO BONFIM, MINAS GERAIS**

Bruno César Barbosa

Orientador

Ms. Ramon Messias Martins

Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2020/1.

OURO PRETO

2020

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

Direitos de tradução e reprodução reservados.

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

Revisão geral: Bruno César Barbosa

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

B238a Barbosa, Bruno Cesar.

Análise das condicionantes hidrogeológicas no Complexo Metamórfico Bonfim, Minas Gerais. [manuscrito] / Bruno Cesar Barbosa. - 2020.
88 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Me. Ramon Messias Martins.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Hidrogeologia. 2. Aquíferos. 3. Processo decisório - Método AHP. I. Martins, Ramon Messias. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 556.33

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

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Análise das Condicionantes Hidrogeológicas no Complexo Metamórfico Bonfim, Minas Gerais.


AUTOR: BRUNO CÉSAR BARBOSA


ORIENTADOR: Ramon Messias Martins

Aprovada em: 19 de Agosto de 2020

BANCA EXAMINADORA:

Prof. MSc. Ramon Messias Martins  DEGEO/UFOP

Profa. MSc. Estefânia Fernandes dos Santos  DEGEO/UFOP

Profa. Dra. Adivane Terezinha Costa  DEGEO/UFOP

Ouro Preto, 19/08/2020

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por conceder a oportunidade e privilégio na busca dos objetivos!

Agradeço aos meus pais e irmãos, por me apoiarem incondicionalmente e transformado meu sonho em realidade. Aos meus sobrinhos e sobrinhas por serem fonte de alegrias. E a todos os meus familiares!

À Stéphanie por me acompanhar e incentivar em todos os momentos.

Ao Ramon Messias pela orientação e a Estefânia pela ajuda.

Aos amigos conquistados!

A Escola de Minas, Fundação Gorceix e SICEG, pelo ensino e ajuda. À geologia por criar um senso crítico, mostrar o quanto somos pequenos e como devemos respeitar a natureza.

A todos do Grupo JMendes, em especial a equipe de geologia, que contribuíram de alguma forma para o meu crescimento pessoal e profissional.

À República Hospício-LPS pela chance de “fazer parte desta história um pouco”.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	X
SUMÁRIO	xii
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xvii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xxi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 JUSTIFICATIVA	2
1.4 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 POSICIONAMENTO GEOLÓGICO E CONTEXTO GEOTECTÔNICO	5
2.2 QUADRO ESTRATIGRÁFICO	5
2.2.1 Embasamento.....	6
2.2.2 Supergrupo Rio das Velhas (SGRV).....	7
2.2.3 Supergrupo Minas (SGM)	7
2.2.4 Grupo Itacolomi	8
2.2.5 Coberturas Cenozoicas	8
2.3 GEOLOGIA ESTRUTURAL DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	8
2.4 GEOLOGIA LOCAL DO COMPLEXO BONFIM	9
2.5 HIDROGEOLOGIA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	10
2.5.1 Sistema Aquífero Granito-Gnáissico.....	11
2.5.2 Sistema Aquífero Xistoso.....	11
2.5.3 Sistema Aquífero Formação Ferrífera	11
2.5.4 Sistema Aquífero Quartzítico	11

2.5.5	Sistema Aquífero Itabirítico.....	12
2.5.6	Sistema Aquífero Carbonático	12
2.5.7	Sistema Aquífero Quartzítico Cercadinho.....	13
2.5.8	Sistema Aquífero Granular	13
2.5.9	Aquitardos.....	13
2.6	HIDROGEOLOGIA DO COMPLEXO BONFIM.....	14
2.7	CONCEITOS DE HIDROGEOLOGIA.....	14
2.7.1	Circulação da água subterrânea em meios fraturados	15
2.7.2	Produtividade no meio fraturado e capacidade específica.....	18
2.8	GEOPROCESSAMENTO APLICADO ÀS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	20
2.9	PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO (AHP)	22
3	MATÉRIAS E MÉTODOS.....	26
3.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
3.2	BANCO DE DADOS HIDROGEOLÓGICO	26
3.3	AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DE RADAR	27
3.4	PRODUÇÃO CARTOGRÁFICA	27
3.5	INTEGRAÇÃO DOS MAPAS	29
3.6	VALIDAÇÃO DOS DADOS.....	30
4	RESULTADOS.....	32
4.1	DISTRIBUIÇÃO DOS POÇOS	32
4.2	MAPA HIPSOMÉTRICO.....	33
4.3	MAPA DE DECLIVIDADE	34
4.4	MAPA GEOLÓGICO.....	35
4.5	DENSIDADE DE LINEAMENTOS.....	37
4.6	MAPA DE SOLOS	38
4.7	MAPA DE PRECIPITAÇÃO.....	40

4.8	MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DA TERRA.....	41
4.9	PROFUNDIDADE DOS POÇOS	42
4.10	MAPA DO NÍVEL ESTÁTICO.....	42
4.11	MAPA DO NÍVEL DINÂMICO	43
4.12	MAPA DA CAPACIDADE ESPECÍFICA E TRANSMISSIVIDADE ESTIMADA 44	
4.13	MAPA DE FAVORABILIDADE	48
5	DISCUSSÃO.....	52
6	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
	ANEXOS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Localização e acesso da área estudada. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.....	3
Figura 2.1 - Posicionamento do Quadrilátero Ferrífero em relação ao cráton São Francisco, com destaque para seus compartimentos e faixas móveis. Extraído de Farina <i>et al.</i> 2016.....	5
Figura 2.2 - Coluna estratigráfica para o Quadrilátero Ferrífero. Abreviações: RVI e RVII são eventos Rio das Velhas I e II, SB é o magmatismo de Santa Barbara evento. Extraído de Farina et al. (2016).....	6
Figura 2.3 - Modos de propagação de fraturas por extensão perpendicular à superfície da fratura (I) e por deslizamento paralelo à superfície de fratura, podendo ser paralelo (II) ou perpendicular (III) à frente de propagação. Adaptado de Fernandes (2008).....	16
Figura 2.4 - Regimes tectônicos e posicionamento espacial de fraturas extensionais de maior abertura (linha tracejada) e de cisalhamento (linha contínua e movimento apontado por flechas): (i) regime extensional, (ii) compressivo e (iii) transcorrente (Adaptado de Ramsay & Huber 1987 apud Fernandes 2008).....	16
Figura 2.5 – Correlação entre transmissividade e capacidade específica de poços na região de Jundiá (Bertachini 1987, modificado por Neves 2005).	20
Figura 2.5 – Estrutura hierárquica do método AHP (Modificado de Saaty 1987).....	22
Figura 3.1 - Exemplo de um poço na cidade de Moeda.....	27
Figura 1.2 - Fluxograma da metodologia adotada.....	28
Figura 4.1 – Distribuição dos poços nos municípios. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.....	332
Figura 4.2 - Mapa hipsométrico da área de estudo. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.....	333
Figura 4.3 - Mapa de Declividade gerado a partir do modelo digital de elevação ALOS PALSAR (12 metros) da área de estudo. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.	334
Figura 4.4 - Mapa Geológico com litotipos e principais estruturas regionais (CPRM 2013).	336
Figura 4.5 - Gráfico comparativo das médias e medianas dos poços de cada litologia e o número de poços encontrados em cada litotipo.....	336

Figura 1.6 – Mapa de densidade de lineamentos. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.....	37
Figura 1.7 - Diagramas de roseta dos lineamentos. Elaborado pelo autor.....	38
Figura 1.8 - Mapa de solos (UFV 2010).....	39
Figura 1.9 - Gráfico comparativo das médias e medianas dos poços totais e utilizados para cada solo e o número de poços encontrados em cada tipo de solo.....	39
Figura 4.10 - Mapa de Precipitação. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.	40
Figura 4.11 - Mapa de Uso e Cobertura da Terra (MapBiomias 2021).	41
Figura 4.12 – Mapa com o nível estático. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.	43
Figura 4.13 – Mapa com o nível dinâmico. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.....	44
Figura 4.14 – Mapa com a capacidade específica. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.....	45
Figura 4.15 - Curvas de frequência acumulada da capacidade específica em cada litologia..	46
Figura 4.16 - Curvas de frequência acumulada de capacidade específica em cada tipo de solo.	47
Figura 4.17 – Gráfico de correlação entre a profundidade e capacidade específica.....	47
Figura 4.18 - Gráfico de correlação entre o nível estático e capacidade específica.	48
Figura 4.19 - Gráfico de correlação entre o nível dinâmico e capacidade específica.....	48
Figura 1.20 – Mapa de favorabilidade. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.....	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Unidades hidrogeológicas apresentadas por Beato <i>et al.</i> (2005).....	10
Tabela 2.2 - Fatores que controlam o fluxo de água subterrânea: seu alcance e suas limitações (Fernandes 2008).	17
Tabela 2.3 - Método proposto para identificação de situações mais propícias para: locação de poços e de determinação de caminhos preferenciais de circulação de água subterrânea. Retirado de Fernandes (2008).....	18
Tabela 2.4 - Produtividade dos aquíferos a partir da capacidade específica, segundo Diniz et al. (2014).	19
Tabela 2.5 – Exemplo de matriz de comparação (Saaty 1987, 1990).....	22
Tabela 2.6 – Escala de importância relativa de (Saaty 2005).....	23
Tabela 2.7 – Exemplo de matriz de comparação normalizada (Saaty 1987, 1990).....	23
Tabela 2.8 – Cálculo aproximado do vetor de Eigen (λ) (Vargas 2010).....	23
Tabela 2.9 – Índice de consistência aleatório “RI” (Saaty 2005).....	24
Tabela 3.1 - Fontes do Banco de Dados.....	26
Tabela 3.1 – Reclassificação das variáveis e suas respectivas potencialidades hidrogeológicas	30
Tabela 4.1 - Classificação do relevo (Ramalho-Filho & Beek 1995).....	35
Tabela 1.2 – Estações pluviométricas.....	41
Tabela 1.3 – Dados estatísticos da profundidade dos poços.....	42
Tabela 1.4 – Dados estatísticos do nível estático dos poços.....	42
Tabela 1.5 – Dados estatísticos do nível dinâmico dos poços.....	43
Tabela 1.6 – Dados estatísticos da capacidade específica dos poços.....	45
Tabela 1.7 – Dados estatísticos da transmissividade estimada a partir da capacidade específica dos poços.....	45

Resumo

O estudo dos aquíferos fraturados é dificultado pelas suas características intrínsecas de heterogeneidade, anisotropia elevada, além das produtividades, em geral, serem baixas. A necessidade de suprimento hídrico e a vasta distribuição deste tipo de aquífero no território nacional, tem despertado interesse no entendimento dos parâmetros hidráulicos e potencial hídrico em diversos trabalhos. O Complexo Bonfim foi alvo do presente trabalho que envolveu uma área aproximada de 1291 km². Foram extraídas do banco de dados hidrogeológico informações da média, mediana, mínimo, máximo, desvio padrão e moda dos parâmetros hidráulicos. Com exceção da profundidade, foram interpolados com aplicação das técnicas do GIS (*Geographic Information System*) a capacidade específica calculada, nível estático e nível dinâmico pelo método IDW (*Inverse Distance Weighted*) relacionando a geologia e morfologia. Poços locados em níveis topográficos até 810 m e com declividade abaixo de 13% apresentaram maior produtividade. A curva de frequência acumulada das litologias definiu o gnaiss com maior potencial se comparados aos granitos. Gráficos dos parâmetros hidráulicos da capacidade específica não identificaram correlações da redução da produtividade com o aumento na profundidade ou nível estático, somente o nível dinâmico apresentou uma pequena tendência. O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) foi utilizado na geração do mapa de favorabilidade a partir da integração de seis mapas (declividade, uso e ocupação da Terra, densidade de lineamentos, pluviosidade, geológico e solo). O mapa de uso e ocupação da Terra e declividade determinaram que regiões mais planas ou com presença de vegetação sejam classificadas com média a alta favorabilidade. A validação foi feita visualmente com a sobreposição dos poços e as regiões que eles ocupavam no produto final.

Palavras chave: Hidrogeologia; Complexo Bonfim; AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

Abstract

The study of fractured aquifers is hampered by their intrinsic characteristics of heterogeneity, high anisotropy, in addition to generally low productivity. The need for water supply and the wide distribution of this type of aquifer in the national territory has aroused interest in the understanding of hydraulic parameters and water potential in several works. The Bonfim Complex was the target of this work, which involves an approximate area of 1291 km². Information on the mean, median, minimum, maximum, standard deviation, and mode of hydraulic parameters were extracted from the hydrogeological database. Except for depth, the following parameters were interpolated with the application of GIS (Geographic Information System) techniques: the specific capacity, static level, and dynamic level by IDW (Inverse Distance Weighted) relating geology and morphology. Wells located at topographic levels up to 810 m and with a slope below 20% presented greater productivity. The accumulated frequency curve of the lithologies defined the gneiss with the greatest potential when compared to the granites. Graphs of hydraulic parameters of specific capacity did not identify correlations of productivity reduction with increase in depth or static level, only the dynamic level showed a small trend. The AHP (Analytic Hierarchy Process) method was used to generate the favorability map from the integration of six maps (slope, land use, and occupation, lineament density, precipitation, geological, and soil). The land use and occupation and slope map determined that the flattest regions or with the presence of vegetation are classified with medium to high favorability. Validation was done visually with the overlap of the wells and the regions they occupied in the final product.

Key words: Bonfim Complex; Hydrogeology; AHP (Analytic Hierarchy Process).

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Menos que 3% da água doce disponível encontra-se na superfície, a capacidade de provimento das demandas antrópicas é potencialmente elevada com o aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos (Feitosa *et al* 2000).

A partir da década de setenta e em franco crescimento o uso dos aquíferos se intensificou (Rebouças *et al.* 2006). A velocidade da água subterrânea é bem menor se comparada ao movimento na superfície. De tal modo, conhecer ferramentas que reduzam as incertezas durante o estudo das águas subterrâneas neste contexto torna-se fundamental do ponto de vista econômico, ambiental e social. Em relação a porosidade os aquíferos podem ser classificados em granulares, cársticos ou fraturados, este último foco do estudo, anisotrópico com fluxo de água condicionado a quantidade, abertura e intercomunicação das (fraturas, diáclases, juntas). Os critérios utilizados em escala regional são a elaboração de mapas de lineamentos, geológico, solo, declividade, pluviosidade, uso e cobertura da Terra, além da integração com dados da vazão ou vazão específica disponíveis na área, fatores considerados influentes sobre as produções (Feitosa *et al* 2000, Fernandes 2008).

Este trabalho apresenta o estudo na porção ocidental do Quadrilátero Ferrífero no contexto geológico de rochas granito-gnáissicas do Complexo Bonfim, com enfoque nos aquíferos do tipo fraturados. Técnicas de geoprocessamento envolveram o GIS (*Geographic Information System*) para estabelecer relações entre as condicionantes geológicas e os parâmetros hidráulicos dos poços inseridos na área. Mapas da densidade de lineamentos, geologia, tipos de solos, hipsométrico, declividade, buscaram representar características morfoestruturais e geológicas. Por meio de gráficos, correlações da capacidade específica calculada foram feitas com a profundidade, nível estático e nível dinâmico, alguns destes parâmetros hidráulicos foram representados em mapas específicos pelo método interpolador *Inverse Distance Weighted (IDW)*.

A integração de seis mapas (declividade, uso e cobertura da Terra, densidade de lineamentos, pluviosidade, geológico e solo) permitiu a geração do mapa de favorabilidade que utilizou o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) criado por (Saaty 1987) para tomada de decisões multicritérios. Foram adotadas alterações propostas por (Vargas 2010) e já utilizadas por (Brito 2018) no seu estudo que envolveu a hidrogeologia das rochas do embasamento no Quadrilátero Ferrífero.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal é a elaboração de um mapa de favorabilidade para água subterrânea no aquífero fraturado nas rochas do Complexo Bonfim por meio do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

Os objetivos específicos foram os seguintes:

- Investigação preliminar da região com auxílio de produtos disponíveis do sensoriamento remoto;
- Reconhecer condicionantes geológicas que permitam a circulação de água em aquíferos fraturados com auxílio da cartografia digital na elaboração de mapas temáticos (hipsométrico, declividade, geológico, solo, densidade de lineamentos);
- Geração de mapas por meio do interpolador *Inverse Distance Weighted* (IDW) com os parâmetros hidráulicos da capacidade específica, nível dinâmico e nível estático;
- Avaliação por meio de gráficos a correlação da capacidade específica calculada com outros parâmetros hidráulicos (profundidade, nível dinâmico e nível estático);

1.3 JUSTIFICATIVA

Diante do progressivo uso e ocupação do solo (loteamentos, indústrias, desmatamento, compactação e impermeabilização do solo em detrimento da infiltração) e conseqüentemente aumento na demanda por recursos hídricos, para suprimento humano e uso industrial (Mourão et al. 2006), a exploração dos aquíferos fraturados torna-se uma alternativa viável. Trata-se de contribuir com a carência de estudos que envolvam aplicação de metodologias que permitam gerar mapas de favorabilidade hidrogeológica e que possam investigar parâmetros hidráulicos de poços cadastrados em banco de dados públicos que interfiram na circulação da água subterrânea no Complexo Bonfim.

1.4 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área de estudo é limitada pelos paralelos 20°06' e 20°29' de latitude sul e pelos meridianos 43°56' e 44°24' de longitude oeste e compreende, em uma superfície de cerca de 1291 km², que abrange grande parte dos municípios Belo Vale, Bonfim, Brumadinho, Crucilândia, Moeda, Piedade dos Gerais e Rio Manso, porção centro sudeste do estado de Minas Gerais (Figura 1.1). A região dista-se aproximadamente 100 Km do município de Ouro Preto - MG. A partir da rodovia BR-356 segue-se em direção à Belo Horizonte até o trevo entre as

rodovias BR-356 e BR-040 em que se adota o sentido Rio de Janeiro, já na rodovia BR-040 é possível acessar as localidades inseridas na área de estudo por estradas secundárias.

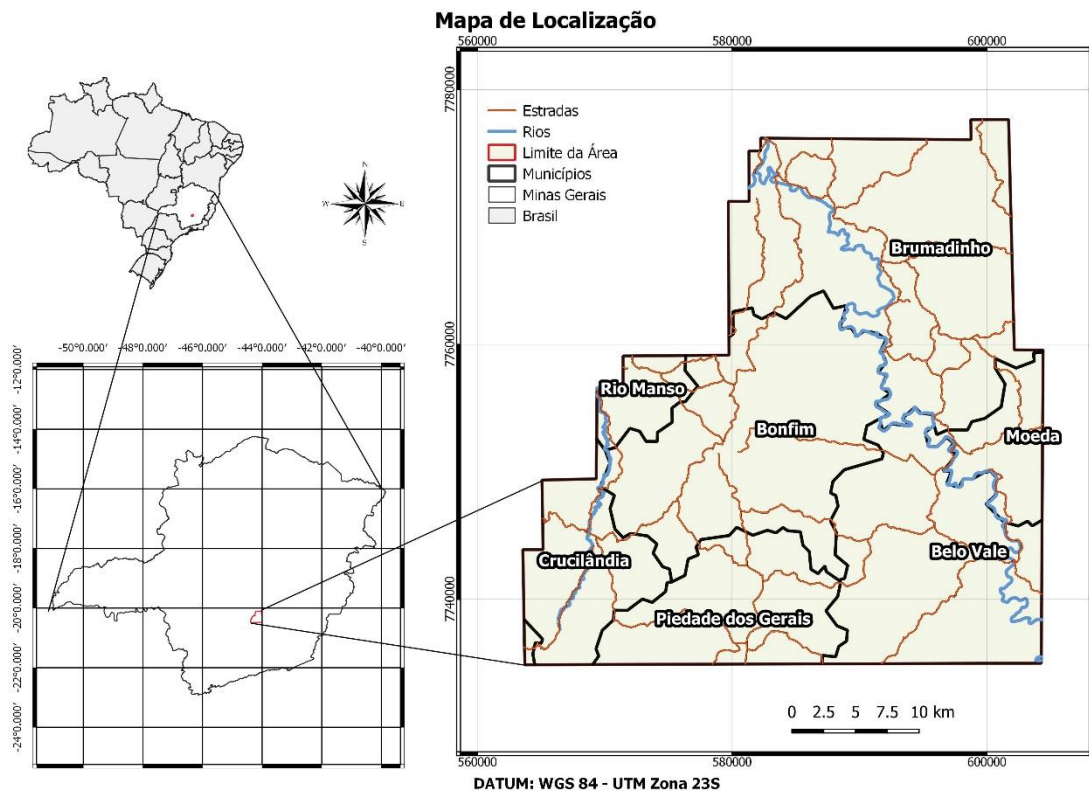


Figura 1.1 - Localização e acesso da área estudada. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 POSICIONAMENTO GEOLÓGICO E CONTEXTO GEOTECTÔNICO

Segundo Almeida (1977) o cráton São Francisco está inserido na região leste do Brasil e compreende uma série de faixas móveis neoproterozóicas formadas durante o evento Brasiliano: Sergipana, Riacho do Pontal, Rio Preto, Brasília e Araçuai-Ribeira.

A área investigada situa-se na região meridional do cráton São Francisco, conhecida como Quadrilátero Ferrífero (QF), onde Alkmim & Marshak (1998) dividem em cinco unidades litoestratigráficas, a saber: Embasamento Cristalino Arqueano, Supergrupo Rio das Velhas (representando uma clássica sequência arqueana do tipo *greenstone*), Supergrupo Minas (metassedimentos paleo e mesoproterozóicos), intrusivas pós-Minas e o Grupo Itacolomi (metapelitos, metaquartzitos e metaconglomerados) (Figura 2.1).

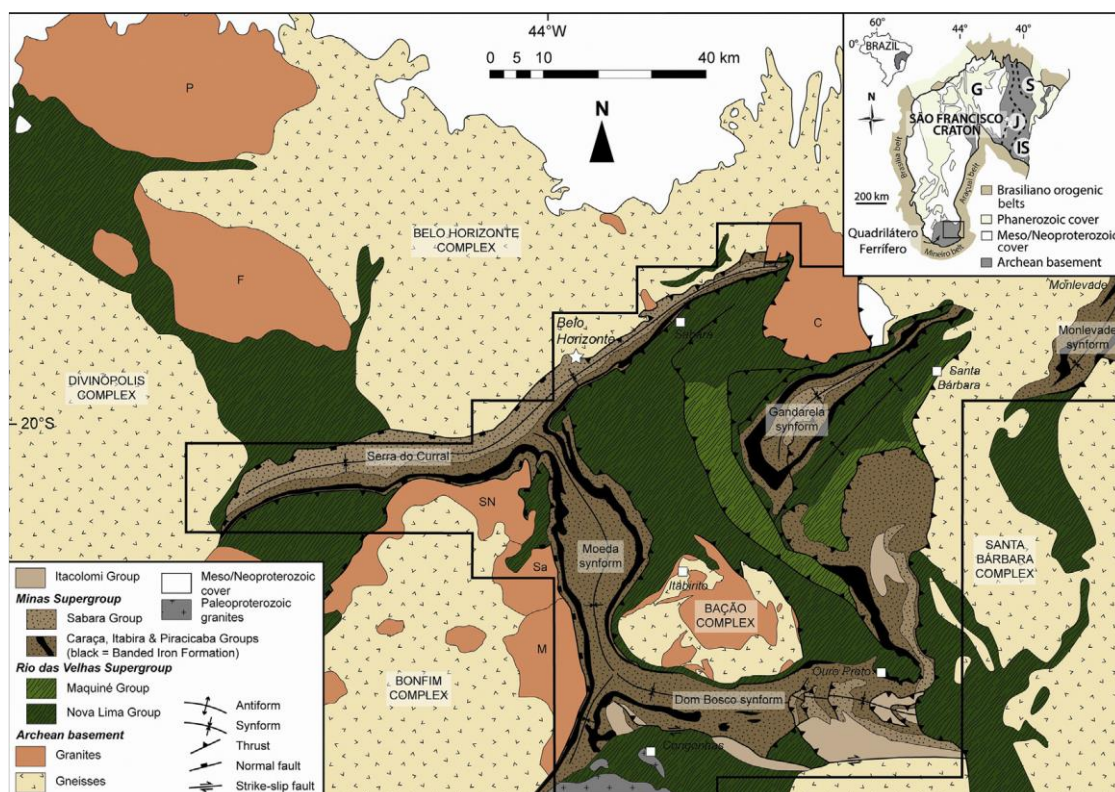


Figura 2.1- Posicionamento do Quadrilátero Ferrífero em relação ao cráton São Francisco, com destaque para seus compartimentos e faixas móveis. Extraído de Farina *et al.* 2016.

2.2 QUADRO ESTRATIGRÁFICO

Dorr II (1969) compilou os mapeamentos realizados entre 1946 e 1962 pela *United States Geological Survey* (USGS) e o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e

propôs uma coluna estratigráfica (Figura 2.2) que vem sendo revisada por diversos autores (Chemale Jr *et al.* 1991, Carneiro 1992, Endo 1997, Alkmim & Marshak 1998, Lobato *et al.* 2005, Farina *et al.* 2016) são os principais trabalhos consultados.

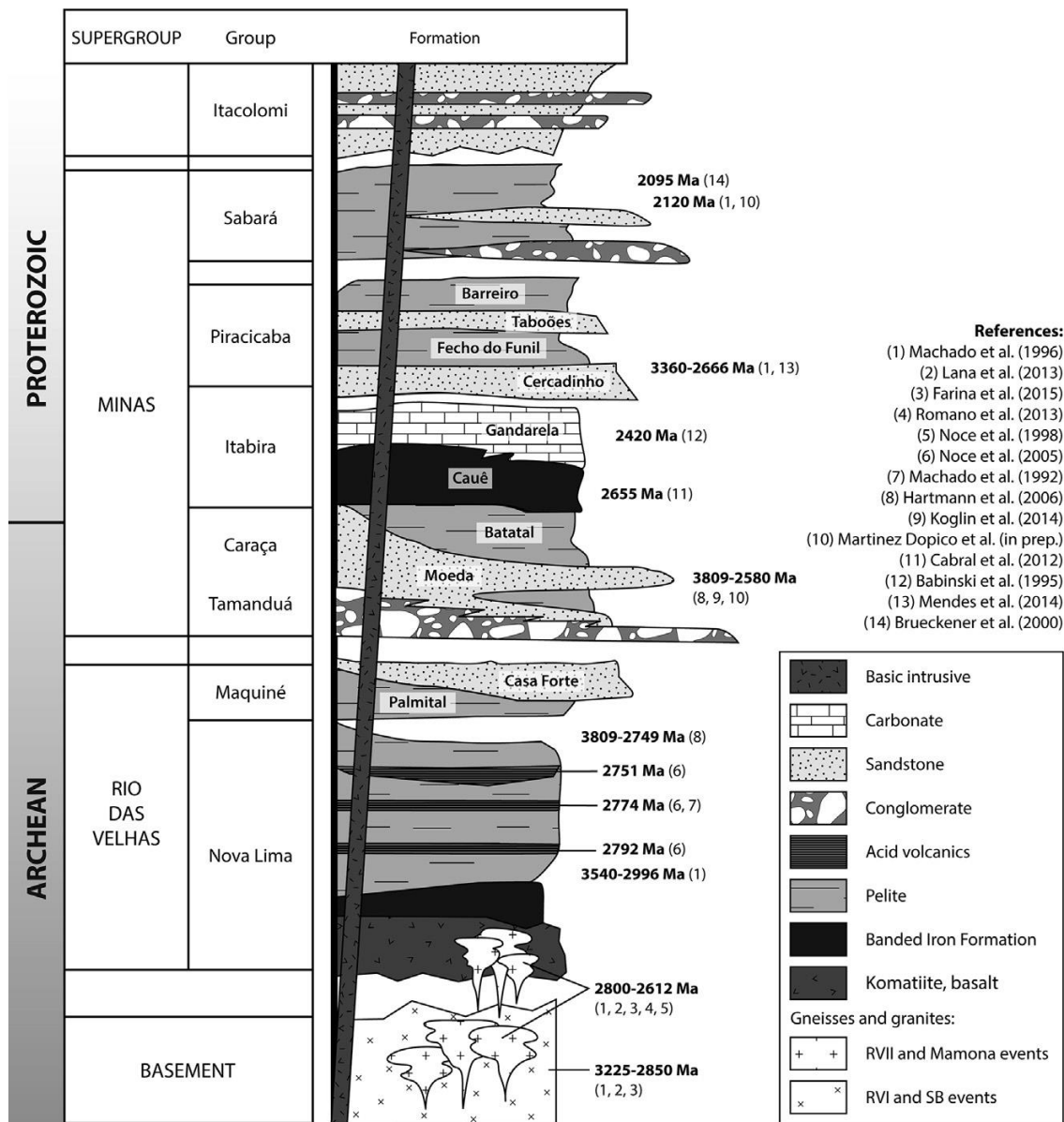


Figura 2.2 - Coluna estratigráfica para o Quadrilátero Ferrífero. Abreviações: RVI e RVII são eventos Rio das Velhas I e II, SB é o magmatismo de Santa Barbara evento. Extraído de Farina *et al.* (2016).

2.2.1 Embasamento

São rochas arqueanas do embasamento de composição granito-gnáissicas e migmatitos em forma de dômios e estão circundados por unidades dos supergrupos Rio das Velhas e Minas, em geral, com contatos de natureza tectônica (Noce 1995, Endo 1997, Alkmim & Marshak 1998). O Complexo Bonfim, predominantemente, foi formado (2.78 – 2.70 Ga) durante a Orogênese Rio das Velhas (Carneiro 1992). Segundo Noce (1995) o Complexo Belo Horizonte é constituído por rochas com coloração cinza claro, bandamento composicional, feições de

migmatização, alternância de bandas leucocráticas e escuras ricas em biotita. Segundo Chemale Jr *et al.* (1991) o Complexo Bação com forma grosseiramente circular é constituída por gnaisses polideformados, migmatitos estromáticos e agmáticos, corpos de anfibolitos, granitoides e pegmatitos, já o Complexo Caeté possui forma arredondada a oeste da serra das Cambotas e ao lado do flanco noroeste do sinclinal Gandarela, constituído por rochas graníticas e gnáissicas.

2.2.2 Supergrupo Rio das Velhas (SGRV)

O Supergrupo Rio das Velhas é subdividido em dois grupos: Nova Lima e Maquiné da base para o topo. Tratam-se de rochas metavulcânicas e metassedimentares arqueanas do tipo *greenstone belt* separados por uma discordância erosiva (Romano *et al.* 2017). O Grupo Nova Lima é formado por lavas máficas-ultramáficas intercaladas com intrusões menores de gabro, anortosito, peridotito, formações ferríferas bandadas, *cherts*, sedimentos químicos carbonáticos e rochas vulcanoclásticas félsicas. Encerrando a sequência arenitos com estrutura espinha de peixe com contato gradacional e localmente por falhas. O Grupo Maquiné é dividido em duas formações: Palmital e Casa Forte, com espessura de 2000 metros de conglomerados e arenitos em contato gradacional.

2.2.3 Supergrupo Minas (SGM)

Trata-se de uma sequência metassedimentar clástica e química subdividida nos grupos (Tamanduá, Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará) que estão em discordância erosiva e contatos tectônicos com as rochas do SGRV e marcam o contorno do Quadrilátero Ferrífero (Dorr 1969, Chemale Jr. *et al.* 1991, Endo 1997, Alkmim & Marshak 1998).

A base da sequência é representada pelo Grupo Tamanduá (quartzitos, xistos quartzosos e metargilosos, itabiritos filíticos e dolomíticos) separados por uma discordância erosiva do Grupo Caraça que, por sua vez, é dividido em duas formações; Formação Moeda (metaconglomerados, quartzitos e filitos) com espessura máxima aparente de 1000 m e Formação Batatal com coloração prateada (filitos, filitos grafitosos, metacherts e itabiritos). O Grupo Itabira foi dividido em duas formações; Cauê (itabirito quartzito, dolomítico e anfibolítico, e lentes de filito) com espessura de 400 m e contato gradacional com a Formação Batatal, já a Formação Gandarela (dolomiticos, calcários, filito dolomítico, itabirito dolomítico) com espessura de 600 m. O Grupo Piracicaba com espessura de 1300 m é separado do Grupo Itabira por uma discordância erosiva e composto por quatro formações; Cercadinho (quartzito, quartzito ferruginoso, filito), Fecho do Funil (filito, dolomito), Taboões (quartzito) e Barreiro (filito, filito carbonoso). O Grupo Sabará (metapelitos, metagrauvaca, metaconglomerados líticos, metadiamicritos) possui espessura superior a 3000 m (Dorr 1969, Alkmim & Marshak 1998, Farina *et al.* 2016, Romano *et al.* 2017).

2.2.4 Grupo Itacolomi

O Grupo Itacolomi (metaquartzito, metaconglomerado polimítico e metapelito) é a sequência mais jovem do Quadrilátero Ferrífero com espessura de até 2000 m e está discordante do Grupo Sabará (Dorr 1969, Alkmim & Marshak 1998, Farina et al. 2016, Romano et al. 2017).

2.2.5 Coberturas Cenozoicas

Depósitos comuns distribuídos no Quadrilátero Ferrífero representados desde o Paleógeno até o Quaternário com elúvio-colúviais, canga, sedimentos lacustres, sedimentos lacustres-fluviais, argila laterizada, bauxita e ao longo dos rios cascalho, areia, argila (Lobato *et al.* 2005).

2.3 GEOLOGIA ESTRUTURAL DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Fonseca (1990) destaca grandes dobramentos do supergrupo Minas: a oeste, sinclinal Moeda, com traço axial N-S: a sul, estendendo-se de sudoeste para sudeste até a região de Ouro Preto e Mariana, o sinclinal Dom Bosco: a sudeste, o sinclinal Santa Rita: na porção centro – leste, os sinclinais Gandarela e Ouro Fino e na porção norte – noroeste, estendendo-se na direção nordeste, o homoclinal da Serra do Curral.

Para facilitar a compressão Chemale Jr *et al.* (1991) divide o Quadrilátero Ferrífero considerando o *trend* geral das grandes estruturas: o sinclinal Moeda com direção N-S conecta-se a norte com a Serra do Curral, a sul une-se com o sinclinal Dom Bosco onde no extremo sul é truncado pela falha do Engenho, o sinclinal Dom Bosco com eixo E-W no extremo oeste está conectado com o sinclinal Moeda e cortado por uma série de cavalgamentos com traços arqueados com direção aproximada N-S. O Complexo Bação com geometria grosseiramente circular possui bandamento N-S e mergulhos altos, além de zonas de cisalhamento nessa mesma direção. Na zona de contato, bordejando o domo verifica-se uma foliação milonítica com mergulhos (65-90°). A Serra do Curral de direção NE-SW e extensão aproximada de 100 Km, pode ser dividida em dois segmentos, o primeiro de direção N70°E desde a junção com flanco oeste do sinclinal Moeda até o seu extremo sudoeste, o segundo segmento N45°E abrangendo desde a junção com o sinclinal Moeda até o seu extremo nordeste. A falha do Engenho possui direção preferencial E-W desde a serra do Itacolomi até oeste do rio Camapuã e a partir desse rio inflete para SW.

Endo & Nalini Jr (1991) descrevem uma zona de cisalhamento dúctil com direção N-S no contato do sinclinal Moeda com o Complexo Metamórfico Bonfim. Endo (1997) caracteriza as rochas do Complexo Bonfim como polideformadas e possuem contatos tectônicos, a trama

predominante como S-tectonito com mergulhos elevados e direção N-S, no centro do complexo, e próximos aos metassedimentos a direção descreve uma trajetória anelar. Indicadores cinemáticos, como estruturas S/C, dobras intrafoliais assimétricas em “S” e “Z”, porfiroclastos de feldspato com estruturas assimétricas e estruturas extensionais tipo pull-apart, conferem a natureza destes movimentos. Em resumo seis conjuntos de estruturas foram desenvolvidas em regimes cinemáticos distintos e condições de intensidades de deformação decrescentes. A mais antiga trata-se da trama milonítica nos gnaisses Alberto Flores com direção N-S e mergulhos verticais em toda sua extensão. Em sequência a colocação de corpos de tonalitos e anfibolitos com direção NE-SW verticais. Segue-se uma fase de intrusão de diques graníticos, denominados Brumadinho, NE-SW verticais de espessuras métricas. O quarto conjunto são corpos tabulares de pegmatitos pouco deformados NE-SW verticais que seccionam obliquamente os granitos Brumadinho com pequeno ângulo. Veios de quartzo verticais (*tension gashes*) NW-SE marcam o quinto conjunto. Finalmente falhas normais com bloco leste rebaixado, reativando a foliação gnáissica milonítica principal N-S.

Embora a última parte da evolução geológico-estrutural do Quadrilátero Ferrífero esteja associada à tectônica deformadora brasileira, a partir do Neógeno até o Recente, vários estágios tectônicos controlados por períodos de estabilidade, campos de tensão, sismicidade e compensação isostática marcaram a gênese e evolução geológico-geomorfológica regional (Lipsky 2001).

2.4 GEOLOGIA LOCAL DO COMPLEXO BONFIM

A região do estudo encontra-se entre dois domínios geomorfológicos oriundos do condicionamento litológico e estrutural das rochas. Existem duas estruturas regionais moldadas pela erosão diferencial (porção oeste do homoclinal Serra do Curral e o flanco oeste do Sinclinal Moeda) mostrando feições do tipo *hogback*. É comum nas cotas mais elevadas encontrar-se os platôs e chapadões que foram desenvolvidos na canga e finalmente um padrão de relevo do tipo “mar de morros” domina o Complexo Bonfim, desenvolvido nas rochas por serem mais susceptíveis ao intemperismo físico e químico que as litologias supracrustais. Encontram-se em geral latossolo e argissolo com maior distribuição e no extremo norte cambissolo e neossolo, além de afloramentos rochosos (Varajão 1991, IBRAM 2003, Costa 2005, Beato *et al.* 2005, UFV 2010). Romano *et al.* (2017) descreve as rochas do Complexo Bonfim bastante deformadas com faixas miloníticas, principalmente no contato com as rochas do Supergrupo Minas. Carneiro (1992) caracterizou a porção setentrional do Complexo Bonfim por variados tipos de rochas ígneas e metamórficas; gnaiss Alberto Flores (leucocrática, cinzentas, bandadas, muito deformadas, textura granoblástica, litotipo de maior expressão ocupando a

porção central até o sul da área), anfibolito Paraopeba (melanocráticas, foliadas, granulação média, que afloram como diques rompidos e boudinados), gnaissse Sousa Noschese (leucocrática, granulação média, apresenta foliação desde ígnea até milonítica, afloram na porção norte da área), tonalito Samambaia (leuco a mesocráticas, cinzentas, granulação média, hipidiomórfica, aflora próximos do sinclinal Moeda), anfibolito Candeias (melanocrática, equigranular, granulação média, aflora em forma de diques), metadiabásios Conceição do Itaguá (melanocrática, fanerítica, equigranular ou porfirítica, aflora em forma de diques) e diabásio Santa Cruz (melanocráticas, não foliadas, afanítica a fanerítica de granulação fina, aflora em diques geralmente muito alterados). Lobato *et al.* (2005) descreve o granodiorito Santana do Paraopeba com coloração cinza-escuro, granulação média e foliação milonítica. Segundo Ribeiro & Baltazar (2013) o granito Barra do Gentio, são considerados granitoides, possuem granulação grossa, isotrópicos, matriz cinza clara constituída por quartzo, plagioclásio, feldspato potássico, palhetas de biotita fina e estão orientados discretamente para NNW, já o granito Bituri, trata-se de um monzogranito muito homogêneo de cor cinza e textura fanerítica equigranular média a grossa, composto essencialmente por quartzo, microclina, plagioclásio e biotita. Pequenos corpos básicos, graníticos e pegmatíticos preenchem descontinuidades tardi a pós-tectônicas (Chemale Jr *et al.* 1991, Alkmim & Marshak 1998, Carneiro 1992, Endo 1997, Lobato *et al.* 2005, Ribeiro & Baltazar 2013, Farina *et al.* 2016).

Souza (2006 *apud* IGA 1982) cita que nas proximidades da Serra Três Irmãos e Serra da Moeda encontram-se disseminadas deposições cenozoicas, sendo os colúvios localizados próximos das serras, as cangas restritas aos metassedimentos e areias, cascalhos, argilas distribuídas de forma esparsa ao longo dos canais fluviais.

2.5 HIDROGEOLOGIA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Diante da intrincada geologia do Quadrilátero Ferrífero e consequente diferença na capacidade de armazenamento e características físico-químicas da água, foi adotada a classificação apresentada por Beato *et al.* (2005) com nove sistemas aquíferos (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Unidades hidrogeológicas apresentadas por Beato *et al.* (2005).

	Sistema Aquífero Granito-Gnáissico
	Sistema Aquífero Xistoso
	Sistema Aquífero Formação Ferrífera
	Sistema Aquífero Quartzítico
	Sistema Aquífero Itabirítico
Beato <i>et al.</i> (2005)	Sistema Aquífero Carbonático
	Sistema Aquífero Quartzítico Cercadinho
	Sistema Aquífero Granular
	Aquitardos

2.5.1 Sistema Aquífero Granito-Gnáissico

Possuem porosidade e permeabilidade secundárias, resultantes dos esforços tectônicos e dos processos de meteorização. Em geral, são recobertos por espesso manto de intemperismo. Quanto maior a densidade, extensão e o grau de comunicação hidráulica entre fraturas, diáclases, juntas ou falhas, maior será a capacidade de armazenamento e de transmissividade de águas no referido meio aquífero. Apresentam grande variabilidade de parâmetros hidráulicos devido a diversidade de litologias (Beato *et al.* 2005, IBRAM 2003).

Segundo Costa (2005) os poços possuem, em geral, produtividade baixa a muito baixa, sendo que a alta produtividade está normalmente relacionada ao sistema de fraturas ou à boa interconexão com fontes de recarga superficial.

2.5.2 Sistema Aquífero Xistoso

Segundo Beato *et al.* (2005) ocupam a maior área e volume das unidades hidrogeológicas, conforme o autor os aquíferos são descontínuos, do tipo fissural em fraturas, diáclases, juntas e falhas, livres a confinados pelos níveis de metapelitos e xistos de baixa permeabilidade, fortemente anisotrópicos e heterogêneos. A recarga principal é pela infiltração de águas pluviais nos horizontes silto-arenosos resultantes do intemperismo e conectados às fraturas dos níveis quartzosos. A circulação de água subterrânea ocorre segundo as principais direções de fraturamento e, também, nas direções dos acamamentos dos níveis quartzosos confinados por estratos pouco permeáveis. A capacidade de armazenamento é bastante variável, em geral baixa.

2.5.3 Sistema Aquífero Formação Ferrífera

São anisotrópicos, heterogêneos, livres a confinados por níveis de metapelitos, xistos pouco permeáveis, de ocorrência limitada, descontínuos, do tipo fraturado, diáclases, juntas e falhas. Constituídos de metassedimentos químicos de formações ferríferas bandadas do tipo Algoma, com quartzo recristalizado e micro e meso bandas de magnetita e sulfetos (pirita, arsenopirita, pirrotita e, eventualmente, galena, calcopirita e esfalerita). O fluxo subterrâneo processa-se segundo as direções das principais estruturas de fraturamento e de acamamento e a recarga pela infiltração de águas pluviais nos horizontes superficiais meteorizados conectados às fraturas (Beato *et al.* 2005).

2.5.4 Sistema Aquífero Quartzítico

Destacam-se no relevo sustentando as serras que conformam o Quadrilátero Ferrífero e apresentando aspecto densamente fraturado, resultante do comportamento geológico diferenciado em relação as rochas adjacentes. A litologia é constituída de quartzitos, quartzitos ferruginosos, quartzitos sericíticos, metaconglomerados, *metacherts* e metagrauvacas,

interestratificados, ou não, por filitos, filitos xistosos, xistos e dolomitos. Ocorre de forma descontínua em corpos lineares com espessuras de até 1.000 metros, e em pequenas lentes ou corpos individualizados truncados por falhas. Os aquíferos são descontínuos, do tipo fraturado, ou fissural, em fraturas, diáclases, juntas e falhas, livres a confinados pelos metapelitos e xistos interestratificados de baixa permeabilidade, anisotrópicos e heterogêneos. A circulação de água subterrânea ocorre segundo as principais direções de fraturamento e, também, ao longo das camadas confinadas por estratos pouco permeáveis. A recarga principal é pela infiltração de águas pluviais nos horizontes silte-arenosos, produtos da meteorização das rochas, conectadas aos fraturamentos das rochas sãs (Beato *et al.* 2005, IBRAM 2003).

2.5.5 Sistema Aquífero Itabirítico

As rochas predominantes são Formações Ferríferas Bandadas, fácies óxidos, do tipo Lago Superior. São constituídas de itabiritos dolomíticos e silicosos, e corpos de hematita compacta e friável. Devido as variações composicionais e grau de intemperismo, formam aquíferos do tipo fraturado e/ou granular, fortemente anisotrópicos e heterogêneos, condicionados pelo fraturamento e dissolução química do carbonato e quartzo que proporcionam permeabilidades e porosidades secundárias. Os fluxos subterrâneos têm direções preferenciais segundo as principais direções de fratura, planos de estratificação e ao longo dos contatos com as barreiras impermeáveis como diques e base confinante. Nas zonas de contato com os diques são frequentemente encontrados corpos de hematitas friáveis com porosidade granular. A capacidade de armazenamento neste sistema é variável e pode ser muito elevada. A recarga se dá pela infiltração de águas pluviais diretamente sobre os espessos horizontes intemperizados, sendo mais eficiente quando recoberto por coberturas lateríticas de elevada porosidade. O manto de intemperismo pode chegar até 500 m de espessura (IBRAM 2003, Beato *et al.* 2005).

2.5.6 Sistema Aquífero Carbonático

Está presente em dolomitos, mármore e zonas manganésíferas, principalmente da Formação Gandarela, pertencente ao (Grupo Itabira do Supergrupo Minas) Beato *et al.* (2005). Também são encontrados como níveis ou lentes na Formação Cercadinho e Cauê. As rochas encontram-se bastante meteorizadas, com espessos mantos de intemperismo. Formam aquíferos descontínuos, dos tipos fraturados em falhas, fraturas, diáclases e juntas; e cársticos como resultado da dissolução dos carbonatos nas zonas de fraqueza do dolomito. São livres a confinados pelos regolitos argilosos, produtos da meteorização da rocha, fortemente anisotrópicos e heterogêneos. O fluxo subterrâneo preferencial é nas direções de fraturamento e/ou carstificação, e a circulação também pode ocorrer segundo os planos de estratificação. A capacidade de armazenamento é bastante variável. A recarga principal é pela infiltração de

águas pluviais nos horizontes superficiais meteorizados e feições cársticas no relevo, sobretudo dolinas e fraturas de dissolução.

2.5.7 Sistema Aquífero Quartzítico Cercadinho

Segundo Beato *et al.* (2005) é um desdobramento do sistema quartzítico com a particularidade das rochas apresentarem espessos níveis de quartzito cinzento intercalados por níveis de filito prateado típicos da Formação Cercadinho. São constituídos de quartzitos, quartzitos ferruginosos, dolomitos e conglomerado basal, intercalados por filitos prateados. São aquíferos descontínuos, do tipo fraturado, ou fissural, fortemente anisotrópico e heterogêneo. A circulação de água subterrânea se faz segundo as direções das principais estruturas de fraturamento e de acamamento. A recarga se dá preferencialmente pela infiltração de águas pluviais, através do manto de intemperismo silte-arenoso conectado com as fraturas.

2.5.8 Sistema Aquífero Granular

Estão distribuídos por todo Quadrilátero Ferrífero em formações superficiais recobrimo outras unidades aquíferas e envolvem sedimentos aluviais, colúvios e elúvios. Formam aquíferos descontínuos, livres, fortemente heterogêneos e anisotrópicos. As porosidades e permeabilidades são bastante variadas em razão da diversidade dos fatores físico-químicos na formação dos sedimentos e meteorização das rochas. Podem apresentar porosidade e permeabilidade muito boas, como nas coberturas lateríticas onde, praticamente, toda a água precipitada infiltra. Por outro lado, em sedimentos ou solos residuais com expressiva quantidade de fração argila a permeabilidade é baixa, dificultando a infiltração e o escoamento subterrâneo. Em geral, são aquíferos potencialmente fracos, mas são rasos e fáceis de escavar sobretudo nos sedimentos aluviais (Beato *et al.* 2005, IBRAM 2003).

2.5.9 Aquitardos

Constituem formações, níveis interestratificados, depósitos sedimentares Terciários ou Quaternários ou corpos intrusivos máficos, podem se caracterizar como pouco permeáveis e ocorrem por toda região. Dentro do arcabouço do Quadrilátero Ferrífero podem compartimentar e confinar os sistemas aquíferos, como é o caso da Formação Batatal que está na base dos aquíferos itabiríticos proporcionando expressivas vazões nas cotas mais altas. Em geral, os poços possuem vazão nula ou quando constituem assembleias litológicas heterogêneas apresentam pequenas vazões (Beato *et al.* 2005).

2.6 HIDROGEOLOGIA DO COMPLEXO BONFIM

Apesar das diferenças estruturais entre os complexos metamórficos do Quadrilátero Ferrífero, todos constituem sistemas aquíferos similares (Costa 2005).

O alto grau de intemperismo, principalmente químico, atuante na região que compreende o Complexo Bonfim favorece a formação de aquíferos superficiais, rasos, porosidade intergranular e, em geral com baixa capacidade de armazenamento, mas podendo ser boa em alguns depósitos. São constituídos por sedimentos inconsolidados ou formações lateríticas flúvio-lacustres, depósitos de Talús, de enchimento de vales, aluvionares e meteorização superficial. São descontínuos, livres, fortemente heterogêneos e anisotrópicos. A recarga se processa principalmente pela infiltração de águas pluviais (Beato *et al.* 2005).

Já em profundidade os aquíferos fraturados são descontínuos, livres a semiconfinados pelas formações superficiais, heterogêneos e anisotrópicos. As águas pluviais infiltram no manto de alteração de constituição argilo-arenosa conectados às discontinuidades da rocha e são a principal fonte de recarga, contudo aportes de águas do sistema fluvial, relevo pouco acidentado e vegetação favorecem a restituição das águas subterrâneas. A recarga torna-se mais eficiente nos sedimentos coluvionares de canga com porosidade elevada. O fluxo tende aos baixos topográficos, já a capacidade de armazenamento é limitada e restrita às zonas de faturamento (Beato *et al.* 2005).

2.7 CONCEITOS DE HIDROGEOLOGIA

O uso da água subterrânea remonta de milhares de anos, até o século XVII a humanidade não compreendia bem a importância hidrológica. A dependência que a água subterrânea tem da precipitação e infiltração, fatores estes comparados com a água superficial, possuem movimento muito lento (Cleary 2007).

Aquíferos devem possuir permeabilidade e porosidade interconectada para armazenar e transmitir quantidades razoáveis de água, sob gradientes hidráulicos naturais, basicamente podem ser classificados como livres, confinados ou suspensos, enquanto em relação à porosidade podem ser porosos, fraturados ou cársticos (Cleary 2007).

As principais propriedades de fluxo são a condutividade hidráulica “K” e o coeficiente de armazenamento “S”. A condutividade hidráulica está relacionada ao meio poroso como do fluido que o atravessa, ou seja, a facilidade de percolação da água (Cleary 2007). Seu valor pode ser calculado por meio da lei de Darcy (Equação 2.1), onde “Q” é a vazão entre dois pontos de carga hidráulica diferenciada, “K” a condutividade hidráulica, “A” a área de influência e “i”

gradiente hidráulico. Valores típicos de “K” são 10^{-2} cm/s para areia média, 10^{-7} cm/s argila não fraturada e 10^{-11} cm/s para um granito não fraturado (Cleary 2007).

$$Q = K. A. i$$

Equação 2.1

Já o coeficiente de armazenamento ‘S’ é adimensional, definido como o volume de água que um aquífero libera ou armazena, por unidade de área superficial do aquífero e variação da carga hidráulica (Cleary 2007), ou seja, a quantidade que pode ser liberada de água de toda espessura saturada do aquífero.

A transmissividade “T” está diretamente relacionada a taxa volumétrica do fluxo através de uma seção e espessura do aquífero, ou seja, a capacidade de transmissão de água da zona saturada do aquífero. Onde “b” é a espessura “K” condutividade hidráulica (Equação 2.2).

$$T = K. b$$

Equação 2.2

2.7.1 Circulação da água subterrânea em meios fraturados

Os aquíferos fraturados são característicos de rochas compactas que não apresentam espaços vazios entre os constituintes minerais e podem compreender rochas sedimentares, metamórficas e ígneas. Devido as tensões que as rochas foram ou estão submetidas, podem surgir estruturas favoráveis a circulação da água subterrânea representando permeabilidade e porosidade secundária (diaclasses, fraturas, juntas e falhas) (Rocha 2005, Feitosa *et al.* 2000).

Segundo Fernandes (2008) a análise do fluxo de água segundo fraturas pode seguir a abordagem como meio contínuo ou descontínuo. Para adotar o meio contínuo deve-se substituir o meio fraturado e definir valores de condutividade hidráulica, porosidade e compressibilidade. Porém em rochas fraturadas, para se aplicar a lei de Darcy (Equação 2.1) e conhecer o *representative elementar volume*, este volume pode chegar a valores muito grandes ou nem existir. Portanto, a abordagem como meio descontínuo é mais coerente onde é analisada a hidráulica do fluxo de fraturas individuais ou zonas de fraturas estreitas são muito mais condutoras e contribuem para produções mais elevadas de alguns poços.

A lei cúbica (Equação 2.3) desenvolvida por Snow (1968 apud Freeze & Cherry 1979) aplica-se quando a lei de Darcy é válida em fluxo laminar e linear, para grupos de fraturas lisas e planares e mostra que a abertura das descontinuidades (b) é mais importante que o número total das mesmas (N). As outras variáveis correspondem à “ ρ ” densidade da água, “ μ ” viscosidade da água e “g” aceleração da gravidade (Fernandes 2008).

$$K = (\rho \cdot g / 12 \cdot \mu) N \cdot b^3$$

Equação 2.3

Lawn & Wilshaw (1975) *apud* Fernandes (2008) diz que a abertura das fraturas é determinada pelo mecanismo de sua propagação (Figura 2.3): I – Abertura normal dos planos de ruptura sob ação de esforço de tração; II – Deslizamento paralelo à superfície das fraturas e à frente de propagação da ruptura; III – Deslizamento paralelo à superfície das fraturas e perpendicular à frente de propagação da ruptura.

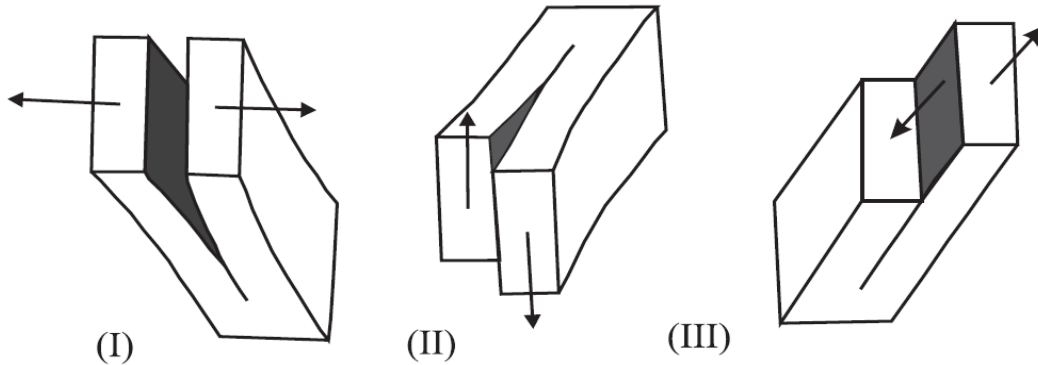


Figura 2.3 - Modos de propagação de fraturas por extensão perpendicular à superfície da fratura (I) e por deslizamento paralelo à superfície de fratura, podendo ser paralelo (II) ou perpendicular (III) à frente de propagação. Adaptado de Fernandes (2008).

Segundo Fernandes (2008) a posição espacial das fraturas de tração e cisalhamento depende do regime tectônico, para os regimes extensional e transcorrente as fraturas serão verticais e para o compressivo, horizontais (Figura 2.4).

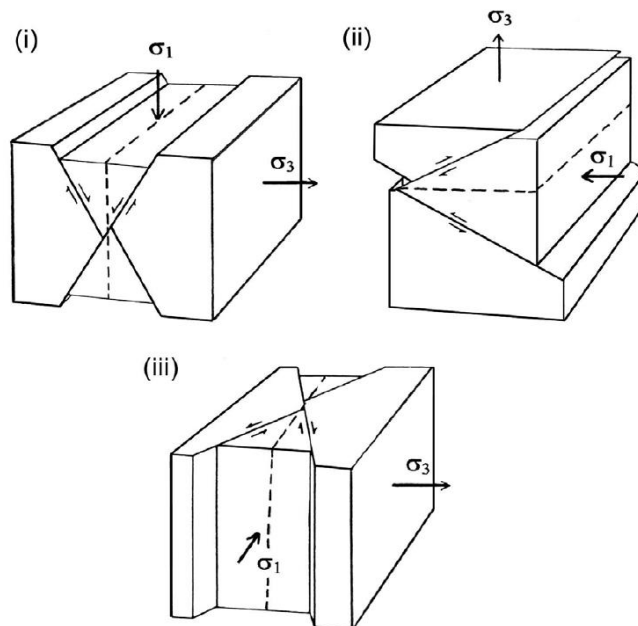


Figura 2.4 - Regimes tectônicos e posicionamento espacial de fraturas extensionais de maior abertura (linha tracejada) e de cisalhamento (linha contínua e movimento apontado por flechas): (i) regime extensional, (ii) compressivo e (iii) transcorrente (Adaptado de Ramsay & Huber 1987 *apud* Fernandes 2008).

As (Tabelas 2.2 e 2.3) sintetizam estudos locais e regionais dos fatores influentes na circulação de água em meios fraturados.

Tabela 2.2 - Fatores que controlam o fluxo de água subterrânea: seu alcance e suas limitações (Fernandes 2008).

	Exerce controle sobre	Limitações
Tectônica	Direção das fraturas mais abertas, controlando a direção da maior K e transmissividade. Densidade e direção dos grupos de fraturas controlando a conectividade e armazenamento da rede de fraturas.	Muitas vezes não é disponível em trabalhos anteriores e a coleta e análise de dados estruturais pode ser demorada e exige profissionais especializados.
Lineamentos	Localização do poço próxima a zona (s) de fraturas.	Escalas pequenas (< 1:25.000) não permitem correlação com fraturas que atravessam os poços. Lineamentos de áreas de relevo suave muitas vezes podem não correlacionáveis a estruturas de subsuperfície e não apresentam correlação com a densidade de tais estruturas.
Manto Inconsolidado	Recarga de aquíferos	É descontínuo e de difícil mapeamento. Análises regionais não permitem observação de correlação entre espessura de manto inconsolidado e Q/s.
Litologia	Presença de descontinuidades prévias (acamamento, contatos, bandamento) e modo de propagação de fraturas.	O controle exercido pela litologia é subordinado à tectônica no que diz respeito às fraturas de maior K.
Compartmento topográfico	Saturação de: fraturas superfícies (horizontais e verticais) e manto inconsolidado, pois nos vales o nível d'água é mais próximo à superfície.	Os vales devem ser associados a lineamentos, ou seja, o maior controle exercido por estes últimos.
Profundidade	Transmissividade de fraturas verticais diminui muito a partir de 300 m de profundidade e das horizontais, a partir de 30 m.	A análise deste parâmetro é fortemente influenciada pelo fato de poços serem aprofundados somente quando produções adequadas não são obtidas com poços mais rasos.

Tabela 2.3 - Método proposto para identificação de situações mais propícias para: locação de poços e de determinação de caminhos preferenciais de circulação de água subterrânea. Retirado de Fernandes (2008).

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

2.7.2 *Produtividade no meio fraturado e capacidade específica*

Devido à grande heterogeneidade das propriedades hidráulicas das rochas fraturadas, os valores de produtividade de água subterrânea em rochas cristalinas são significativamente variáveis, outro ponto que dificulta o estudo é definir quais são os principais condicionantes geológicos mais efetivos no fluxo de água nestes meios (Neves 2005, Fernandes 2008). Além da complexidade inerente, deve-se atentar para a carência de informações disponibilizadas pelas empresas executoras das perfurações e a própria falta de cadastro de poços amplamente difundida no país.

Considera-se a capacidade específica como parâmetro representativo na análise da produtividade dos poços a razão entre a vazão extraída de um poço e o rebaixamento do nível d'água (Neves 2005). Adota-se o valor da mediana como mais representativo da capacidade específica dos poços, devido alguns poços com produtividade muito alta ocorrerem e alterar o valor da média que é mais sensível aos *outliers* nos estudos de (Neves 2005, Fernandes 2008, Brito 2018). Strukkmeier & Margat (1995) *apud* Diniz *et al.* (2014) propõe uma classificação dos aquíferos em relação a produtividade dos poços (Tabela 2.4), porém para aquíferos fraturados é sugerido utilizar os dados da vazão.

Tabela 2.4 - Produtividade dos aquíferos a partir da capacidade específica, segundo Diniz et al. (2014).

Q/s (m³/h/m)	T (m²/s)	K (m/s)	Vazão (m³/h)	Produtividade	Classe
≥ 4.0	$\geq 10^{-02}$	$\geq 10^{-04}$	≥ 100	Muito Alta: Fornecimento de água de importância regional (abastecimento de cidades e grandes irrigações). Aquíferos que se destaquem em âmbito nacional	(1)
$2.0 \leq Q/s < 4.0$	$10^{-03} \leq T < 10^{-02}$	$10^{-05} \leq K < 10^{-04}$	$50 \leq Q < 100$	Alta: Características semelhantes à classe anterior, contudo situando-se dentro da média nacional de bons aquíferos.	(2)
$1.0 \leq Q/s < 2.0$	$10^{-04} \leq T < 10^{-03}$	$10^{-06} \leq K < 10^{-05}$	$25 \leq Q < 50$	Moderada: Fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades, irrigação em áreas restritas.	(3)
$0.4 \leq Q/s < 1.0$	$10^{-05} \leq T < 10^{-04}$	$10^{-07} \leq K < 10^{-06}$	$10 \leq Q < 25$	Geralmente baixa, porém localmente moderada: Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado.	(4)
$0.04 \leq Q/s < 0.4$	$10^{-06} \leq T < 10^{-05}$	$10^{-08} \leq K < 10^{-07}$	$1 \leq Q < 10$	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa: Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos.	(5)
< 0.04	$< 10^{-06}$	$< 10^{-08}$	$< 1,0$	Pouco Produtiva ou Não Aquífera: Fornecimentos insignificantes de água. Abastecimentos restritos ao uso de bombas manuais.	(6)

Bertachini (1987) demonstra a correlação da transmissividade com a capacidade específica de poços localizados no embasamento na região de Jundiaí – SP, o autor iniciou o trabalho de pesquisa e levantamento de dados sobre a área em 1980 quando fazia parte da equipe no projeto “Estudo de Águas Subterrâneas na 5ª Região Administrativa – Campinas” que abrangeu terrenos cristalinos no centro-leste –SP (Figura 2.5).

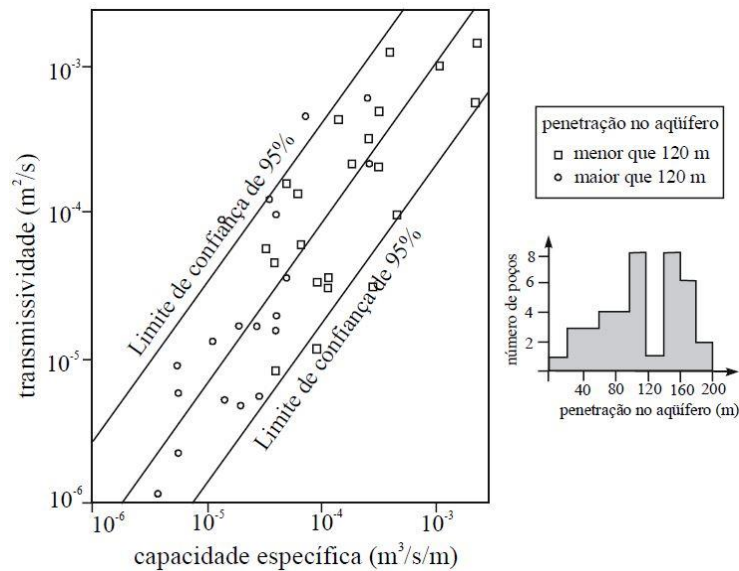


Figura 2.5 – Correlação entre transmissividade e capacidade específica de poços na região de Jundiaí (Bertachini 1987, modificado por Neves 2005).

Para aquíferos livres, confinados e semiconfinados, Galofré (1966 apud Custódio & Llamas 1983) propõe uma (Equação 2.4) que permite estimar a transmissividade a partir da capacidade específica.

$$T \text{ (m}^2\text{/dia)} = \frac{100 * Q \text{ (l/s)}}{s \text{ (m)}} \quad \text{Equação 2.4}$$

“T” é a transmissividade, “Q” a vazão e “s” o rebaixamento. A razão é 1.16 entre a transmissividade e a capacidade específica.

2.8 GEOPROCESSAMENTO APLICADO ÀS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Geoprocessamento é um conjunto de técnicas de aquisição, armazenamento, tratamento, análise e interpretação de dados geográficos que podem ser representados por um sistema de coordenadas geográficas ou planas. A aplicação de ferramentas computacionais conhecidas como SIG (*Geographic Information System*) ganha novos adeptos devido sua versatilidade nos estudos das águas subterrâneas. Os componentes do SIG são “pessoas”, equipamentos (*hardware*) e programas (*softwares*) (Feitosa *et al.* 2008).

A integração em SIG das imagens com as interpretações de dados geológicos-estruturais permitem definir condicionantes hidrogeológicas. Geralmente, a identificação e mapeamento de lineamentos estruturais são realizadas de modo visual a partir de vetorização, visto que as feições no terreno ocorrem de forma complexa e sua extração automática é muito difícil de ser realizada de forma eficiente. A geração de diversos mapas temáticos (lineamentos, estruturais, morfoestrutural, geológicos, etc), após interpretados devem apresentar áreas mais favoráveis ou desfavoráveis à prospecção e recarga de água subterrânea em meios fraturados (Rocio 1993, Evangelista et al. 1998, Filho & Fonseca 2009).

Já o uso de interpoladores supre a carência de dados ou a irregularidade na distribuição espacial, transformando dados discretos em contínuos. Apesar de existirem poucos estudos relacionando o método IDW (*Inverse Distance Weighted*) com parâmetros hidrogeológicos, trata-se de uma ferramenta que auxilia no entendimento da distribuição e no comportamento da água subterrânea espacialmente por meio de inferências (Feitosa et al. 2008, Macedo et al. 2014, Vargas et al. 2018).

Vargas et al. (2018) utilizou o método IDW (*Inverse Distance Weighted*) no seu estudo que envolveu aquíferos fraturados na região da serra Gaúcha, a interpolação dos parâmetros hidráulicos apresentou bons resultados e indicou quanto maior a quantidade de dados mais preciso os resultados.

O interpolador IDW (*Inverse Distance Weighted*) tem por base equações lineares que prediz um valor para uma região não medida, ou seja, tende a ser semelhantes quanto mais próximo do dado real (Vargas et al. 2018). Devido ao caráter irregular dos dados é comum ocorrer o efeito “*bull eyes*” que são pequenas áreas que se destacam no mapa em relação ao caráter suavizado das regiões sem dados (Macedo et al. 2014). O método utiliza a seguinte fórmula (Equação 2.5):

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i}$$

Equação 2.5

onde, “Z(x)” é o valor do ponto a ser interpolado, “n” número de pontos utilizados na interpolação, “Z(x_i)” valor do ponto “x_i”, “ω_i” peso do valor de “x_i” sobre o ponto “x”. já “h(x, x_i)” é a distância entre o ponto “x” e “x_i”, “p” é parâmetro de potência (Equação 2.6).

$$\omega_i = \frac{1}{h(x, x_i)^p}$$

Equação 2.6

2.9 PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO (AHP)

O modelo AHP (*Analytic Hierarchy Process*) de tomada de decisão desenvolvido na década de 70 nos EUA por Thomas L. Saaty (Figura 2.6) organiza de maneira hierárquica determinado problema, identifica-se critérios e subcritérios que podem ser analisados de forma independente com seu respectivo peso atribuído (Saaty 1987, Saaty 1990). Vargas (2010) propõe uma aplicação do método e o presente trabalho seguirá esse modelo. Brito (2018) em seu estudo aplicou as adaptações de Vargas (2010) na atribuição de pesos dos mapas localizados no Complexo Bonfim e Bação.

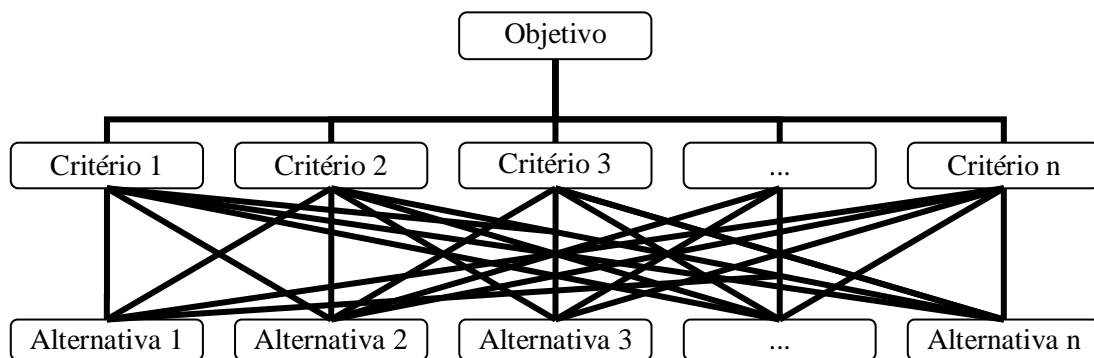


Figura 2.6 – Estrutura hierárquica do método AHP (Modificado de Saaty 1987).

Após a construção da matriz de comparação (Tabela 2.5), são atribuídos pesos (Tabela 2.6) propostos por (Saaty 2005). Comparações empíricas são transformadas em valores numéricos, portanto trata-se de um diferencial em relação a outros métodos (Vargas 2010).

Tabela 2.5 – Exemplo de matriz de comparação (Saaty 1987, 1990).

	Critério 1	Critério 2	Critério 3
Critério 1	1	$a_{1,2}$	$a_{1,n} = 1/a_{n,1}$
Critério 2	$a_{2,1} = 1/a_{1,2}$	1	$a_{2,n}$
Critério 3	$a_{n,1}$	$a_{n,2} = 1/a_{2,n}$	1
Total (Σ)	$\Sigma_1 = 1 + a_{2,1} + a_{n,1}$	$\Sigma_2 = a_{1,2} + 1 + a_{2,n}$	$\Sigma_3 = a_{1,n} + a_{2,n} + 1$

Tabela 2.6 – Escala de importância relativa de (Saaty 2005).

Escala	Avaliação Numérica	Recíproco
Extremamente preferido	9	1/9
Muito forte a extremo	8	1/8
Muito fortemente preferido	7	1/7
Forte a muito forte	6	1/6
Fortemente preferido	5	1/5
Moderado a forte	4	1/4
Moderadamente preferido	3	1/3
Igual a moderado	2	1/2
Igualmente preferido	1	1

Próxima etapa é a normalização dividindo-se cada valor da tabela pela soma da respectiva coluna (Tabela 2.7) (Vargas 2010).

Tabela 2.7 – Exemplo de matriz de comparação normalizada (Saaty 1987, 1990).

	Critério 1	Critério 2	Critério 3
Critério 1	$1/\sum_1$	$a_{1,2}/\sum_2$	$a_{1,n}/\sum_3$
Critério 2	$a_{2,1}/\sum_1$	$1/\sum_2$	$a_{2,n}/\sum_3$
Critério 3	$a_{n,1}/\sum_1$	$a_{n,2}/\sum_2$	$1/\sum_3$

Vargas (2010) propõe a utilização do vetor de Eigen “ λ ” aproximado para facilitar os cálculos, já que a diferença entre o real é inferior a 10%. Obtêm-se o vetor através da média aritmética dos valores de cada critério e subcritério (Tabela 2.8), deve-se atentar que a soma deve ser 1. O vetor Eigen “ λ ” determina o peso do critério ou subcritério (Vargas 2010).

Tabela 2.8 – Cálculo aproximado do vetor de Eigen (λ) (Vargas 2010).

	Vetor aproximado de Eigen (λ)
Critério 1	$\lambda_1 = (1/\sum_1 + a_{2,1}/\sum_1 + a_{n,1}/\sum_1)/n$
Critério 2	$\lambda_2 = (a_{1,2}/\sum_2 + 1/\sum_2 + a_{n,2}/\sum_2)/n$
Critério 3	$\lambda_3 = (a_{1,n}/\sum_3 + a_{2,n}/\sum_3 + 1/\sum_3)/n$
Total (Σ)	1

O índice de consistência “CI” é obtido pela (Equação 2.6), onde “n” é o número de critérios analisados e o número principal de Eigen “ λ_{max} ” é calculado a partir do somatório do produto das componentes do vetor de Eigen “ λ ” e o total da respectiva coluna da matriz comparativa original (Vargas 2010).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Equação 2.6

A taxa de consistência “CR” (Equação 2.7) é obtida pela dividindo-se o índice de consistência “CI” pelo índice de consistência aleatório “RI” que são o número de critérios analisados (Tabela 2.9). Afim de verificar a consistência de determinada matriz a taxa de consistência deverá ser inferior a 0.1, caso contrário a matriz deve ser refeita (Saaty 1987, Saaty 1990, Saaty 2005).

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0,1 \approx 10\%$$

Equação 2.7

Tabela 2.9 – Índice de consistência aleatório “RI” (Saaty 2005).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

CAPÍTULO 3

MATÉRIAS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em seis etapas: revisão bibliográfica, geração do banco de dados hidrogeológico, aquisição das imagens de radar, produção cartográfica, integração dos mapas e validação dos dados.

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Revisão prévia dos trabalhos de mapeamento geológico da folha Igarapé (CPRM 2013) e Carneiro (1992) no Complexo Bonfim. Temas que envolveram características dos aquíferos fraturados, além das metodologias empregadas nos estudos das águas subterrâneas, como por exemplo Bertachini (1987), Neves (2005), Fernandes (2008) e Mendes *et al.* (2016). Além da aplicação do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) em estudos hidrogeológicos Brito (2018).

3.2 BANCO DE DADOS HIDROGEOLÓGICO

Foi gerado um banco de dados no *software* Excel com informações da outorga de 49 poços catalogados pela Secretária de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD). Outros 35 poços do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) também foram catalogados (Figura 3.1). Foram reconhecidos 6 poços em comum nos dois bancos de dados. Ressalta-se que poços que não foi possível de calcular a vazão específica ou apresentaram ausência de dados fundamentais foram desconsiderados. No total 71 poços foram utilizados, após os cuidados com a duplicidade terem sido tomados (Tabela 3.1). Dados estatísticos como mínimo, máximo, média, mediana e moda foram extraídos com auxílio do Excel. A transmissividade foi estimada (Equação 2.4) conforme proposta Galofré (1966 apud Custódio & Llamas 1983).

Tabela 3.1 - Fontes do Banco de Dados.

	SUPRAM	SIAGAS	SUPRAM/SIAGAS	TOTAL
TOTAIS	49	35	6	90
UTILIZADOS	45	21	5	71

A capacidade específica calculada foi utilizada para definir a produtividade em seis classes, segundo Diniz *et al.* (2014). Gráficos de correlações entre a capacidade específica, nível estático, nível dinâmico e profundidade foram plotados em busca de tendências entre os parâmetros hidráulicos.

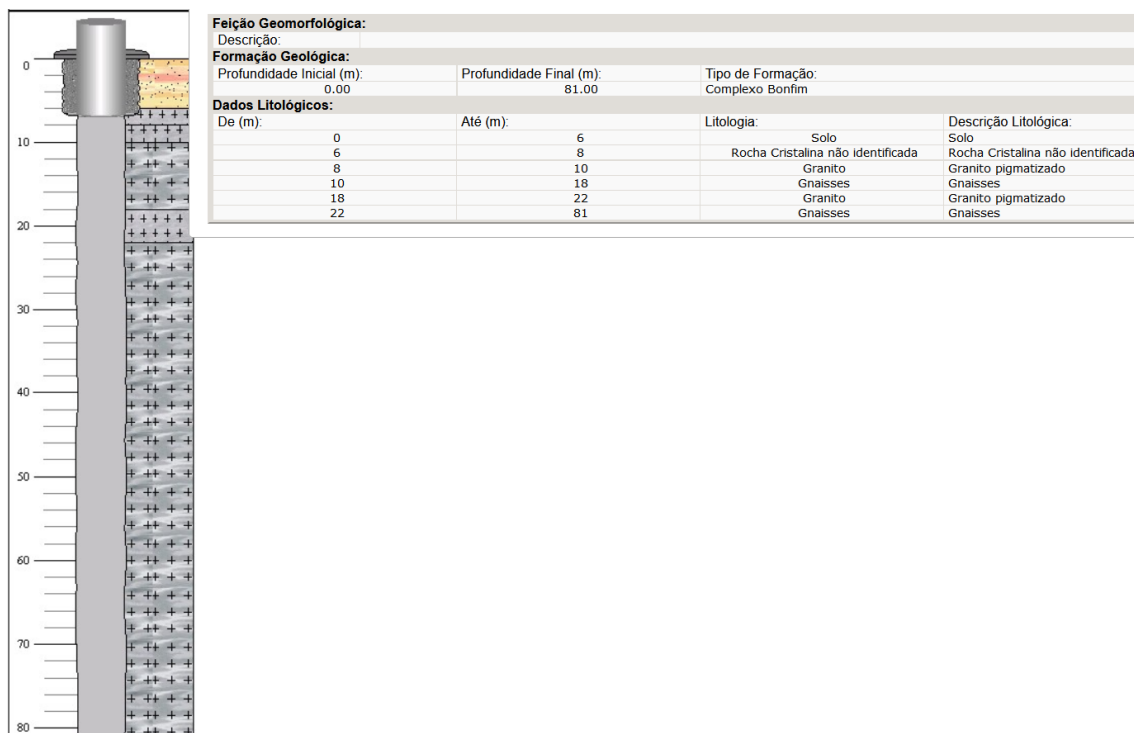


Figura 3.1 - Exemplo de um poço na cidade de Moeda.

3.3 AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DE RADAR

Os dados obtidos do satélite ALOS PALSAR cuja informação encontra-se disponível para acesso livre no site VERTEX (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu.com>) foi equipado com três sensores, o radiômetro PRISM, o radiômetro multiespectral AVNIR-2 e o sensor de microondas PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar). O último sensor forneceu os dados do modelo digital de elevação com resolução espacial de 12.5 m cena F6770 correspondente à órbita de 19 de junho de 2015.

A plataforma livre MapBiomas disponibiliza anualmente mapas de uso e cobertura do Terra em escala aplicável até 1:100.000 em formato matricial (Landsat) com resolução de 30m. A imagem utilizada refere-se a (Coleção 5) e compreende o período de 1985-2019.

3.4 PRODUÇÃO CARTOGRÁFICA

O fluxo de trabalho está representado na (Figura 3.2), no *software* QGIS versão 3.4.3 ArcGis 10.3, os arquivos foram padronizados no sistema de informações geográficas Datum geodésico *World Geodetic System* (WGS-84) zona 23S.

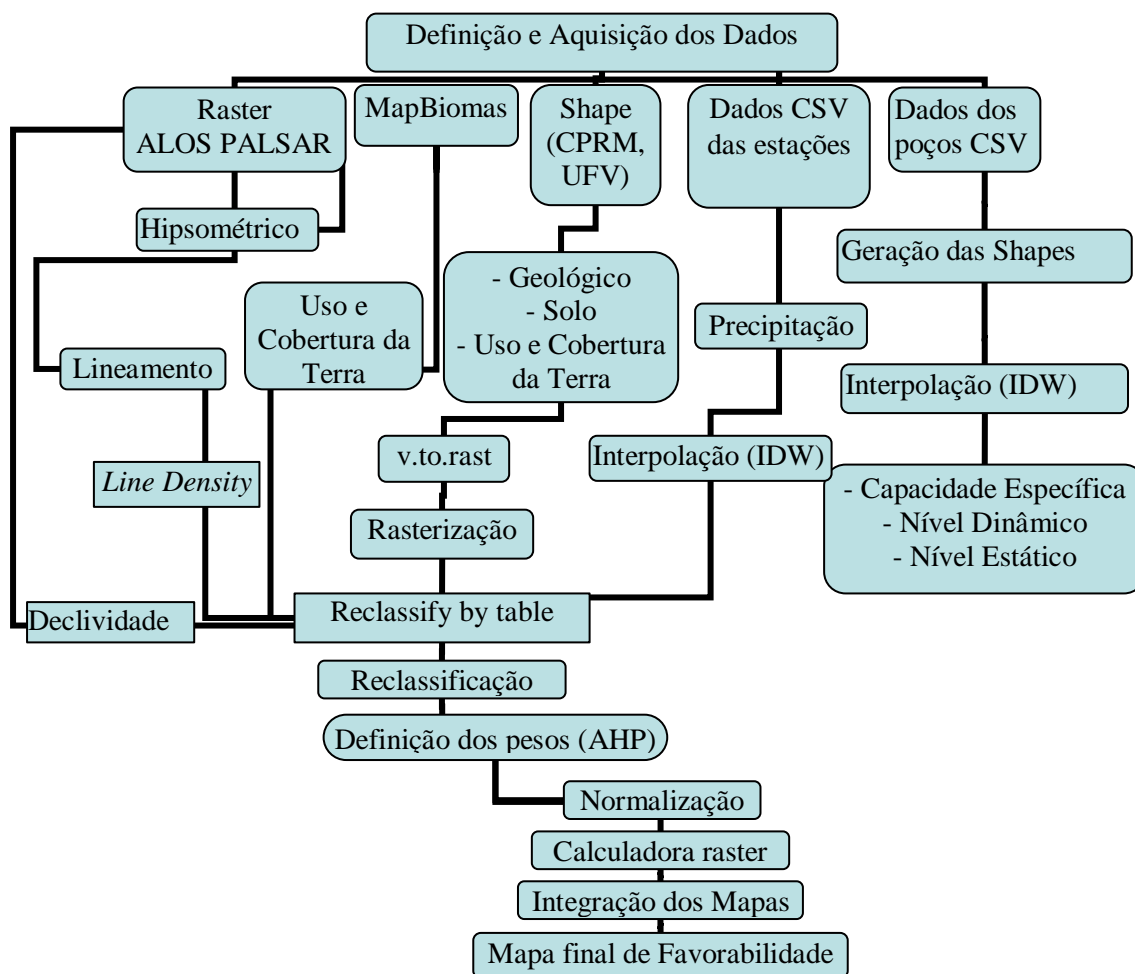


Figura 3.2 - Fluxograma da metodologia adotada.

O mapa hipsométrico utilizou dados do satélite ALOS PALSAR (12.5 m) com valores da cota variando entre 719-1219 m e distância entre as curvas de nível de 50 m. Nas propriedades do raster foi definida a renderização Banda falsa-cor

Foram realizadas a vetorização da carta SF-23-X-A-II – Igarapé (CPRM 2013) e o mapa de Solos do Estado de Minas Gerais na escala 1:650.000 (UFV 2010) disponibilizadas as *shapes* de domínio público. No mapa geológico houve uma simplificação das litologias em gnaisses, granitos e xistos na definição dos subcritérios.

O mapa de declividade foi classificado conforme Ramalho-Filho & Beek (1995) em 6 classes com os dados disponíveis do mesmo satélite ALOS PALSAR. O arquivo gerado em porcentagem e configurado com valor mínimo e máximo de 0° a 60% com a utilização da ferramenta declividade do QGIS.

A base cartográfica para identificação dos lineamentos foi o modelo digital do terreno disponível do ALOS PALSAR (12,5 m) que foram traçados manualmente cristas e vales. No ambiente QGIS foram inseridas formulas na calculadora de campo para obtenção das

coordenadas XY (inicial e final), comprimento e azimute de cada lineamento na forma de tabela de atributos, que posteriormente foi exportada para planilha Excel. As direções preferenciais foram organizadas nos diagramas de rosáceas com o *software* OpenStereo (Grohmann e Campanha 2010). Optou-se pela ferramenta *Line Density* (ArcGis 10.3) (Figura 3.2) para gerar os mapas de densidade de lineamentos que calcula o tamanho das feições lineares contidas no raio estipulado de cada célula, onde foi atribuído valor 1000 que representa a média dos lineamentos.

No portal HidroWeb os dados das estações pluviométricas foram baixados e calculada a precipitação média anual. Optou-se pela interpolação *Inverse Distance Weighted* (IDW) e extração das isoietas com intervalo a cada 100 milímetros. Foi necessário extrapolar os limites da área de estudo para aumentar o número de estações e posteriormente foi feito o recorte do arquivo.

No portal MapBiomas foi realizado o *download* do *raster*, para simplificação das imagens o mosaico de uso e ocupação da Terra foram agrupadas em ordem decrescente quatro classes de potencial hidrogeológico, florestas e vegetação nativa, pastagens e lavouras, afloramentos rochosos e finalmente áreas com algum tipo de infraestrutura humana.

Os mapas da capacidade específica, nível dinâmico e nível estático dos poços foram gerados a partir da transformação dos dados da planilha em *shape* e interpolado com o método *Inverse Distance Weighted* (IDW) com fator 2. Todos os *rasters* foram renderizados nas Bandas Simples Falsa-Cor.

3.5 INTEGRAÇÃO DOS MAPAS

Foram aplicados pesos utilizando o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) em todos os *rasters* (Tabela 3.2) com auxílio de planilhas no Excel.

Quando o mapa estava no formato *shape*, foi necessário transformar os dados vetoriais em *raster* com a ferramenta *v.to.rast*. Em cada *raster* utilizou-se a ferramenta (*Reclassify by table*) de acordo com a classificação proposta na atribuição dos pesos para cada subcritério, desta forma gerou-se áreas com maior ou menor relevância na potencialidade hidrogeológica. A normalização dos dados permitiu que todos os seis mapas ficassem com valores em ordem crescente de favorabilidade numerados de 0 a 1.

Estabelecido os critérios, aplicou-se os pesos com a ferramenta (Calculadora *raster*) multiplicando os mapas de declividade, uso e ocupação da Terra, densidade de lineamentos, pluviosidade, geológico e solos.

Tabela 3.2 – Reclassificação das variáveis e suas respectivas potencialidades hidrogeológicas.

Variável	Atributo	Peso	Potencialidade
Declividade	0 a 3%	33.6	Muito Alto
	3 a 8%	33.6	Muito Alto
	8 a 13%	16.6	Alto
	13 a 20%	8.85	Médio
	20 a 45%	4.71	Baixo
	> 45%	2.59	Muito Baixo
Uso e Ocupação da Terra	Vegetação Nativa	50.3	Muito Alto
	Pastagens e Lavouras	33.5	Alto
	Afloramentos Rochosos	12.2	Médio
	Infraestrutura Humana	3.89	Baixo
Densidade dos Lineamentos	0 a 1.59	10.6	Baixo
	1.59 a 3.18	26.0	Alto
	3.18 a 4.72	63.3	Muito Alto
Pluviosidade	1300 a 1500 mm	10.6	Médio
	1500 a 1700 mm	26.0	Alto
	> 1700 mm	63.3	Muito Alto
Geológico	Depósitos	57.2	Muito Alto
	Gnaisse	24.7	Baixo
	Granito	12.7	Baixo
	Xisto	5.29	Muito Baixo
Solo	Latossolo	46.5	Alto
	Argissolo	27.7	Médio
	Neossolo	16.1	Baixo
	Cambissolo	9.59	Muito Baixo

3.6 VALIDAÇÃO DOS DADOS

O modelo proposto de favorabilidade indica áreas mais propícias para exploração da água subterrânea. A validação foi feita visualmente com os poços plotados, logo foi possível verificar que preferencialmente a locação estava nas áreas com média a alta favorabilidade.

Além disso, em todos os mapas gerados incluindo as interpolações foram interpretados e discutidas relações entre a geologia e morfologia da área com os parâmetros hidráulicos dos poços.

4.1 DISTRIBUIÇÃO DOS POÇOS

A rede de poços válidos utilizados no estudo se mostra irregular e com nuvens de concentração próximas dos centros urbanos (Figura 4.1).

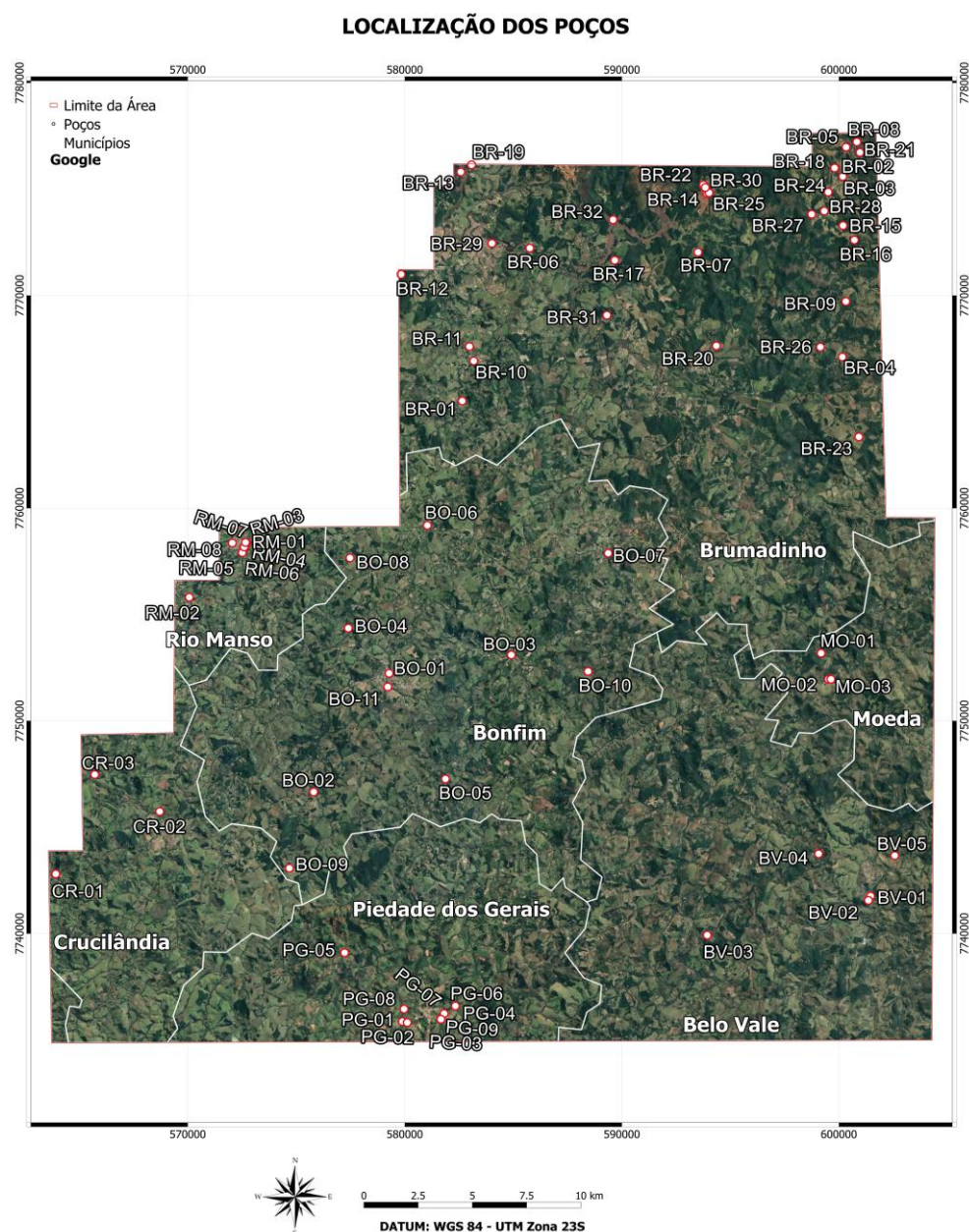


Figura 4.1– Distribuição dos poços nos municípios. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.

O número real de poços deve ser bem maior devido à falta de regularização e cadastro no Banco de dados oficial, tal fato prejudica estudos relacionados a hidrogeologia e aplicação de metodologias de gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

4.2 MAPA HIPSOMETRICO

A área de estudo encontra-se entre dois domínios geomorfológicos, o primeiro denominado homoclinal serra do Curral com feições do tipo *hogback* e o segundo platô do sinclinal Moeda, mais especificamente seu flanco oeste, sendo estes oriundos do condicionamento litológico e estrutural. Nas cotas mais elevadas ocorrem platôs e chapadas que foram moldadas em lateritas evidenciando um relevo apalachiano.

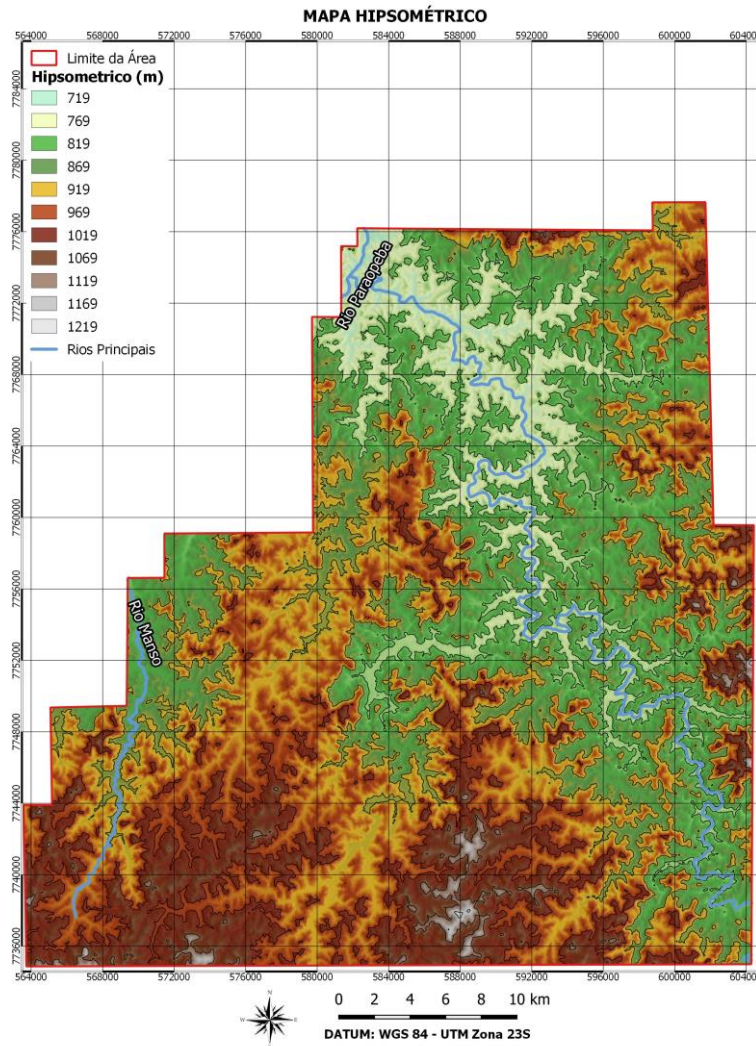


Figura 4.2- Mapa hipsométrico da área de estudo. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.

O mapa hipsométrico (Figura 4.2) representa cotas entre 719 a 1219 m. Predomina um relevo do tipo “mar de morros” desenvolvido nas rochas do Complexo Bonfim por serem mais susceptíveis ao intemperismo físico e químico que as litologias supracrustais (quartzitos e itabiritos) que margeiam a área. Destaca-se dois níveis altimétricos distribuídos entre as cotas 719-869 m com maior concentração dos poços e 870-1219 m. A trajetória do vale sudeste-noroeste do rio Paraopeba e o extremo oeste da área com o rio Manso demarcam os níveis inferiores a 900 m. Na porção leste no contato com o sinclinal Moeda e próximo ao contato com

a serra do Curral no extremo norte observa-se a transição para níveis altimétricos superiores a 1000 m, além da porção sul-sudoeste que representa topos de morros do Complexo Bonfim.

4.3 MAPA DE DECLIVIDADE

A classificação utilizada no trabalho (Tabela 4.1) foi proposta por Ramalho-Filho & Beek (1995). Nota-se dois padrões dominantes (Figura 4.3), o primeiro com declividade até 20% com tonalidade esverdeada, onde preferencialmente os poços estão instalados. O segundo de 20-45% que representam divisores de águas locais. Observou-se que declividades superiores a 20% ficaram restritas em menor proporção na área, portanto não representativas.

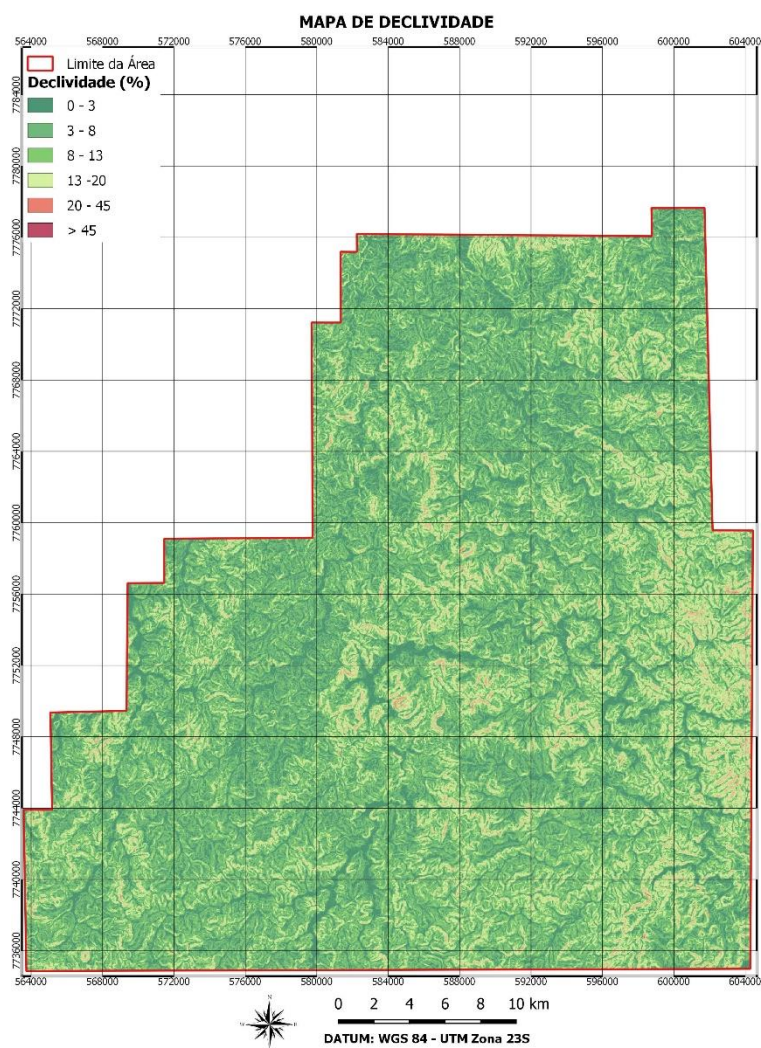


Figura 4.3 - Mapa de Declividade gerado a partir do modelo digital de elevação ALOS PALSAR (12 metros) da área de estudo. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.

Nesse contexto, as regiões central, norte, noroeste e sudeste predominam relevos moderadamente ondulados. Já as porções leste e sudoeste relevos ondulados.

Tabela 4.1 - Classificação do relevo (Ramalho-Filho & Beek 1995).

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

4.4 MAPA GEOLÓGICO

A (Figura 4.4) evidencia as estruturas regionais (diques, falhas e zonas de cisalhamento) que com dada cinemática, preenchimento dos espaços vazios, quantidade e tamanho das fraturas poderiam controlar a circulação de água subterrânea. As zonas de cisalhamento possuem direções norte-noroeste e norte-nordeste. Os diques e falhas com direção noroeste interceptam as zonas de cisalhamento, principalmente próximo ao município de Belo Vale.

Destaca-se em termos de estruturas o gnaisse Alberto Flores e o granito Bituri, seguido pelo granodiorito Santana do Paraopeba. Claramente a porção inferior da área possui maior quantidade de estruturas mapeadas em todas as direções possivelmente relacionada com a complexa geologia estrutural que envolve a inflexão do sinclinal Moeda, apesar disso o ortognaisse Souza Noshese que cobre grande área no limite norte possui a segunda maior quantidade de poços.

A (Figura 4.5) apresenta a distribuição dos poços encontrados em cada litologia e compara os valores da média e mediana. Com exceção do granito Barra do Gentio e tonalito Samambaia que possuem um único poço, as medianas tendem a serem menores devido aos *outliers* maiores que 2.90 m³/h/m exercerem menor peso que nas médias.

O gnaisse Alberto Flores possui o maior número de poços com 47.9%, seguido pelo ortognaisse Souza Norchese com 31%, granito Bituri com 14.1%, granodiorito Santana do Paraopeba com 4.2%, o granito Barra do Gentio 1.4% e tonalito Samambaia possuem somente 1.4%. Apesar do gnaisse Alberto Flores e granito Bituri possuírem as maiores áreas, o ortognaisse Souza Norchese cobre grande parte do município de Brumadinho que se destaca como maior município entre todos envolvidos no estudo. A maior população, proximidade das áreas mineradoras e instalação de condomínios podem explicar essa concentração de poços no extremo norte.

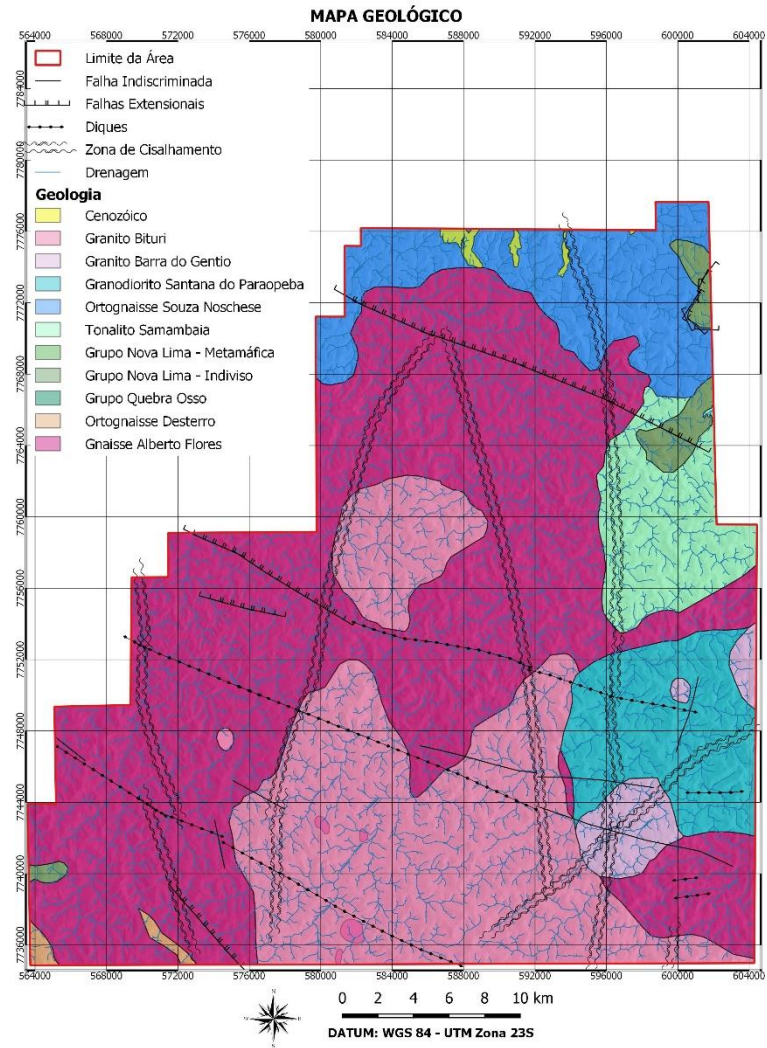


Figura 4.4 - Mapa Geológico com litotipos e principais estruturas regionais (CPRM 2013).

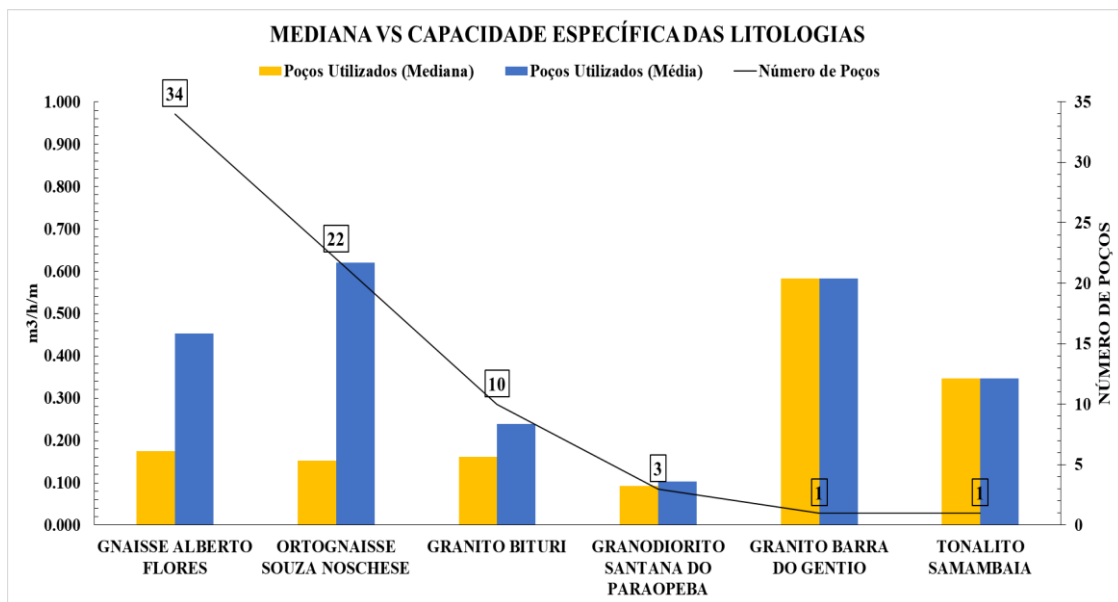


Figura 4.5- Gráfico comparativo das médias e medianas dos poços de cada litologia e o número de poços encontrados em cada litotipo.

4.5 DENSIDADE DE LINEAMENTOS

Foram traçados 1197 lineamentos com tamanho médio de 1013 m e mediana 880 m, após a interpolação foi gerado o mapa de densidade de lineamentos (Figuras 4.6) que realça regiões com maior ocorrência de fraturamento. Todo limite norte se mostrou menos estruturado, mas o gnaisse Alberto Flores e granito Bituri se destacaram com zonas de alta densidade. Torna-se fundamental estudos de detalhe para entendimento da interconexão das estruturas e avaliação se estão preenchidas com minerais argilosos.

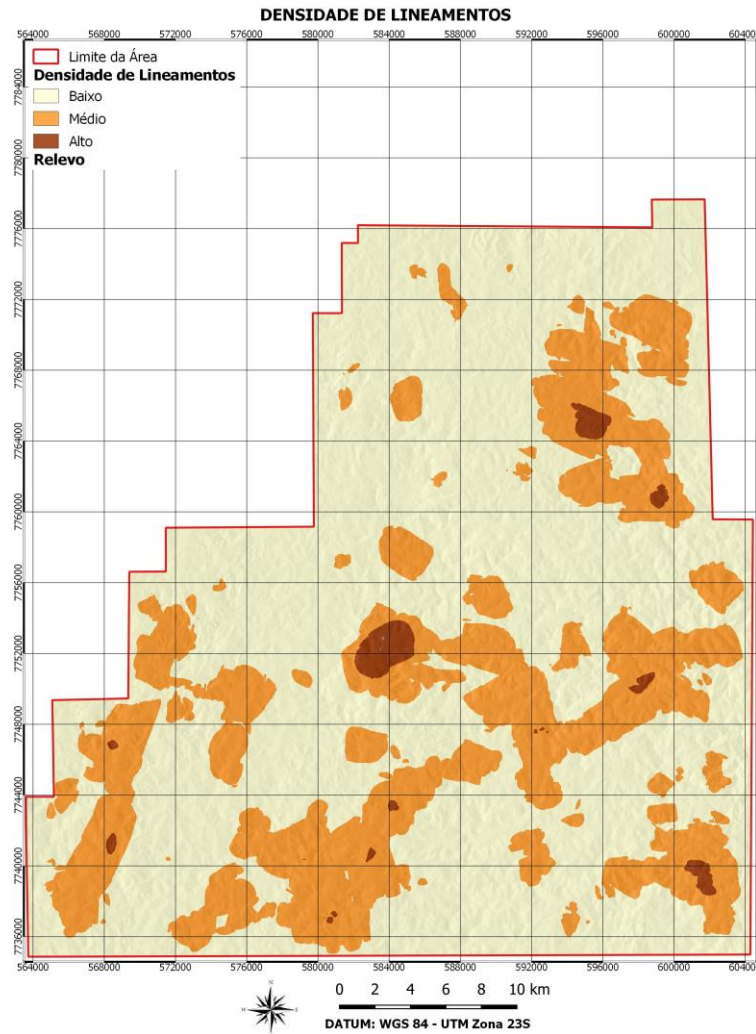


Figura 4.6 – Mapa de densidade de lineamentos. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.

O diagrama de roseta (Figura 4.7) apresenta direção noroeste-sudeste bem estabelecidas, coincidente com o *trend* de grandes estruturas (falhas, zonas de cisalhamento, diques) do mapa geológico. As direções norte-sul e leste-oeste, mostraram-se representativas no traçado dos lineamentos, provavelmente relacionadas com zonas de cisalhamento norte-nordeste ou estruturas em profundidade.

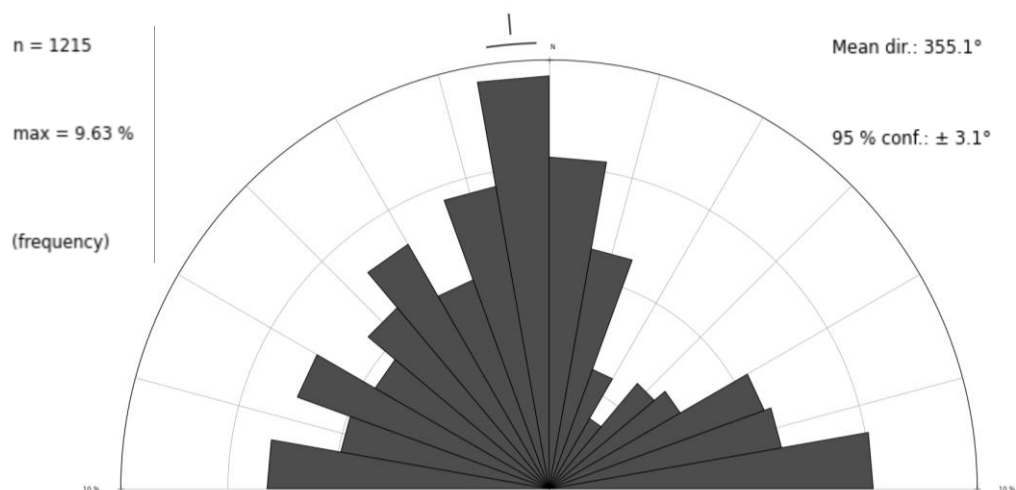


Figura 4.7 - Diagramas de roseta dos lineamentos. Elaborado pelo autor.

4.6 MAPA DE SOLOS

São identificados quatro tipos de solos (Figura 4.8) com predomínio do latossolo na região central e leste-sudeste. Seguido pelo argissolo que envolve os limites oeste-sudoeste, além da região sul entre os municípios de Belo Vale, Bonfim e Piedade dos Gerais, finalmente grande parte de Moeda e sul-sudeste de Brumadinho. Restrito na porção norte o cambissolo abrange uma faixa contínua leste-oeste. No extremo norte o neossolo uma pequena área próxima ao sopé da serra do Curral. Não foi possível diferenciar solos originados das diferentes litologias (Figura 4.4), mas o cambissolo representou uma área semelhante ao contorno do ortognaisse Souza Noshese.

Semelhante a análise do mapa geológico, com exceção do neossolo que possui dois poços 2.8%, as medianas tendem a ser menores devido aos *outliers* exercerem menor peso que nas médias (Figura 4.9). Em relação a quantidade de poços o latossolo possui o maior número com 43.7%, cambissolo com 36.6% e argissolo com 16.9%. Essa distribuição pode ser justificada pela representação em área de cada tipo de solo ou no caso do cambissolo que envolveu zonas urbanas de Brumadinho.

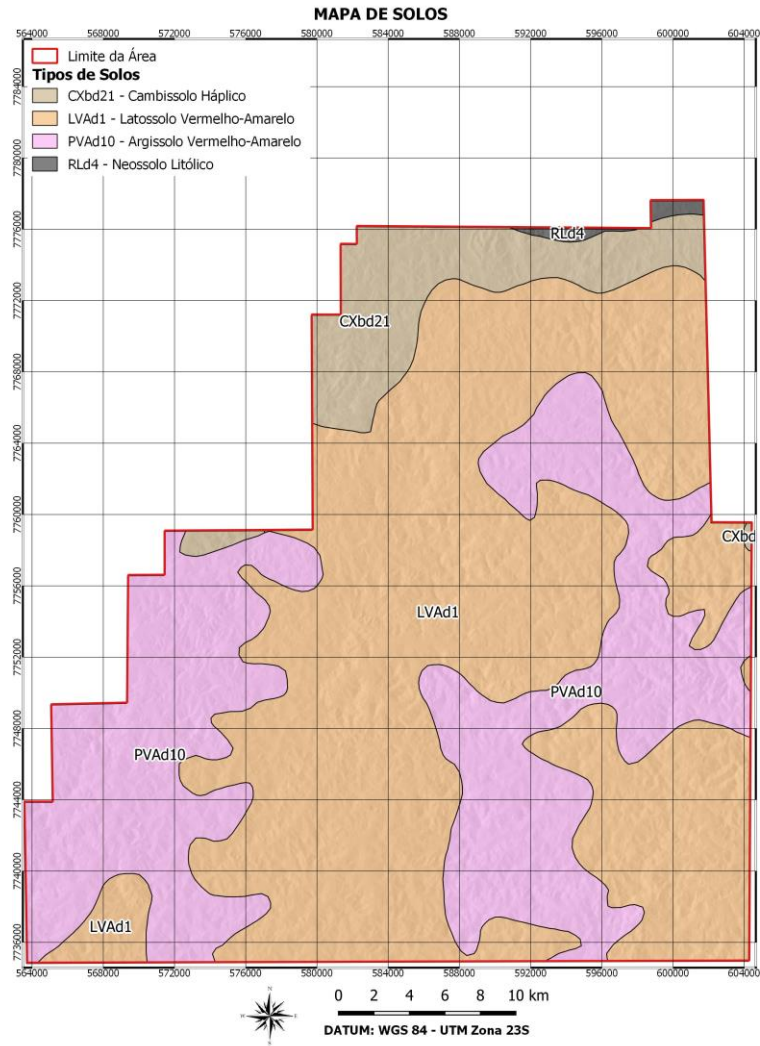


Figura 4.8 - Mapa de solos (UFV 2010).

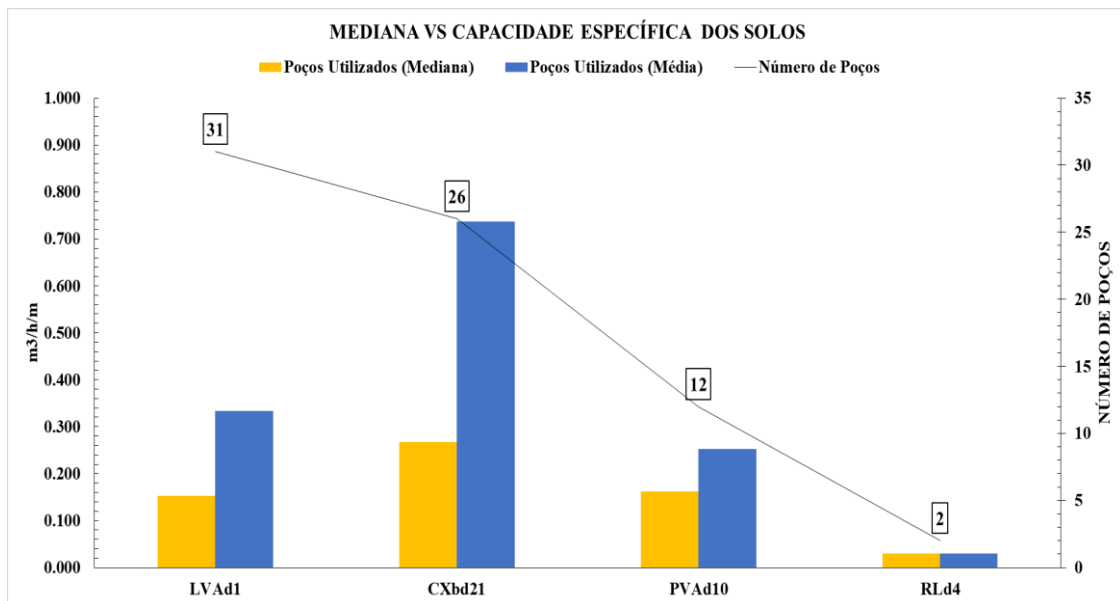


Figura 4.9 - Gráfico comparativo das médias e medianas dos poços totais e utilizados para cada solo e o número de poços encontrados em cada tipo de solo.

4.7 MAPA DE PRECIPITAÇÃO

O mapa de precipitação média anual (Figura 4.10) com as respectivas isoietas permite identificar a existência e distribuição das áreas com maior incidência de chuvas. A variação foi de 1305 a 1725 mm/ano com maior concentração na região nordeste da área, relacionada ao homoclinal serra do Curral e sinclinal moeda que possuem cotas mais elevadas. No domínio das rochas do Complexo Bonfim os valores ficaram abaixo 1500 mm/ano.

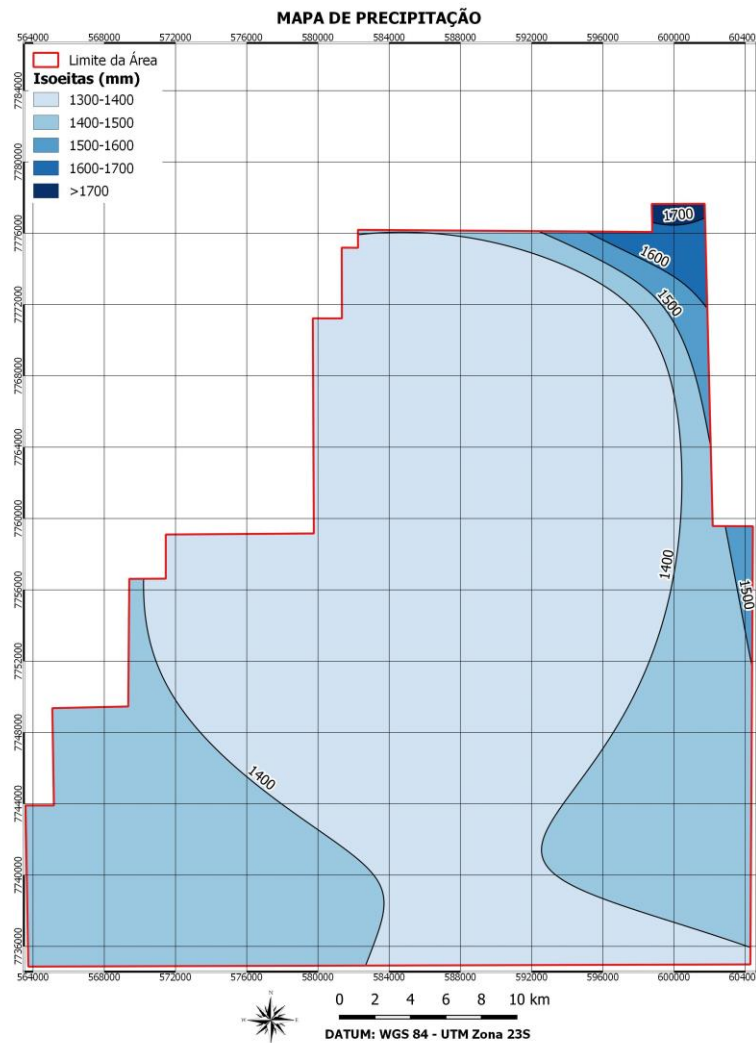


Figura 4.6- Mapa de Precipitação. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.

Na (Tabela 4.2) a precipitação média foi 1513 mm e a mediana 1516 mm, no portal HydroWeb oito estações foram utilizadas para interpolação e posterior geração de isoietas. Os períodos de medição iniciaram a partir de 1941 até 1976 e finalizaram entre 1995 até 2021.

Os períodos mais chuvosos se concentram de novembro a março e os secos de abril a outubro.

Tabela 4.2 – Estações pluviométricas.

Código	UTM - S	UTM - W	Cota (m)	Pluviosidade (mm)	Período
2043043	7774218.50	609721.12	1152.00	1648.00	09/1976 - 01/2021
2043002	7768336.63	610467.77	1350.00	1576.40	01/1941 - 01/2021
2044008	7766386.56	591856.26	761.00	1305.10	07/1941 - 11/2019
2044039	7786388.67	599367.99	815.00	1569.00	01/1961 - 11/1995
2044012	7783496.13	600052.33	1073.00	1756.30	01/1945 - 05/2015
2044026	7774079.27	554935.93	974.70	1428.40	04/1974 - 08/2020
2044009	7719217.67	559042.92	915.00	1464.50	03/1942 - 08/2020
2044007	7715082.50	596644.32	840.00	1361.40	07/1941 - 10/2020

4.8 MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DA TERRA

Os dados obtidos no MapBiomas são aplicáveis até a escala 1:100.000. Há predomínio de pastagens em toda área e em seguida manchas florestais, já as vilas e/ou cidades ocupam pequenas áreas com exceção do município de Brumadinho que é o maior dentre os inseridos na região de estudo e finalmente os afloramentos expostos ocupam as menores áreas (Figura 4.11).

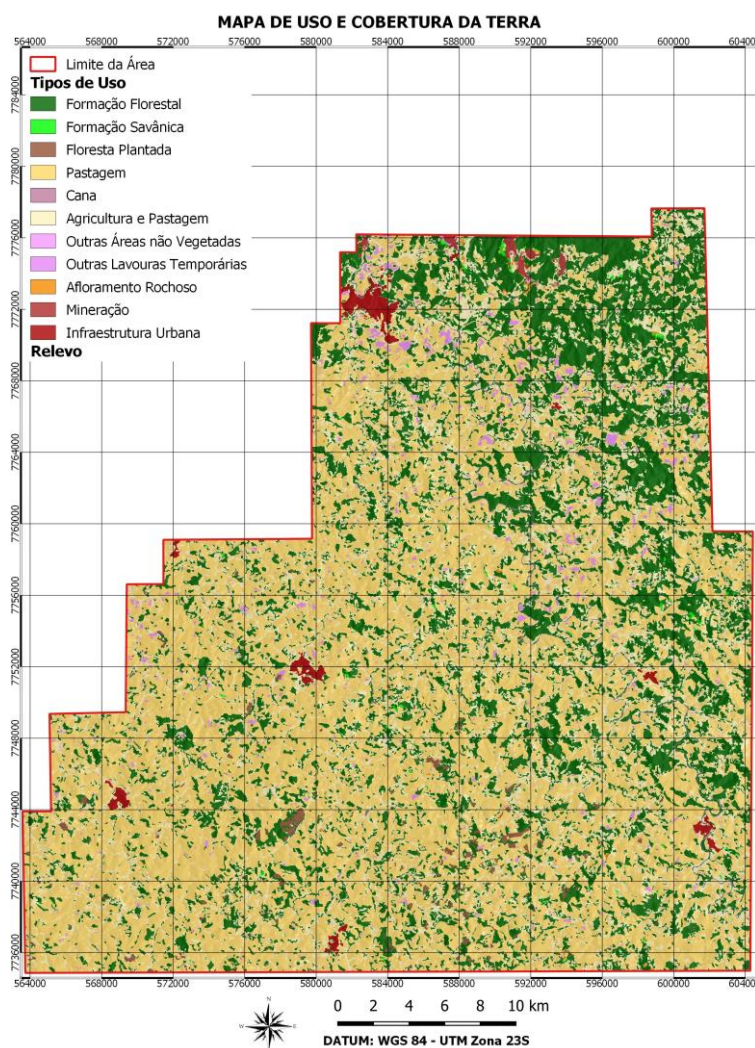


Figura 4.71- Mapa de Uso e Cobertura da Terra (MapBiomas 2021).

As informações foram agrupadas em quatro grupos em ordem decrescente conforme potencial para infiltração da água superficial. A primeira reuniu as formações florestais naturais com vegetação de pequeno a médio porte, a segunda com áreas utilizadas como pastagens e lavouras, a terceira com afloramentos rochosos e a última com áreas mais impermeáveis ocupadas por cidades e/ou construções humanas.

4.9 PROFUNDIDADE DOS POÇOS

A profundidade mínima encontrada foi 40 m e a máxima 204 m, com mediana e média muito próximas respectivamente, 100 m e 100.56 m e desvio padrão de 31.55 m (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Dados estatísticos da profundidade dos poços.

Variável	Mediana	Média	Mínimo	Máximo	Des. Padrão	Moda	Nº. Moda
Profundidade (m)	100	100.56	40	204	31.55	120	10

4.10 MAPA DO NÍVEL ESTÁTICO

O valor mínimo encontrado foi 0 m e a máxima 32 m, com mediana inferior à média respectivamente, 4 m e 6.15 m e desvio padrão de 6.90 m (Tabela 4.4). Os dados se mostraram muito heterogêneos e com dispersão elevada, mas 83% estão abaixo de 10 m.

Tabela 4.4 – Dados estatísticos do nível estático dos poços.

Variável	Mediana	Média	Mínimo	Máximo	Des. Padrão	Moda	Nº. Moda
Nível Estático	4	6.15	0.0	32	6.90	5	6

Na (Figura 4.12) observa-se dois padrões. No primeiro, esverdeado, o nível estático ficou restrito até a profundidade de 5.67 m. Houve o predomínio deste padrão em toda área, pois 17% dos valores foram superiores a 10 m ou, somente 4% acima de 30 m. O segundo padrão ocorre em regiões pontuais, a exemplo de poços localizados em Brumadinho BR-26 e Rio Manso RM-05 e RM-08 com nível estático superiores a 18.5 m, inclusive, na porção norte o BR-05 e BR-32 se destacaram com os maiores valores, possivelmente relacionados com contatos geológicos do Complexo Bonfim com rochas do supergrupo Rio das Velhas e Minas, além das coberturas cenozóicas.

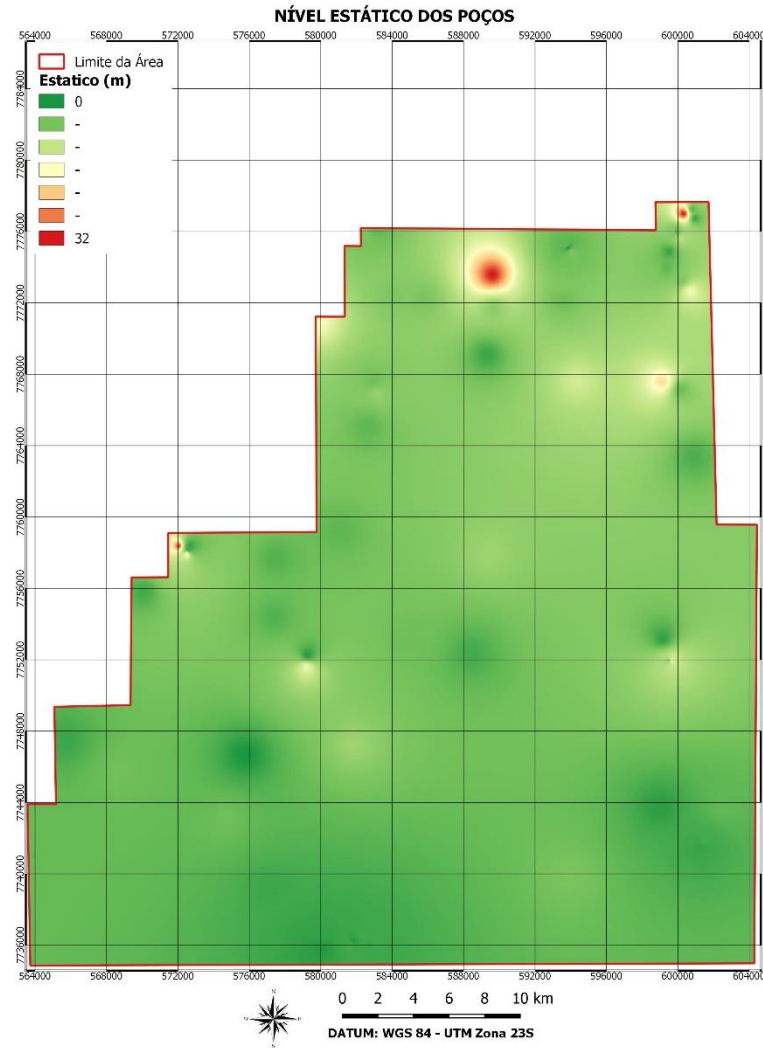


Figura 4.8 – Mapa com o nível estático. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.

4.11 MAPA DO NÍVEL DINÂMICO

A profundidade mínima encontrada foi 8.55 m e a máxima 137.48 m, com mediana e média muito próximas respectivamente, 47.50 m e 48.86 m e desvio padrão de 21.78 m (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Dados estatísticos do nível dinâmico dos poços.

Variável	Mediana	Média	Mínimo	Máximo	Des. Padrão	Moda	Nº. Moda
Nível Dinâmico	47.50	48.86	8.55	137.48	21.78	32	3

O predomínio na interpolação (Figura 4.13) foram valores abaixo da classe 73 m na tonalidade esverdeada na porção centro-norte, além de valores bem menores que a média no extremo oeste CR-03 com 17 m e leste BV-04 com 21 m.

Destacam-se regiões pontuais com cores quentes que apresentaram nível dinâmico superiores a 94 m, onde o poço BO-27 localizado na porção central da área com declividade de

7%, cota 787 m e próximo ao dique, assumiu o maior valor com 137.48 m. Os poços CR-01 com 97.64, PG-05 com 92.15 m, RM-08 com 84.22 m, BR-32 com 78.20 m e BV-03 com 73.30 m foram valores considerados bem acima da média com tons amarelados. No extremo norte-noroeste apesar da concentração alta de poços os níveis dinâmicos se mostraram um pouco mais homogêneos.

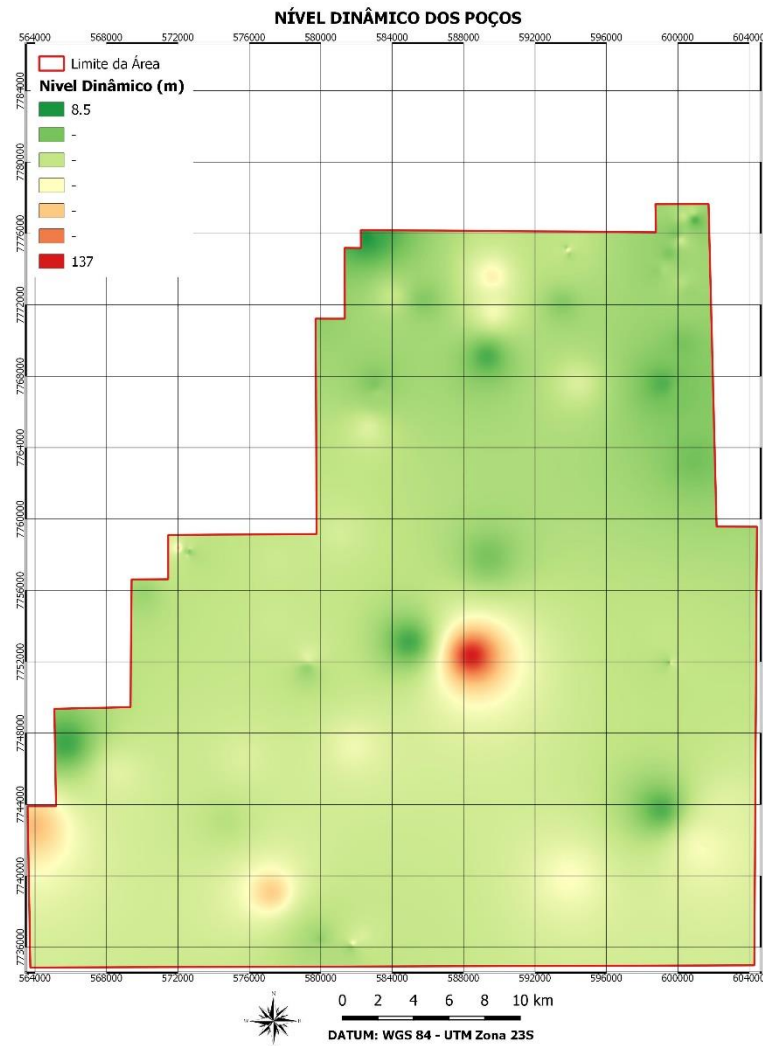


Figura 4.9 – Mapa com o nível dinâmico. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.

4.12 MAPA DA CAPACIDADE ESPECÍFICA E TRANSMISSIVIDADE ESTIMADA

Confirmando a tendência dos parâmetros hidráulicos, diante da quantidade de poços distribuídos em uma grande área, os parâmetros possuem desvio padrão alto, além da discrepância entre os valores de média, mediana e moda. O valor mínimo encontrado foi 0.013 m³/h/m e a máxima 5.938 m³/h/m, com mediana e média muito distantes respectivamente, 0.164

$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ e $0.459 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e desvio padrão de $0.931 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (Tabela 4.6). Aproximadamente 90% dos poços apresentaram capacidade específica menor que $1.0 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.

Tabela 4.6 – Dados estatísticos da capacidade específica dos poços.

Variável	Mediana	Média	Mínimo	Máximo	Des. Padrão	Moda	Nº. Moda
C.Específica	0.164	0.469	0.013	5.938	0.931	0.318	2

A (Tabela 4.7) apresenta os dados da transmissividade estimada a partir da capacidade específica. Os valores da mediana $4.55 \text{ m}^2/\text{dia}$, média $12.76 \text{ m}^2/\text{dia}$ e moda $8.85 \text{ m}^2/\text{dia}$ apresentam grande variação entre eles, confirmado pelo alto desvio padrão de $25.85 \text{ m}^2/\text{dia}$. Isso sugere que os outliers afetam substancialmente a análise estática dos dados disponíveis.

Tabela 4.7 – Dados estatísticos da transmissividade estimada a partir da capacidade específica dos poços.

Variável	Mediana	Média	Mínimo	Máximo	Des. Padrão	Moda	Nº. Moda
Transmissividade	4.55	12.76	0.35	164.94	25.85	8.85	2

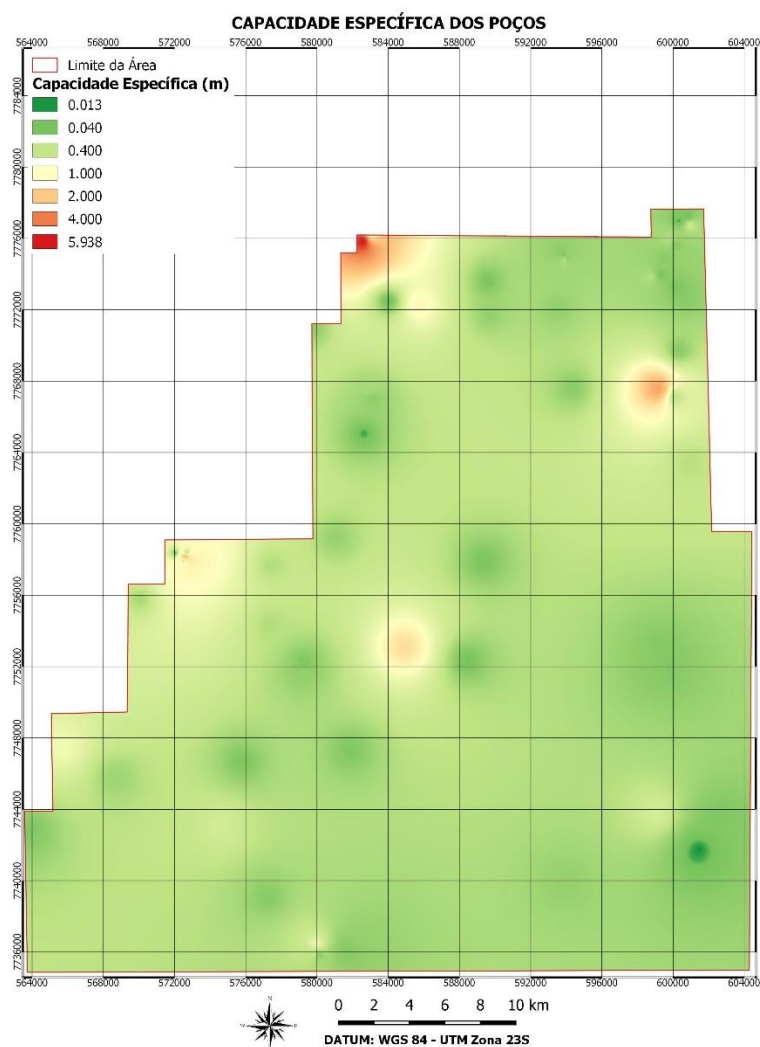


Figura 4.10 – Mapa com a capacidade específica. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.

Na (Figura 4.14) observa-se dois padrões de capacidade específica bem nítidos. O primeiro são poços com produtividade muito baixa a baixa com coloração esverdeada

distribuídas em toda área, já o segundo com tonalidade amarelo a vermelho BR-13, BR-26, RM-04 e RM-06 com muita alta e alta produtividade. Tal discrepância poderia ser explicada pela proximidade do contato com rochas do supergrupo Rio das Velhas e Minas em Brumadinho, já em Rio Manso contato com rochas do supergrupo Rio das Velhas e rochas máficas e ultramáficas da suíte Itaguara Rio Manso. Na folha Igarapé (CPRM 2013) destaca-se uma falha regional mapeada com direção noroeste-sudeste que poderia gerar zonas de fraqueza e consequente circulação de água, inclusive a continuidade desta estrutura está coincidente com o BO-03 que possui produtividade moderada.

A representação da produtividade dos poços por meio da curva de frequência acumulada possibilita comparar classes distintas, mas quanto menor a quantidade de dados mais irregular a curva se torna.

Na (Figura 4.15) o ortognaisse Souza Noschese é a litologia mais produtiva 2.350 m³/h/m seguido pelo gnaisse Alberto Flores 1.210 m³/h/m e granito Bituri 0.240 m³/h/m. Com 3 poços o granodiorito Santana do Paraopeba, simultaneamente com um poço o tonalito Samambaia e granito Barra do Gentio estas litologias não apresentaram dados suficientes para formarem curvas.

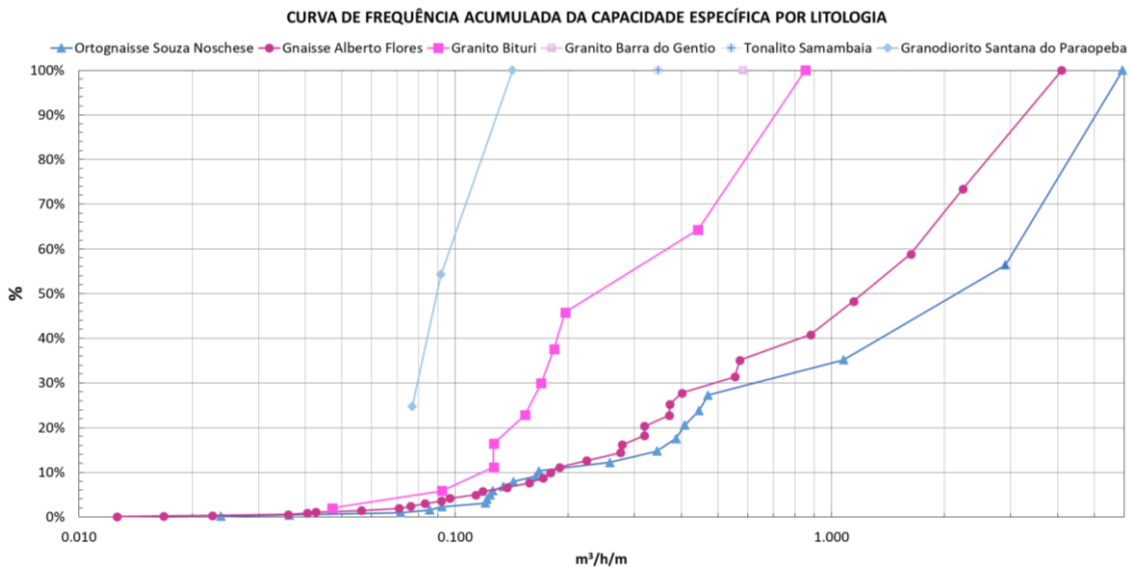


Figura 4.15 - Curvas de frequência acumulada da capacidade específica em cada litologia.

Em ordem decrescente (Figura 4.16) o valor da capacidade específica do cambissolo foi 2.410 m³/h/m, latossolo 0.620 m³/h/m e argissolo 0.310 m³/h/m. O neossolo está representado no extremo norte (Figura 4.6) com uma área muito reduzida e somente dois poços o que não representa uma curva.

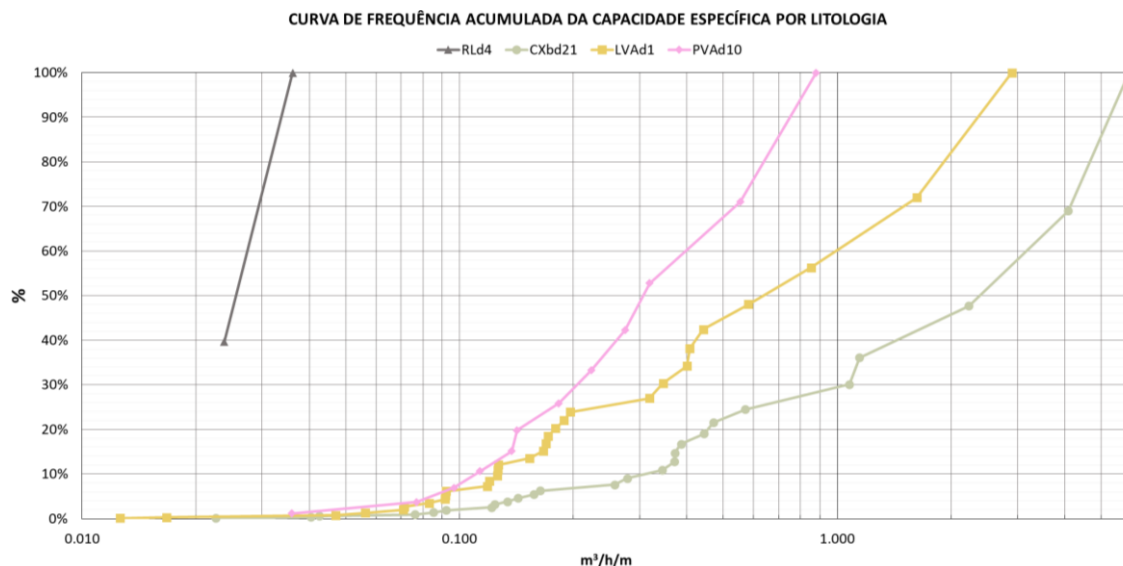


Figura 4.11 - Curvas de frequência acumulada de capacidade específica em cada tipo de solo.

O gráfico Profundidade Vs Capacidade Específica (Figura 4.17) não apresenta uma tendência da redução da capacidade específica com o aumento da profundidade. Entre 0.100 a 1.000 $m^3/h/m$ ocorre maior concentração dos poços, devido ao meio anisotrópico que são característicos dos aquíferos fraturados o aumento da profundidade não garante maior produtividade.

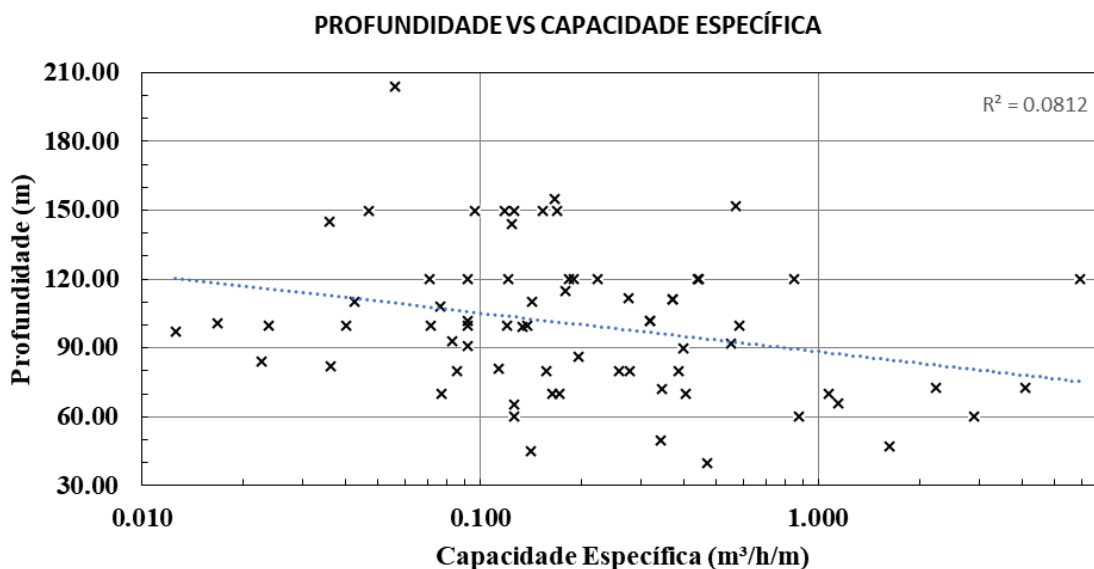


Figura 4.12– Gráfico de correlação entre a profundidade e capacidade específica.

O gráfico Nível estático Vs Capacidade Específica (Figura 4.18) possui dados dispersos, mas realça uma concentração dos poços com produtividade 0.100 a 1.000 $m^3/h/m$ e profundidade abaixo de 10 m.

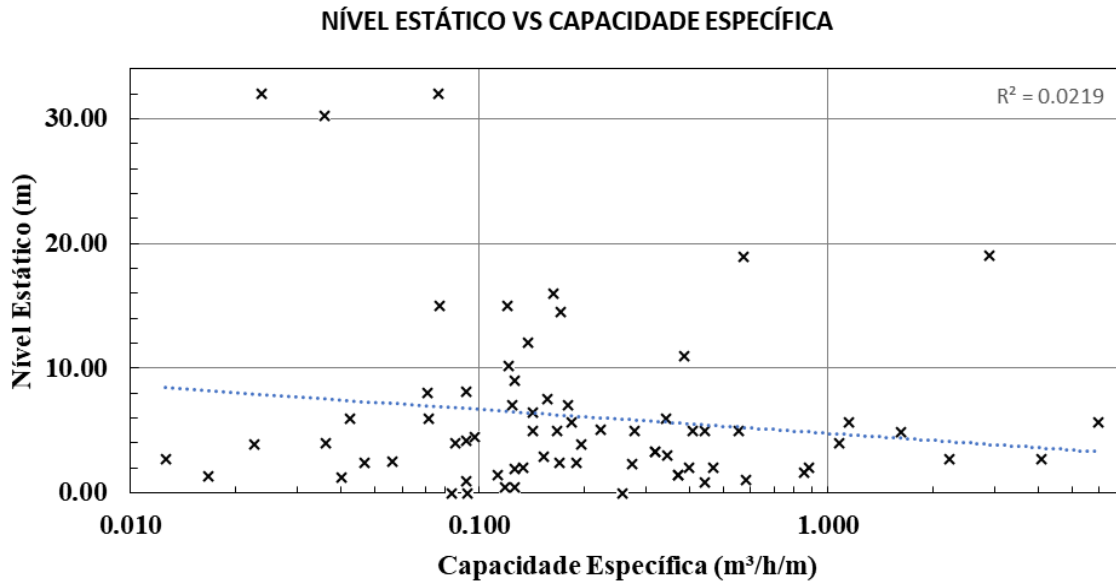


Figura 4.13 - Gráfico de correlação entre o nível estático e capacidade específica.

O gráfico Nível Dinâmico Vs Capacidade Específica (Figura 4.19) mostra uma pequena tendência na redução da capacidade específica com aumento do nível dinâmico. O nível dinâmico mostra-se com profundidades bem superiores ao nível estático, variando de 20 a 100 m e com um dado isolado superior a 130 m.

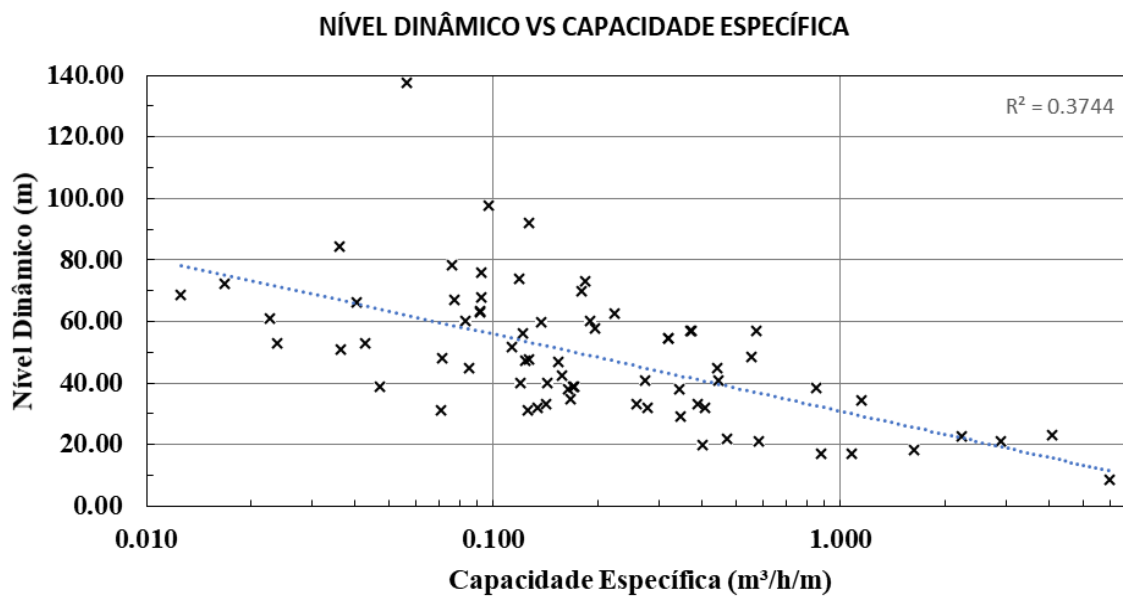


Figura 4.14 - Gráfico de correlação entre o nível dinâmico e capacidade específica.

4.13 MAPA DE FAVORABILIDADE

Foram realizadas várias tentativas, exclusões e alterações dos pesos relativos aos critérios e subcritérios em cada mapa. O resultado foi o mapa de favorabilidade (Figura 4.20) com aplicação do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

De acordo com a atribuição dos pesos para os critérios (Equação 4.1), foi realizada a álgebra no QGis com a ferramenta (Calculadora raster), que multiplicou em ordem decrescente de prioridade os seguintes mapas (declividade, uso e cobertura da Terra, densidade de lineamento, pluviosidade, geológico e solo), onde a taxa de consistência ficou inferior a 10%, ou seja, abaixo do limite máximo sugerido na metodologia.

$$[(\text{Declividade} * 0.354) + (\text{Uso e Ocupação da Terra} * 0.279) + (\text{Densidade de Lineamentos} * 0.167) + (\text{Pluviosidade} * 0.102) + (\text{Geológico} * 0.061) + (\text{Solo} * (0.037))]$$

Equação 4.1

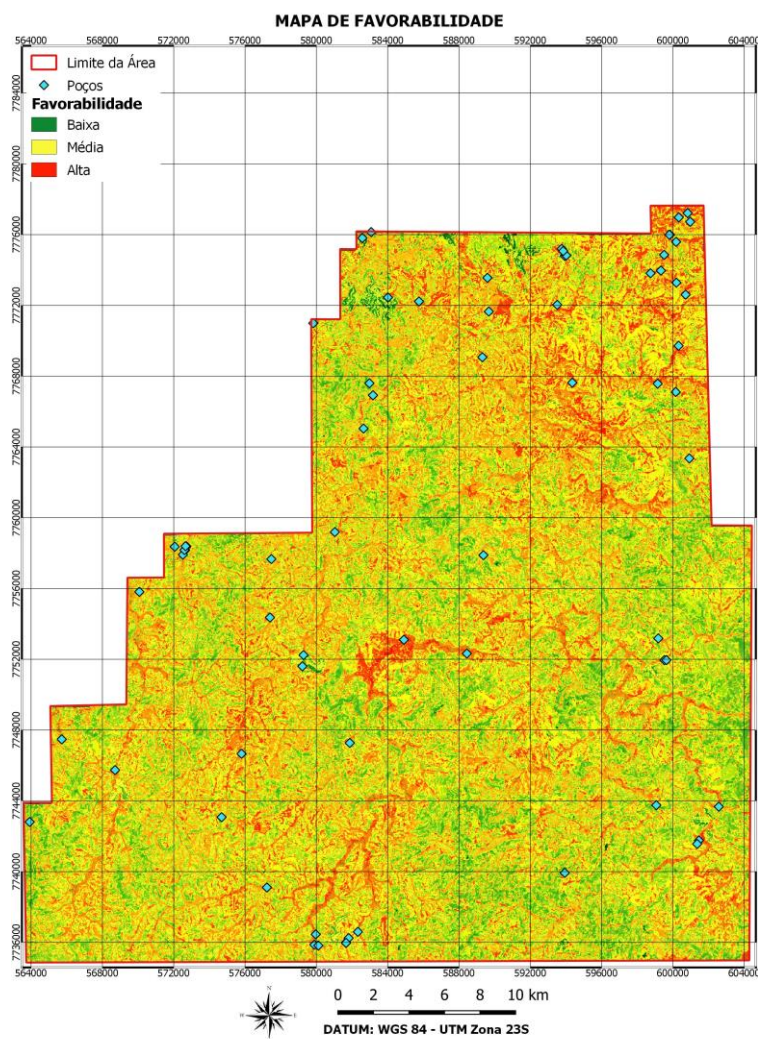


Figura 4.20 – Mapa de favorabilidade. Elaborado pelo autor na base cartográfica WGS84-23S.

O produto final apresentou uma distribuição favorável alta sensivelmente maior na porção norte. Na porção sul as regiões com maior potencial hidrogeológico ficaram restritas nos vales e na parte central houve uma junção de fatores que possibilitaram uma alta favorabilidade com declividades baixas e alta densidade de lineamentos. Claramente os mapas de declividade

(Figura 4.3) e uso e ocupação da Terra (Figura 4.11) foram realçados no produto final como áreas mais favoráveis, pois receberam maior peso na integração final. Em geral, as ocupações humanas apresentaram favorabilidade baixa devido a impermeabilização do solo.

A validação foi feita visualmente com os poços plotados, onde é possível verificar que preferencialmente as localizações estão nas áreas com média a alta favorabilidade.

CAPÍTULO 5

DISCUSSÃO

O mapa hipsométrico (4.2) permitiu definir que cotas inferiores a 810 m mostraram-se com melhor potencial produtivo. Bertachini (1987) reconhece que em fundos de vale a produtividade dos poços tende a aumentar, pela maior possibilidade de estarem encaixados em uma zona fraturada.

Não se observa uma clara semelhança entre o mapa hipsométrico (Figura 4.2) e declividade (Figura 4.3), contudo a utilização dos dois mapas auxilia definir zonas planas e topograficamente rebaixadas. Os poços com as maiores capacidades específicas (Figura 4.14) estão situados com declividade abaixo de 13%, desta forma foi adotado os maiores pesos nesse intervalo. Brito (2018) estudou a porção setentrional do Complexo Bonfim e adotou as quatro classes inferiores (Tabela 4.1) com maior potencial.

Apesar de alguns litotipos (basaltos e rochas carbonáticas) formarem melhores aquíferos que outros, a variação da produtividade em uma mesma rocha poderá ser maior que em litotipos distintos (Rocha 2005, Fernandes 2008). Aproximadamente 79% dos poços estão localizados em gnaisses e apresentaram uma tendência como mais produtivos. Fernandes *et al* (2016) encontrou no seu trabalho maiores produtividades nos gnaisses se comparados aos granitos, pois uma litologia com descontinuidades prévias (contatos, bandamento, foliação) favorece a existência de uma densidade de fraturas, já que os esforços tectônicos tendem a gerar maior quantidade de fraturas paralelas às antigas estruturas, ou seja, espera-se que gnaisses sejam mais produtivos que os granitos maciços. Rocha (2005) encontrou valores menores nos granitos quando comparado ao gnaiss. Já (Neves 2005) no seu estudo, apresentou uma curva de frequência acumulada onde o gnaiss e granito eram praticamente idênticos, pois rochas de granulação grossa e ricas em quartzo, como granitos e pegmatitos e quartzitos, tendem a ser mais produtivos.

O cambissolo apresentou maior produtividade, provavelmente relacionado ao fato de cobrir fundos de grotas e encostas de vale. Bertachini (1987) utiliza como critério a profundidade do revestimento dos poços e cita mantos de intemperismo superiores a 100 m, mas os valores mais frequentes situam-se entre 20 m e 50 m. Neves (2005) definiu no seu trabalho a profundidade de poços que só explotavam o manto de intemperismo com mediana de 20 m e média 30 m. Brito (2018) discute a importância do regolito e sua relação com a declividade, ou seja, nas regiões mais planas é maior o potencial de acúmulo da água.

Não houve relação direta dos poços com regiões densamente fraturadas, somente o BO-03 na porção central diverge deste padrão. Fernandes (2008) ressalta que lineamentos em

relevos suaves poderiam não correlacionar com as estruturas em subsuperfície. Talvez seja o motivo de não haver relação das zonas de densidade de lineamentos alta com as interseções das falhas e zonas de cisalhamento do mapa geológico. A utilização de métodos geofísicos deve auxiliar na interpretação de estruturas em subsuperfície, pois Fernandes (2008) destaca em seu trabalho que a transmissividade de fraturas verticais diminui a partir dos 300 m e as horizontais 30 m e que poços são aprofundados, em grande parte das vezes, quando não são obtidas produções em níveis mais rasos.

Com exceção das regiões próximas ao homoclinal serra do Curral e sinclinal Moeda (Figura 4.10) que apresentaram as maiores médias de pluviosidade, grande parte da área ficou situada com níveis de precipitação entre 1300 e 1500 mm. A quantidade de estações na área foi muito baixa, foi necessário ampliar o raio de busca para execução da interpolação já que outros mapas de pluviosidade consultados apresentaram uma escala muito reduzida. O estudo de Almeida (1999) encontrou precipitação média anual de 1445.1 mm na bacia do rio Paraopeba, clima com características tropicais e duas estações bem definidas. De outubro a março o período chuvoso e abril a setembro o período seco.

O uso e ocupação da Terra (Figura 4.11) reflete nas condições hidrogeológicas, fatores como desmatamento e impermeabilização reduzem a capacidade de infiltração das águas superficiais. Em geral, os poços estão localizados próximos das áreas com algum tipo de interferência humana, contudo corredores de vegetação nativa devem ser mantidos para garantir que haja infiltração e redução no carreamento do solo provocado pela erosão. O papel da vegetação está relacionado na quantidade de escoamento e infiltração, portanto as florestas são fundamentais na proteção do solo (Costa 2005).

Os dados estatísticos do banco de dados hidrogeológico demonstram grande heterogeneidade, o desvio padrão foi alto quando se analisou cada condicionante hidráulica. A explicação se deve ao número baixo de informações disponíveis ao público para consulta e podem relacionar-se com características dos aquíferos fraturados, que quando atingem regiões favoráveis a circulação da água subterrânea podem gerar vazões muito acima da média. Neves (2005) encontrou valores da mediana e média profundidade (150 m e 156 m), nível estático (10 m e 14 m), nível dinâmico (82 m e 91 m) e capacidade específica (0.07 m³/h/m e 0.24 m³/h/m). Os dados permitiram estimar a transmissividade a partir da (Equação 2.4), onde foi possível validar a razão 1.16 entre a transmissividade estimada e a capacidade específica.

O gráfico Nível Dinâmico Vs Capacidade Específica (Figura 4.19) apresenta uma pequena tendência na redução da capacidade específica com aumento do nível dinâmico, Neves (2005) discute essa mesma relação no seu trabalho. Os outros dois gráficos da capacidade específica com a profundidade e nível estático não apresentaram essa mesma correlação.

A análise dos fatores condicionantes relacionados aos aquíferos fraturados mostra-se bem complexa, além da insuficiência de dados que prejudicam uma interpretação mais realista. Portanto, o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) permite realizar avaliações e interpretações sobre áreas potencialmente promissoras para os recursos hidrogeológicos. No trabalho de Brito (2018) a metodologia foi validada e apesar da utilização de mapas diferentes, foi possível obter resultados consistentes no presente estudo. Portanto, o método mostra-se versátil pois diversos dados podem ser utilizados na geração de diferentes mapas de favorabilidade. Os resultados demonstraram correlação principalmente com o mapa de declividade e uso e ocupação da Terra. A distribuição das regiões com mais alta favorabilidade situaram-se abaixo 13% de declividade e com vegetação nativa ou áreas de lavouras. Áreas com interferência humana das cidades apresentaram os menores potenciais devido a impermeabilização do solo, já os afloramentos apresentaram potencial alto quando estavam com declividade inferior a 13%.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

A utilização do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) na geração do mapa de favorabilidade se mostrou satisfatória na área de estudo, pois reduziu a subjetividade dos pesos aplicados em relação aos critérios e subcritérios adotados. Ficou estabelecido que vegetação nativa e declividade são preponderantes na infiltração da água superficial. O índice de pluviosidade interfere diretamente na recarga, mas fatores como escoamento superficial e utilização do solo são preponderantes na taxa de infiltração. Já em relação aos lineamentos, a utilização da geofísica na determinação da continuidade em subsuperfície torna-se fundamental para a definição da locação dos poços. As descontinuidades das rochas necessitam de maior detalhe referente ao estudo das intercepções e se ocorre preenchimento dos espaços com minerais argilosos, tornando-as praticamente impermeáveis. Como esperado os gnaisses e granitos possuem potencial hidrogeológico semelhante. A representação dos solos mostrou-se controversa, provavelmente a localização dos poços e a presença de *outliers* geraram resultados não esperados.

Utilizando a declividade a maioria dos poços existentes estão situados na classe de relevo plano a ondulado, as maiores produtividades estão concentradas com declividade inferior a 13%.

Os mapas de densidade de lineamentos e suas respectivas rosetas estão concordantes com as principais direções estruturas regionais (zonas de cisalhamento, diques e falhas), destacando-se a direção noroeste-sudeste.

A tentativa de utilizar mapas interpolados pelo método IDW mostra-se promissora e com grande potencial na hidrogeologia para o entendimento dos parâmetros hidráulicos, porém a quantidades de dados e uma distribuição mais homogênea torna-se fundamental. O comportamento de determinados poços pôde ser explicado com a interpolação e a consequente avaliação com outras condicionantes geológicas, no mapa da capacidade específica interpreta-se regiões com produtividade moderada a muito alta na direção noroeste-sudeste coincidente com estruturas regionais (diques e falhas). Os mapas interpolados com os parâmetros hidráulicos não foram utilizados por causarem concentração de áreas favoráveis em poucos pontos e confrontar com outros critérios estabelecidos. Na medida que mais poços estejam incluídos, a utilização dos mapas interpolados poderá ser aplicado na metodologia AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

Devido a escala do mapa e concentração dos poços em determinado tipo de solo, as curvas de frequência acumulada não representaram os maiores potenciais hidrogeológicos. Já para os litotipos as curvas sugeriram os gnaisses com maior potencial.

A relação esperada com a diminuição da transmissividade das fraturas em níveis mais inferiores não foi demonstrada na correlação profundidade Vs capacidade específica. O nível estático Vs capacidade específica é mais disperso, mas até 5.67 m houve concentração dos poços mais produtivos com exceção do BR-26 que apresentou valor de 19 m. Já o nível dinâmico Vs capacidade específica mostrou boa correlação e níveis inferiores a 35 m se mostraram mais produtivos

No geral, a produtividade dos poços se manteve geralmente muito baixa com mediana de $0,164 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e a média $0.469 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.

A validação do produto final com os poços mostrou-se aderente com as regiões com média a alta potencialidade hidrogeológica, embora a quantidade encontrada de dados seja baixa.

O mapa de favorabilidade para uma análise regional mostra-se mais adequado, contudo sugere-se outros estudos de campo e aplicação de métodos geofísicos para confirmar se a metodologia aplicada e adoção dos pesos estabelecidos em cada mapa foi satisfatória.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmin F.F. & Marhak S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic Collision and Collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, **90**:29-58.
- Almeida F.F.M. 1977. O Cráton de São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, **7**:349-364.
- Almeida M. N. 1999. Potencial hídrico e quadro geo-ambiental como suportes ao gerenciamento dos recursos hídricos na Bacia do rio Paraopeba – MG. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 112 p.
- ASF – Data Search Vertex. Disponível em <https://vertex.daac.asf.alaska.edu>. Acesso: 26 setembro 2018.
- Beato D.A.C., Monsore A.L.M., Bertachini A.C. 2005. Hidrogeologia. In: CPRM/SEMAD/CEMIG (ed) *Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico: área de proteção ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte*. Belo Horizonte, Brasil. 8-A: p101.
- Carneiro M.A. 1992. *O complexo metamórfico Bonfim Setentrional - Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de continental do arqueano*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 233 p.
- Chemale Jr. F., Rosière C.A., Endo I. 1991. Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: um modelo. *Pesquisas em Geociências*, **18**:104-127.
- Custodio E. & Llamas M. R. 1983. *Hidrologia Subterrânea*. Barcelona. Omega, Barcelona, 2350 p.
- Diniz J.A.O., Monteiro A.B., da Silva R.C., de Paula T.L.F. 2014. *Manual de Cartografia Hidrogeológica*. CPRM, Recife, 219 p.
- Dorr II J.V.N. 1969. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U. S. Geological Survey*, **641-A**:1-110.
- DPS – Departamento de Solos / Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal de Viçosa. Disponível em http://www.dps.ufv.br/?page_id=742. Acesso: 26 out. 2018.
- Endo I. & Nalini H. A., 1992. Geometria e Cinemática das Estruturas Extensionais e Compressionais na borda Oeste do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, MG. In: Simpósio de Geologia, Ouro Preto, SBG, Anais, 6: 15-17.
- Endo I. 1997. *Regimes Tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e Áreas Adjacentes, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 382 p.
- Esri 2014. ArcGis 10.3 Enterprise Deployment – *An Esri Technical Paper*, USA, disponível em: <https://www.esri.com/pt-br/arcgis/products/arcgis-maps-for-office/download>. Acesso: 05 mar. 2018.
- Evangelista T.M., Veneziani P., Mendonça A.S.F., Teixeira E.C., 1998. Avaliação de etapas Intermediárias de Técnica de Sensoriamento Remoto Aplicada à Pesquisa de Água Subterrânea, em Relação ao seu Produto Final. In: IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Santos, p. 395-403.
- Farina F., Albert C., Martínez Dopico C., Aguilar Gil C., Moreira H., Hippert J.P., Cutts K., Alkmin F.F., Lana C. 2016. The Archean-Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero

- Ferrífero (Brasil): Current models and open questions. *Journal of South American Earth Sciences*, **68**:4-21.
- Feitosa F.A.C. & Filho J.M. (2 eds.). 2000. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Fortaleza, CPRM/REFO, LABID-UFPE, 391 p.
- Fernandes A.J. 2008. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. *Revista do Instituto Geológico de São Paulo*, **29**: 49-72.
- Filho C.O.A., Fonseca L.M.G. 2009. Lineamentos estruturais a partir de imagem Landsat e dados SRTM. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal, p. 3151-3158.
- Fonseca M.A. 1990. *O Sinclinal Ouro Fino: Análise descritiva e cinemática de um segmento do Sistema Fundão, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 120 p.
- Freeze R.A. & J.A. Cherry. 1979. *Groundwater*. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 604 p.
- Grohmann C.H., Campanha G.A. 2010. OpenStereo: Open Source, Cross-Platform Software for Structural Geology Analysis, *Institute of Geosciences – USP, São Paulo, SP*. Disponível em: <http://www.igc.usp.br/openstereo/download/>. Acesso: 15 jan. 2019.
- IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. 2003. Contribuição do IBRAM para o zoneamento ecológico-econômico e o planejamento ambiental dos municípios integrantes da APA-Sul RMBH – Brumadinho-MG. Relatório técnico, Belo Horizonte.
- IGA – Instituto de Geociências Aplicadas. 1982. *Mapeamento Geológico da RMBH - Folha Brumadinho (SF-23-X-A-II-2), escala 1:50.000*.
- Lana C., Alkmim F.F., Armonstrong R., Scholz R., Romano R., Nalini Jr H.R. 2013. The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, Southeast Brazil. *Precambrian Research*, **231**:157–173.
- Lawn B.R. & Wilshaw T.R. 1975. *Fracture of brittle solids*. Cambridge Press University, 204 p.
- Lobato L.M., Baltazar O.F., Reis L.B., Achtschin A.B., Baars F.J., Timbó M.A., Berni G.V., Mendonça B.R.V., Ferreira D.V. 2005. *Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa*. Belo Horizonte: CODEMIG, 2005. 1 CD-ROM.
- Macedo L. G. M., Silva M. V. A., Vitorio J. A., Abud M. C. 2014. Geoestatística aplicada a Hidrogeologia para confecção de mapas potenciométricos. In: *XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Belo Horizonte: ABAS, p. 12.
- Mapbiomas Brasil: Uso e cobertura do solo. Disponível em: <https://plataforma.mapbiomas.org/>. Acessado 10 de junho de 2021.
- Neves M.A. 2005. *Análise Integrada Aplicada à Exploração de Água Subterrânea na Bacia do Rio Jundiá (SP)*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, 200 p.
- Noce C.M. 1995. *Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 128 p.
- Ramalho-Filho A. & Beek K. J. 1995. *Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras*. 3. Ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 65 p.
- Rebouças, A. C., Braga, B., Tundisu, J. G. (eds.) 2006. *Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. 3. Ed. São Paulo: Escrituras, 749p.

- Reginato, P. A. R.; Strieder, A. J. 2004. Caracterização Hidrogeológica e Potencialidades dos Aquíferos Fraturados da Formação Serra Geral na Região Nordeste Do Estado Do Rio Grande Do Sul. In: *XIII Congresso Brasileiro De Águas Subterrâneas*, Cuiabá. Anais... São Paulo: ABAS, v.1
- Ribeiro L.M.A.L. & Baltazar O.F. 2013. *Mapa Geológico da Folha Igarapé em escala 1:100.000*. Belo Horizonte, Serviço Geológico do Brasil.
- Rocha G. 2005. *Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo, escala 1:1.000.000*. Texto explicativo. São Paulo, Departamento de Águas e Energia Elétrica, Instituto Geológico, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Serviço Geológico do Brasil, 119 p.
- Rocio M.A.R.1993. Caracterização da rede aquífera da região de Caçapava-Paraibuna com o emprego de técnicas de sensoriamento remoto. São José dos Campos: INPE, p. 107.
- Romano A.W. & Resende L.F.S. 2017. *Folha Ouro Preto, SF.23-X-A-III, escala 1:100.000, Projeto Triângulo Mineiro*. Texto explicativo. Belo Horizonte, Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais, 62 p.
- Sistema de informações hidrológicas. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb/apresentacao>. Acesso em: 25 de março 2016.
- Souza C.G. 2006. *Caracterização de Solos nos Arredores da Serra Três Irmãos e da Serra da Moeda-Quadrilátero Ferrífero/MG*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 110 p.
- Struckmeier, W.F. & Margat J. 1995. Hydrogeological Maps - A Guide and a standard legend. In: *International Contributions to Hydrogeology*, International Association of Hydrogeologists (IAH), International Contributions to Hydrogeology, v. 17, p. 177.
- UFV - CETEC - UFLA - FEAM. 2010. *Mapa de solos do Estado de Minas Gerais*. Texto explicativo. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 49 p.
- Varajão C.A.C. 1991. A questão da ocorrência das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, **21**:131-145.
- Vargas T.D., Gomes M.G., Belladonna, R., Adami, M.V. 2018. Aplicação do Interpolador IDW para Elaboração de Mapas Hidrogeológicos Paramétricos na Região da Serra Gaúcha. *Scientia cum Industria*, **6**:38-43.

ANEXOS

Anexo I – Planilha com o método AHP para geração do mapa de favorabilidade.

Anexo II – Planilha com o método AHP para o mapa de declividade.

Anexo III – Planilha com o método AHP para o mapa de uso e ocupação da Terra.

Anexo IV – Planilha com o método AHP para o mapa de densidade de lineamentos.

Anexo V – Planilha com o método AHP para o mapa de pluviosidade.

Anexo VI – Planilha com o método AHP para o mapa geológico.

Anexo VII – Planilha com o método AHP para o mapa de solos.

Anexo VIII – Tabela com os dados dos poços.

Anexo I – Planilha com o método AHP para geração do mapa de favorabilidade.

CRITÉRIOS	DECLIVIDADE	USO E OCUPAÇÃO	D. LINEAMENTO	PLUVIOSIDADE	GEOLÓGICO	SOLO		
DECLIVIDADE	1	2	3	4	5	6		
USO E OCUPAÇÃO	1/2	1	3	4	5	6		
LINEAMENTO	1/3	1/3	1	3	4	5		
PLUVIOSIDADE	1/4	1/4	1/3	1	3	4		
GEOLÓGICO	1/5	1/5	1/4	1/3	1	3		
SOLO	1/6	1/5	1/5	1/4	1/3	1		
TOTAL (SOMA DAS COLUNAS)	2.45	3.983333333	7.783333333	12.58333333	18.33333333	25		
MATRIZ NORMALIZADA								
DECLIVIDADE	0.408163265	0.50209205	0.385438972	0.317880795	0.272727273	0.24	VETOR DE EIGEN (λ)	%
USO E OCUPAÇÃO	0.204081633	0.251046025	0.385438972	0.317880795	0.272727273	0.24	0.354	35.44%
LINEAMENTO	0.136054422	0.083682008	0.128479657	0.238410596	0.218181818	0.2	0.279	27.85%
PLUVIOSIDADE	0.102040816	0.062761506	0.042826552	0.079470199	0.163636364	0.16	0.167	16.75%
GEOLÓGICO	0.081632653	0.050209205	0.032119914	0.026490066	0.054545455	0.12	0.102	10.18%
SOLO	0.068027211	0.050209205	0.025695931	0.01986755	0.018181818	0.04	0.061	6.08%
TOTAL (SOMA DAS COLUNAS)	1	1	1	1	1	1	0.037	3.70%
VETOR DE EIGEN	0.354	0.279	0.167	0.102	0.061	0.037		
TOTAL SOMA	2.45	3.983333333	7.783333333	12.58333333	18 1/3	25		
VETOR DE EIGEN*TOTAL SOMA	0.868240128	1.109474313	1.303459918	1.280847931	1.115269507	0.924923813		
VALOR PRINCIPAL DE EIGEN (λ)	6.60221561							
ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (CI)	0.12044312						NÚMERO DE CRITÉRIOS	6
ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIO (RI)	1.24							
TAXA DE CONSISTÊNCIA (CR=CI/RI)	0.097	9.71%						

Anexo II – Planilha com o método AHP para o mapa de declividade.

CRITÉRIOS	0 - 3	3 - 8	8 - 13	13 - 20	20 - 45	> 45		
0-3	1	1	3	5	7	9		
3 - 8	1	1	3	5	7	9		
8 - 13	1/3	1/3	1	3	5	7		
13 - 20	1/5	1/5	1/3	1	3	5		
20 - 45	1/7	1/7	1/5	1/3	1	3		
> 45	1/9	1/9	1/7	1/5	1/3	1		
TOTAL (SOMA DAS COLUNAS)	2.787301587	2.787301587	7.676190476	14.53333333	23.33333333	34		
MATRIZ NORMALIZADA							VETOR DE EIGEN (λ)	%
0-3	0.358769932	0.358769932	0.390818859	0.344036697	0.3	0.264705882	0.336	33.62%
3 - 8	0.358769932	0.358769932	0.390818859	0.344036697	0.3	0.264705882	0.336	33.62%
8 - 13	0.119589977	0.119589977	0.130272953	0.206422018	0.214285714	0.205882353	0.166	16.60%
13 - 20	0.071753986	0.071753986	0.043424318	0.068807339	0.128571429	0.147058824	0.089	8.86%
20 - 45	0.051252847	0.051252847	0.026054591	0.02293578	0.042857143	0.088235294	0.047	4.71%
> 45	0.039863326	0.039863326	0.018610422	0.013761468	0.014285714	0.029411765	0.026	2.60%
TOTAL (SOMA DAS COLUNAS)	1	1	1	1	1	1		
VETOR DE EIGEN	0.336	0.336	0.166	0.089	0.047	0.026		
TOTAL SOMA	2.787301587	2.787301587	7.68	14.53	23.33	34		
VETOR DE EIGEN * TOTAL SOMA	0.937044943	0.937044943	1.274302623	1.287095936	1.098955286	0.882844114		
VALOR PRINCIPAL DE EIGEN (λ)	6.41728785							
ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (CI)	0.08345757							
ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIO (RI)	1.24							
TAXA DE CONSISTÊNCIA (CR=CI/RI)	0.067	6.73%						

NÚMERO DE CRITÉRIOS 6

Anexo III – Planilha com o método AHP para o mapa de uso e ocupação da Terra.

CRITÉRIOS	VEGETAÇÃO NATIVA	PASTAGEM E LAVOURAS	AFLORAMENTOS ROCHOSOS	USO ANTRÓPICO	
VEGETAÇÃO NATIVA	1	2	5	9	
PASTAGEM E LAVOURAS	1/2	1	4	9	
AFLORAMENTOS ROCHOSOS	1/5	1/4	1	5	
USO ANTRÓPICO	1/9	1/9	1/5	1	
TOTAL (SOMA DAS COLUNAS)	1.811111111	3.361111111	10.2	24	
MATRIZ NORMALIZADA					VETOR DE EIGEN (λ)
VEGETAÇÃO NATIVA	0.552147239	0.595041322	0.490196078	0.375	0.503 50.31%
PASTAGEM E LAVOURAS	0.27607362	0.297520661	0.392156863	0.375	0.335 33.52%
AFLORAMENTOS ROCHOSOS	0.110429448	0.074380165	0.098039216	0.208333333	0.123 12.28%
USO ANTRÓPICO	0.061349693	0.033057851	0.019607843	0.041666667	0.039 3.89%
TOTAL (SOMA DAS COLUNAS)	1	1	1	1	
VETOR DE EIGEN	0.503	0.335	0.123	0.039	
TOTAL SOMA	1.811111111	3.361111111	10.2	24	
VETOR DE EIGEN * TOTAL SOMA	0.911163045	1.126603391	1.252514514	0.934092326	
VALOR PRINCIPAL DE EIGEN (λ)	4.22437328				
ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (CI)	0.07479109				NÚMERO DE CRITÉRIOS 4
ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIO (RI)	0.9				
TAXA DE CONSISTÊNCIA (CR=CI/RI)	0.083	8.31%			

Anexo IV – Planilha com o método AHP para o mapa de densidade de lineamentos.

CRITÉRIOS	BAIXA	MODERADA	ALTA	
BAIXA	1	1/3	1/5	
MODERADA	3	1	1/3	
ALTA	5	3	1	
TOTAL (SOMA DAS COLUNAS)	9	4.333333333	1.533333333	
MATRIZ NORMALIZADA				VETOR DE EIGEN (λ)
BAIXA	0.111111111	0.076923077	0.130434783	0.106 10.62%
MODERADA	0.333333333	0.230769231	0.217391304	0.260 26.05%
ALTA	0.555555556	0.692307692	0.652173913	0.633 63.33%
TOTAL (SOMA DAS COLUNAS)	1	1	1	
VETOR DE EIGEN	0.106	0.260	0.633	
TOTAL SOMA	9	4.33	1.533333333	
VETOR DE EIGEN * TOTAL SOMA	0.955406912	1.128824477	0.971130104	
VALOR PRINCIPAL DE EIGEN (λ)	3.05536149			
ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (CI)	0.02768075			NÚMERO DE CRITÉRIOS 3
ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIO (RI)	0.58			
TAXA DE CONSISTÊNCIA (CR=CI/RI)	0.048	4.77%		

Anexo V – Planilha com o método AHP para o mapa de pluviosidade.

CRITÉRIOS	1300-1500	1500-1700	>1700		
1300-1500	1	1/3	1/5		
1500-1700	3	1	1/3		
>1700	5	3	1		
TOTAL (SOMA DAS COLUNAS)	9	4.333333333	1.533333333		
MATRIZ NORMALIZADA				VETOR DE EIGEN (λ)	%
1300-1500	0.111111111	0.076923077	0.130434783	0.106	10.62%
1500-1700	0.333333333	0.230769231	0.217391304	0.260	26.05%
>1700	0.555555556	0.692307692	0.652173913	0.633	63.33%
TOTAL (SOMA DAS COLUNAS)	1	1	1		
VETOR DE EIGEN	0.106	0.260	0.633		
TOTAL SOMA	9	4.33	1.533333333		
VETOR DE EIGEN*TOTAL SOMA	0.955406912	1.128824477	0.971130104		
VALOR PRINCIPAL DE EIGEN (λ)	3.05536149				
ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (CI)	0.02768075	NÚMERO DE CRITÉRIOS 3			
ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIO (RI)	0.58				
TAXA DE CONSISTÊNCIA (CR=CI/RI)	0.048	4.77%			

Anexo VI – Planilha com o método AHP para o mapa geológico.

CRITÉRIOS	DEPÓSITOS	GNAISSE	GRANITO	XISTO		
DEPÓSITOS	1	4	4	8		
GNAISSE	1/4	1	3	5		
GRANITO	1/4	1/3	1	3		
XISTO	1/8	1/5	1/3	1		
TOTAL (SOMA DAS COLUNAS)	1.625	5.533333333	8.333333333	17		
MATRIZ NORMALIZADA					VETOR DE EIGEN (λ)	%
DEPÓSITOS	0.615384615	0.722891566	0.48	0.470588235	0.572	57.22%
GNAISSE	0.153846154	0.180722892	0.36	0.294117647	0.247	24.72%
GRANITO	0.153846154	0.060240964	0.12	0.176470588	0.128	12.76%
XISTO	0.076923077	0.036144578	0.04	0.058823529	0.053	5.30%
TOTAL (SOMA DAS COLUNAS)	1	1	1	1		
VETOR DE EIGEN	0.572	0.247	0.128	0.053		
TOTAL SOMA	1.625	5.533333333	8 1/3	17		
VETOR DE EIGEN*TOTAL SOMA	0.929851169	1.367683258	1.063661887	0.900537535		
VALOR PRINCIPAL DE EIGEN (λ)	4.26173385					
ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (CI)	0.08724462	NÚMERO DE CRITÉRIOS 4				
ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIO (RI)	0.9					
TAXA DE CONSISTÊNCIA (CR=CI/RI)	0.097	9.69%				

Anexo VII – Planilha com o método AHP para o mapa de solos.

CRITÉRIOS	LATOSSOLO	ARGISSOLO	NEOSSOLO	CAMBISSOLO	
LATOSSOLO	1	2	3	4	
ARGISSOLO	1/2	1	2	3	
NEOSSOLO	1/3	1/2	1	2	
CAMBISSOLO	1/4	1/3	1/2	1	
TOTAL (SOMA DAS COLUNAS)	2.083333333	3.833333333	6.5	10	
MATRIZ NORMALIZADA					
LATOSSOLO	0.48	0.52173913	0.461538462	0.4	VETOR DE EIGEN (λ)
ARGISSOLO	0.24	0.260869565	0.307692308	0.3	0.466
NEOSSOLO	0.16	0.130434783	0.153846154	0.2	0.277
CAMBISSOLO	0.12	0.086956522	0.076923077	0.1	0.161
TOTAL (SOMA DAS COLUNAS)	1	1	1	1	0.096
VETOR DE EIGEN	0.466	0.277	0.161	0.096	
TOTAL SOMA	2.083333333	3.833333333	6 1/2	10	
VETOR DE EIGEN*TOTAL SOMA	0.970457079	1.062371795	1.046956522	0.959698997	
VALOR PRINCIPAL DE EIGEN (λ)	4.03948439				
ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (CI)	0.01316146				NÚMERO DE CRITÉRIOS 4
ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIO (RI)	0.9				
TAXA DE CONSISTÊNCIA (CR=CI/RI)	0.015	1.46%			

Anexo VIII – Tabela com os dados dos poços.

CÓDIGO	UTM - S	UTM - W	NÍVEL DINÂMICO	NÍVEL ESTÁTICO (m)	PROF (m)	VAZÃO (m3/h)	CAPACIDADE ESPECÍFICA CALCULADA (m3/h/m)	TRANSMISSIVIDADE ESTIMADA (m2/h)
BV-01	7741762	601458	68.59	2.69	97.00	0.83	0.0126	0.35
BV-02	7741562	601358	72.40	1.37	101.00	1.19	0.0168	0.47
BV-03	7739930	593933	73.30	5.66	120.00	12.38	0.1831	5.09
BV-04	7743752	599065	21.00	1.00	100.00	11.65	0.5825	16.18
BV-05	7743670	602572	63.12	4.20	102.00	5.40	0.0916	2.55
BO-01	7752240	579279	63.60	0.90	100.00	5.76	0.0919	2.55
BO-02	7746661	575804	60.25	0.00	93.00	5.00	0.0830	2.31
BO-03	7753105	584909	18.28	4.85	47.30	21.81	1.6240	45.11
BO-04	7754363	577397	54.68	3.25	102.00	16.38	0.3185	8.85
BO-05	7747273	581874	67.90	8.13	91.00	5.50	0.0920	2.56
BO-06	7759192	581037	57.82	3.87	86.00	10.58	0.1961	5.45
BO-07	7757886	589370	31.00	8.00	120.00	1.63	0.0709	1.97
BO-08	7757666	577476	54.68	3.25	102.00	16.38	0.3185	8.85
BO-09	7743076	574686	48.36	5.00	92.00	24.00	0.5535	15.38
BO-10	7752326	588443	137.48	2.50	204.00	7.59	0.0562	1.56
BO-11	7751602	579217	39.00	14.50	70.00	4.20	0.1714	4.76
BR-01	7765044	582646	60.92	3.90	84.00	1.29	0.0226	0.63
BR-02	7775998	599831	33.00	0.00	80.00	8.50	0.2576	7.15
BR-03	7775596	600177	56.30	10.16	120.00	5.60	0.1214	3.37
BR-04	7767111	600157	32.00	5.00	70.00	11.00	0.4074	11.32
BR-05	7776979	600330	53.00	32.00	100.00	0.50	0.0238	0.66

BR-06	7772230	585757	34.50	5.67	66.00	33.00	1.1446	31.80
BR-07	7772036	593508	35.00	5.00	155.00	5.00	0.1667	4.63
BR-08	7777222	600826	50.97	3.96	82.00	1.70	0.0362	1.00
BR-09	7769723	600318	31.00	9.00	60.00	2.77	0.1259	3.50
BR-10	7766924	583177	42.50	7.50	80.00	5.50	0.1571	4.37
BR-11	7767602	582977	32.00	5.00	80.00	7.50	0.2778	7.72
BR-12	7770998	579829	38.00	16.00	70.00	3.60	0.1636	4.55
BR-13	7775812	582580	8.55	5.65	120.00	17.22	5.9379	164.94
BR-14	7774801	593929	41.00	5.00	120.00	16.00	0.4444	12.35
BR-15	7773290	600193	48.00	6.00	100.00	3.00	0.0714	1.98
BR-16	7772611	600712	40.00	15.00	100.00	3.00	0.1200	3.33
BR-17	7771657	589674	70.00	7.00	115.00	11.30	0.1794	4.98
BR-18	7775998	599802	33.00	11.00	80.00	8.50	0.3864	10.73
BR-19	7776147	583076	17.00	4.00	70.00	14.00	1.0769	29.91
BR-20	7767636	594355	60.00	12.00	100.00	6.60	0.1375	3.82
BR-21	7776729	600968	22.00	2.00	40.00	9.40	0.4700	13.06
BR-22	7775202	593757	40.00	5.00	110.00	5.00	0.1429	3.97
BR-23	7763356	600919	29.00	3.00	72.00	9.00	0.3462	9.62
BR-24	7774862	599505	32.00	2.00	99.00	4.02	0.1340	3.72
BR-25	7774831	594017	47.50	7.00	144.00	5.01	0.1238	3.44
BR-26	7767578	599144	21.00	19.00	60.00	5.80	2.9000	80.56
BR-27	7773821	598744	38.00	6.00	50.00	11.00	0.3438	9.55
BR-28	7773972	599326	45.00	4.00	80.00	3.50	0.0854	2.37
BR-29	7772454	584016	53.00	6.00	110.00	2.00	0.0426	1.18
BR-30	7775078	593844	76.00	0.00	120.00	7.00	0.0921	2.56
BR-31	7769076	589312	20.00	2.00	90.00	7.20	0.4000	11.11
BR-32	7773563	589596	78.20	32.00	108.00	3.52	0.0762	2.12
CR-01	7742806	563922	97.64	4.45	150.00	9.00	0.0966	2.68
CR-02	7745740	568710	62.58	5.02	120.00	12.85	0.2232	6.20
CR-03	7747478	565718	17.00	2.00	60.00	13.20	0.8800	24.44
MO-01	7753182	599179	51.60	1.45	81.00	5.68	0.1133	3.15
MO-02	7751958	599519	33.22	6.44	45.00	3.80	0.1419	3.94
MO-03	7751957	599635	67.00	15.00	70.00	4.00	0.0769	2.14
PG-01	7735867	579889	44.92	0.82	120.00	19.48	0.4417	12.27
PG-02	7735820	580114	47.70	0.40	65.50	5.98	0.1264	3.51
PG-03	7735967	581666	39.00	2.41	150.00	6.19	0.1692	4.70
PG-04	7735996	581666	39.00	2.41	150.00	1.72	0.0470	1.31
PG-05	7739102	577227	92.15	1.96	150.00	11.41	0.1265	3.51
PG-06	7736596	582330	60.09	2.41	120.00	10.91	0.1891	5.25
PG-07	7736241	581812	74.00	0.40	150.00	8.71	0.1184	3.29
PG-08	7736454	579967	38.40	1.66	120.00	31.32	0.8525	23.68
PG-09	7735973	581666	46.84	2.92	150.00	6.73	0.1533	4.26
RM-01	7758179	572604	66.17	1.28	100.00	2.62	0.0404	1.12
RM-02	7755815	570072	40.76	2.36	112.00	10.54	0.2745	7.62
RM-03	7758383	572710	56.80	1.42	111.00	20.56	0.3713	10.31
RM-04	7758168	572637	22.90	2.74	72.50	45.00	2.2321	62.00
RM-05	7757913	572514	57.18	18.95	152.00	21.82	0.5707	15.85
RM-06	7758179	572604	22.93	2.74	72.50	82.54	4.0882	113.56
RM-07	7758394	572663	56.87	1.42	111.00	20.55	0.3706	10.29
RM-08	7758366	572054	84.22	30.23	145.00	1.94	0.0359	1.00