



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Uso do Processo Analítico Hierárquico (PAH) e de fatores multi-influenciadores para avaliar as interconexões entre as águas superficiais e subterrâneas numa pequena bacia hidrográfica em Minas Gerais.

Milena Stefany Lage Almeida¹, José Augusto Costa Gonçalves²

¹Mestranda do Programa de Pós-graduação em Regulação e Gestão de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI, Itabira, MG. ²Professor Associado do Instituto de Ciências Puras e Aplicadas da Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI, Campus de Itabira, MG. E-mail: jaucoستا@unifei.edu.br (Autor Correspondente)

Artigo recebido em 05/02/2024 e aceito em 28/11/2024

RESUMO

A água que integra a paisagem e garante a perenidade de diferentes sistemas ambientais é um dos recursos primordiais para o pleno desenvolvimento das atividades humanas. Ainda que em diferentes matrizes, superficial e subterrânea, a água deve ser avaliada e gerenciada de forma integrada. A sub-bacia do rio do Peixe-MG está em sua maior parte assentada sob terrenos cristalinos, um ambiente composto por falhas, fraturas e rocha alterada nas quais permite a percolação e armazenamento das águas. Para entender o potencial das águas subterrâneas na região e sua contribuição nas águas superficiais, faz-se necessário, investigar as trocas quantitativas entre esses dois escoamentos. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo identificar as interconexões hidráulicas entre o fluxo superficial e subterrâneo, por meio do estudo dos parâmetros hidrodinâmicos, caracterização geológica-estrutural e análise multicritério. Adicionalmente, e por meio da análise multicritério verificou-se influência principalmente das camadas de solo e geologia na definição das áreas de maior potencialidade hídrica subterrânea da sub-bacia.

Palavras-chave: Interconexões Hidráulicas. Água subterrânea. Lineamentos.

Use of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and multi-influenced factors to evaluate the interconnections between surface and groundwater in a small watershed in Minas Gerais.

ABSTRACT

The water that integrates the landscape and guarantees the perpetuity of different environmental systems is one of the primary resources for the full development of human activities. Although in different matrices, surface and groundwater, water should be evaluated and managed in an integrated way. The sub-basin of the Peixe River - MG is mostly located on crystalline rocks, an environment composed of faults, fractures and altered rock in which allows the percolation and storage of water. To understand the potential of groundwater in the region and its contribution to surface water, it is necessary to investigate the quantitative exchanges between these two flows. Thus, this work aims to identify the hydraulic interconnections between surface and groundwater flow through the study of hydrodynamic parameters, geological-structural characterization and multicriteria analysis. Additionally, and through the multicriteria analysis it was verified the influence mainly of the soil layers and geology in the definition of the areas of greater groundwater hydric potentiality of the sub-basin.

Keywords: Hydraulic interconnect. Groundwater. Lineament.

Introdução

Nos estudos hidrogeológicos, a variável do ciclo hidrológico de maior importância é a infiltração, sendo a variação de armazenamento do aquífero, uma resposta a sua taxa. Este processo ocorre, enquanto a superfície do solo não se satura,

e é controlado pelas tensões capilares nos poros e pela gravidade. Sua saída desse sistema pode ser feita por meio da transpiração das plantas ou percolação para camadas mais profundas do solo, alcançando os aquíferos e, dessa forma, contribuindo para o escoamento de base dos rios (Winter, 1998).

Entende-se que a aplicação do balanço hídrico pode ocorrer em escala local, em uma planta de operações ou um trecho de um curso d'água, como também pode ser calculado para uma escala regional, sendo capaz de definir o comportamento hídrico em toda uma bacia hidrográfica. Logo, têm-se a principal variável de entrada que corresponde ao volume concentrado no tempo (precipitação) e a saída de água ocorrendo de maneira distribuída no tempo (escoamento). Neste processo, há o escoamento superficial e subterrâneo, designados, respectivamente, como escoamento rápido e lento (Teixeira et al., 2009; Abdul-Ganiyu e Prosper, 2021).

Na matriz da água superficial, a velocidade é diretamente proporcional a inclinação da superfície. Dessa forma, quanto maior a diferença de potencial, dada uma distância lateral constante, maior será a velocidade do fluxo. No fluxo da água subterrânea, necessita-se considerar, além da inclinação do nível d'água, a permeabilidade do subsolo e a viscosidade da água (Pandey et al., 2020; Alqadhi et al., 2021; Gonçalves et al., 2020).

Após infiltrar no solo ou compartimentos geológicos, as águas subterrâneas podem apresentar dois comportamentos distintos: permanecer na zona insaturada/vadosa, ou atingir o aquífero, que compõe a zona saturada, onde os espaços vazios entre os poros são totalmente preenchidos (Lin et al., 2018; Loh et al., 2020).

As águas subterrâneas encontram-se em quantidade na maior parte do mundo, entretanto, sua qualidade é um fator limitante para utilização. As necessidades percebidas para este recurso pode ocorrer a nível de indivíduo, grupo ou ecossistema, (Arabameri et al., 2021; Cherepansky et al., 2005).

A qualidade das águas subterrâneas das rochas cristalinas, basicamente, está associada a três processos: tempo de residência, condições de fluxo e qualidade da água de recarga. O tempo de residência e as condições de fluxo, que controlam as condições de dissolução, estão associados diretamente com a geologia (litologia, estrutura e tectônica), enquanto existe uma grande quantidade de variáveis que influenciam na qualidade da água de recarga (Tafila et al., 2022; Poeter et al., 2020; Elmahdy et al., 2020).

As reações biogeoquímicas que ocorrem comumente entre essas águas são: reação ácido-base, precipitação e dissolução de minerais, sorção e troca de íons, reações de oxidação-redução, biodegradação, dissolução e exsolução de gases (Feitosa, 2008).

No Brasil, o processo de gestão integrada do recurso natural primordial, a água, ainda está em fase de consolidação (ANA, 2013; BRASIL, 2022), em face das dificuldades naturais inerentes a complexidade e dimensão dos sistemas ambientais e pelos desafios imputados pela ação antrópica sobre esses diferentes sistemas.

As características climáticas, morfológicas e geológicas, influenciam diretamente nos aspectos quantitativos, qualitativos e de transporte da água no sistema superficial e subterrâneo. As modificações inerentes as atividades antrópicas, também devem ser contabilizadas, como por exemplo, o bombeamento das águas subterrâneas que pode alterar o comportamento da descarga, induzir o fluxo do curso d'água e reduzir a água superficial disponível e a contaminação direta ou indireta, (Benoit et al., 2019; Sophocleous, 2002).

Ainda que o processo de gestão ocorra na maior parte do território nacional de forma separada, a gestão integrada faz-se necessária pelos seguintes motivos: o ciclo hidrológico é naturalmente integrado; a valoração hídrica aplicada atualmente não é a mais realista; necessidade de agir proativamente para evitar futuros conflitos de disponibilidade; uso sustentável dos recursos hídricos para evitar a possibilidade de danos ambientais importantes; e cumprimento do aparato legal, (Seidu et al., 2019; Abebrese et al., 2022).

De acordo com o Plano de Ação-Estratégia Nacional para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos 2022-2040 (BRASIL, 2022), as análises realizadas para concessão das outorgas consideram apenas a disponibilidade hídrica superficial e, no caso de poços tubulares, a vazão de teste ou a reserva do aquífero. Esta análise dissociada pode gerar uma disponibilidade superestimada, uma vez que as vazões mínimas de referência para a concessão da outorga de águas superficiais são em sua maior parte provenientes do escoamento de base provido pelo aquífero.

A outorga é o instrumento legal que assegura ao usuário o direito de utilizar os recursos hídricos, e vista pela ótica da matriz subterrânea, um mecanismo capaz de garantir a sustentabilidade e proteção dos aquíferos e a qualidade da captação dessas águas, de modo que os critérios para a sua emissão deverão ser baseados em estudos sobre a disponibilidade hídrica subterrânea e a vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação, (IGAM, 2021; Guimarães et al. (2010). Dessa forma, antes da liberação de uso, estudos sistemáticos no âmbito das duas matrizes deverão ser realizados.

A aplicação das tecnologias para Gestão Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) vem possibilitar a garantia para o atendimento de metas de desenvolvimento sustentável e implica em subsidiar políticas públicas eficientes para a proteção do meio ambiente, especialmente em função de a bacia hidrográfica representar a unidade de gestão ambiental por excelência (ANA, 2016).

No Brasil, alguns estudos foram conduzidos com a finalidade de melhor gerenciar o uso dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos e demonstrar as interações entre estes compartimentos. Neste sentido, o estudo de Gonçalves et al., (2023), pautou-se nos seguintes objetivos específicos:

- *Identificar as características hidrogeológicas dos aquíferos da sub-bacia;
- *Identificar as características hidrológicas dos principais corpos d'água;
- *Determinar os parâmetros hidrodinâmicos para a utilização de modelos de simulação;
- *Estudar a relação existente entre as águas superficiais e subterrâneas;
- *Definir critérios para outorga e gerenciamento de águas subterrâneas.

O intercâmbio entre as matrizes pode ser conhecido por meio de diferentes técnicas: 1) aérea, por meio de sensoriamento remoto; 2) caracterização da temperatura por perfil térmico; 3) traçadores; 4) estudo geoquímico; 5) e instrumentos de monitoramento, como piezômetros, medidores de infiltração, medidores de fluxo de água e rede de poços (Rosenberry e Labaugh, 2008; Hakim et al., 2022; Alipour et al., 2018).

A maior complexidade dos ambientes fraturados sugere metodologias mais robustas para estabelecer o comportamento das águas. Em se tratando deste contexto geológico, segundo Feitosa (2008), o fluxo das águas subterrâneas ocorre por meio de descontinuidades do maciço rochoso, e devido à intersecção entre elas, existe a comunicabilidade do aquífero.

Do ponto de vista hidrogeológico, a condutividade hidráulica em uma rocha cristalina/aquífero fissural pode apresentar ordem de grandeza bastante variável em uma curta distância, visto que este parâmetro depende da presença e características das estruturas geológicas. Logo, a compreensão da geologia estrutural torna-se uma importante ferramenta para compreender as descontinuidades mais favoráveis para a percolação das águas, armazenamento, ou atuar como barreira de fluxo (Singhal e Gupta, 2010).

Com base nisso, o potencial hidrogeológico pode ser investigado por meio da caracterização dessas estruturas.

Para avaliar espacialmente as estruturas contidas do substrato rochoso é necessário entender as características do terreno em superfície que representariam estruturas geológicas. As descontinuidades, também tratadas aqui como lineamentos na paisagem, correspondem a feições únicas ou um conjunto delas, que refletem elementos estruturais do arcabouço geológico como direção de camadas, xistosidade, falhas e fraturas.

Os lineamentos são estruturas regionalmente penetrativas (Tipo 1) e estruturas rúpteis (Tipo 2). Aos lineamentos do Tipo 1 associou-se feições geomorfológicas positivas (quebras positivas), que correspondem a feições bastante salientes no relevo, arranjada de forma linear ou levemente curva, apresentando-se de forma paralela constituindo cristas simétricas ou levemente assimétricas (Fossen, 2017).

As imagens de satélite para a coleta de informações morfoestruturais leva em consideração que a quantidade de sombreamento de uma feição topográfica está relacionada principalmente a elevação solar. Esta quando de baixo ângulo produz um maior sombreamento, destacando possíveis lineamentos. Linhas de diferentes tonalidades no solo, alinhamento da vegetação, vales retilíneos encaixados e cumes alinhados também são características que orientam na demarcação dos lineamentos (Muldoon e Bradbury, 2005).

Com a geologia estrutural é possível mensurar a relação entre estruturas e a produção do aquífero. Para isso, é feita a análise da produtividade do poço por meio da variável capacidade específica que, por sua vez, corresponde à vazão retirada por metro rebaixado do nível d'água do poço ($m^3/h/m$). Logo, antes de compreender a dinâmica do recurso hídrico, é necessário compreender o padrão e a natureza dos lineamentos (Singhal e Gupta, 2010; Jakeman et al., 2016).

O método do Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process* - AHP), proposto pelo matemático Thomas Saaty, consiste no estabelecimento de critérios e seus respectivos pesos, que tenham influência direto no mapa de interesse (objetivo pretendido), que neste caso é o mapa de potencialidade hídrica subterrânea. O método é aplicado seguindo as seguintes tarefas: definição da problemática; seleção dos critérios; hierarquização dos critérios na matriz de julgamento; análise paritária da matriz $n \times n$, onde

n é o quantitativo de critérios. Neste momento, é atribuído a cada célula da matriz um valor que condiz com a intensidade de importância do parâmetro da linha (i) em relação a coluna (j), destacando que cada elemento de nível inferior afeta todos os elementos do nível superior; cálculo do índice de consistência (IC), que define a coerência dos julgamentos realizados conforme fórmula abaixo. Quanto mais próximo de zero, maior a consistência global da matriz (Saaty, R. W. 1987; Saaty, T. L. 1977).

Material e métodos

Os materiais utilizados foram recursos computacionais, sendo eles, programas para análises estatísticas (Excel versão 16), geração de conteúdo gráfico (Excel versão 16 e Power Bi versão 2.10) e produção de mapas e diagramas (QGIS versão 3.0.4, ArcGis 10.8 e Stereonet). A utilização dos dois programas GIS, derivou-se da necessidade de utilizar um para tratamento da imagem Alos (QGIS) e o outro, para o processamento das etapas do trabalho, como extração dos lineamentos de análise hierárquica multicritério. O método aplicado baseou-se em quatro etapas: (1) caracterização da área de estudo; (2) aquisição, tratamento e integração dos dados; e (3) geração do mapa de potencialidade hídrica. A esquematização detalhada dessas etapas pode ser visualizada na Figura 1.

Além disso, realizou-se a seleção de dados secundários da bacia hidrográfica, à saber: malha hidrográfica (ANA/IGAM), outorgas (IGAM), pedologia (FEAM/UFV), geologia (UFV/CPRM + colaboradores), hidrogeologia (CPRM), modelo digital de elevação *Alos Palsar* (ASF DAAC) e imagem do satélite Sentinel.

O acervo de dados dos poços alocados na sub-bacia do Rio do Peixe foi obtido por meio do

IGAM e da SEMAD. A integração das diferentes bases de dados permitiu a complementação dos dados dos poços tubulares.

Os lineamentos foram feitos a partir da imagem do modelo digital de elevação do *Alos Palsar*, com resolução espacial de 12,5 metros. Foram aplicados os sombreamentos nos azimutes de insolação de 0°, 45°, 90° e 135° a fim de destacar as feições das estruturas nos pontos cardeais e colaterais, N-S, NE-SW, E-W e SE-NW.

A vetorização dos lineamentos por meio da fotointerpretação ocorreu no software ArcGis 10.8, na escala de 1:100.000, e de forma a complementar, foi utilizada a imagem do *software* Google Earth, a fim de validar os resultados com o ajuste da topografia, utilizando a função de exagero vertical disponibilizada no software, permitindo dessa forma, a visualização dos lineamentos de forma mais realista.

Em seguida, utilizando a extensão AzimuthFinder 1.1 foram extraídos os azimutes por meio do método de frequência dos comprimentos dos lineamentos. Tais informações foram exportadas em formato txt e importadas no programa online Stereonet para geração do diagrama de roseta da sub-bacia do Rio do Peixe.

O mapa de potencialidade hídrica indicará locais onde há interação da água superficial e subterrânea. Para isto, deverá ser aplicada uma rotina de mapeamento para classificar a rede de fluxo superficial em função de características que influenciam o comportamento do fluxo subterrâneo.

Com base nos resultados dessas interações, será feito um mapa de potencial hídrico subterrâneo utilizando a ferramenta *Álgebra de mapas* do ArcGis. A cada camada considerada, deve-se atribuir uma significância para cada um de seus critérios, Figura 1.

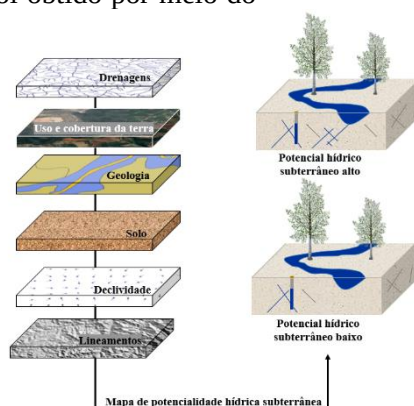


Figura 1. Critérios adotados para geração do mapa de potencialidade hídrica subterrânea segundo análise AHP

A bacia do rio do Peixe representa a maior área no município de Itabira. Pertencente a Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Rio Piracicaba (UPGRH-DO2), a bacia fica localizada no médio Piracicaba, entre as coordenadas UTM, 672 e 714 km, direção Oeste-

Leste, 7812 e 7840 km, direção Sul-Norte, possui uma área de drenagem de 410 km² e seus afluentes (Conceição, Candidópolis, Água Santa, Cachoeira, Santa Cruz, Goiabeira, São José e Cabral) convergem para o denominado Rio do Peixe, Figura 2.

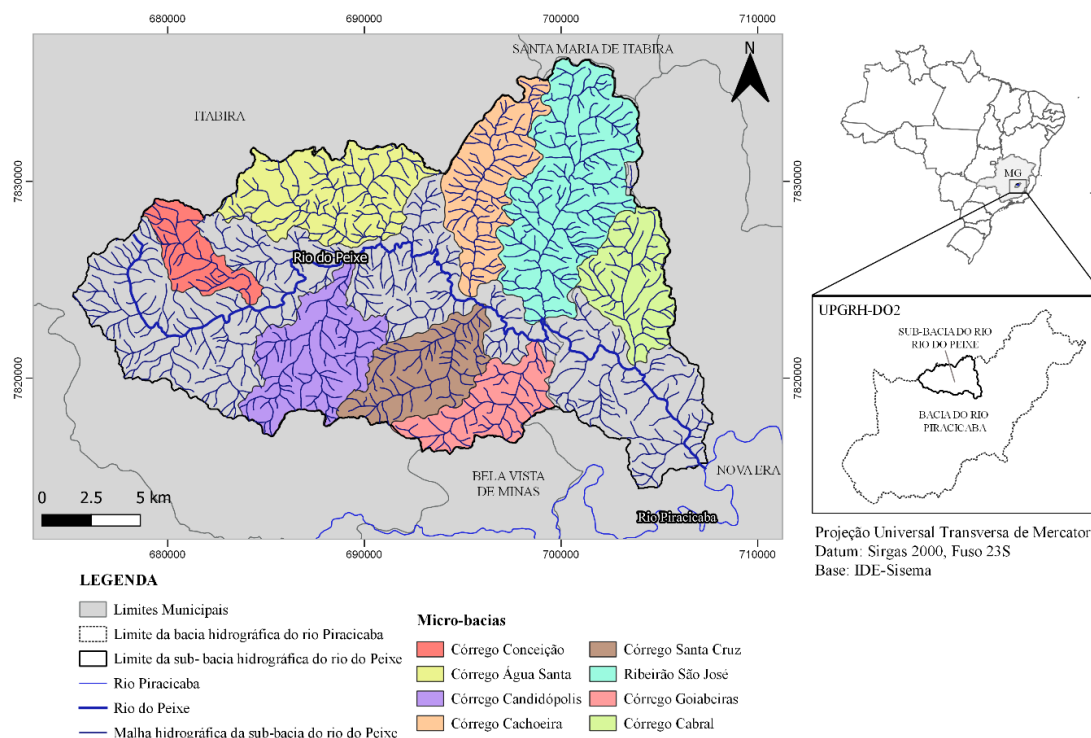


Figura 2. Delimitação da bacia hidrográfica do Rio do Peixe

A extensão do curso d'água principal é de 53 km. No seu trajeto desenvolve uma direção predominante oeste-leste possuindo uma declividade equivalente da ordem de 0,35 %. Os principais afluentes do Rio do Peixe apresentam um padrão dendrítico e são os córregos Candidópolis (área de 33,86 km² e comprimento de 11,17 km), da Cachoeira (área de 30,16 km² e comprimento de 11,58 km), ribeirão São José (área de 57,99 km² e comprimento de 15,34 km) e o

Córrego Santa Cruz (área de 26,7 km² e comprimento de 12,65 km).

Os valores de precipitação média mensal variam nos meses mais chuvosos entre 80 e 300 mm, enquanto no período de estiagem, ficam abaixo de 100 mm, apresentando os meses de julho e agosto os menores valores. Considerando os anos hidrológicos, a precipitação média pluri-anual de 1279,09 mm, Figura 3.

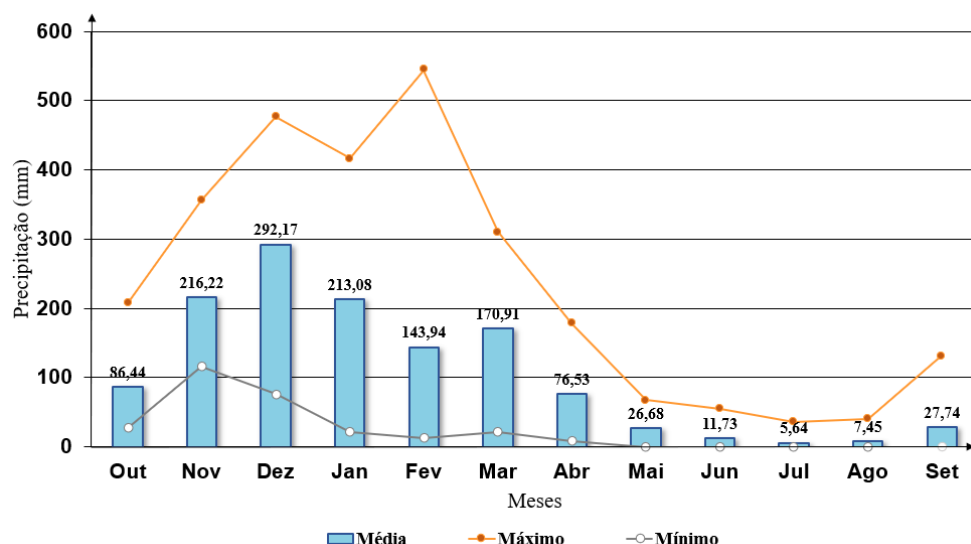


Figura 3. Pluviometria histórica média, máxima e mínima da sub-bacia do Rio do Peixe

As feições morfoestruturais podem ser definidas com base nas curvas de nível. Para conhecer o desenho do relevo local, foi utilizada imagem do radar Palsar, produto da missão ALOS,

com resolução espacial de 12,5 m. O relevo sombreado possibilitou um melhor conhecimento espacial da escala hipsométrica, Figura 4.

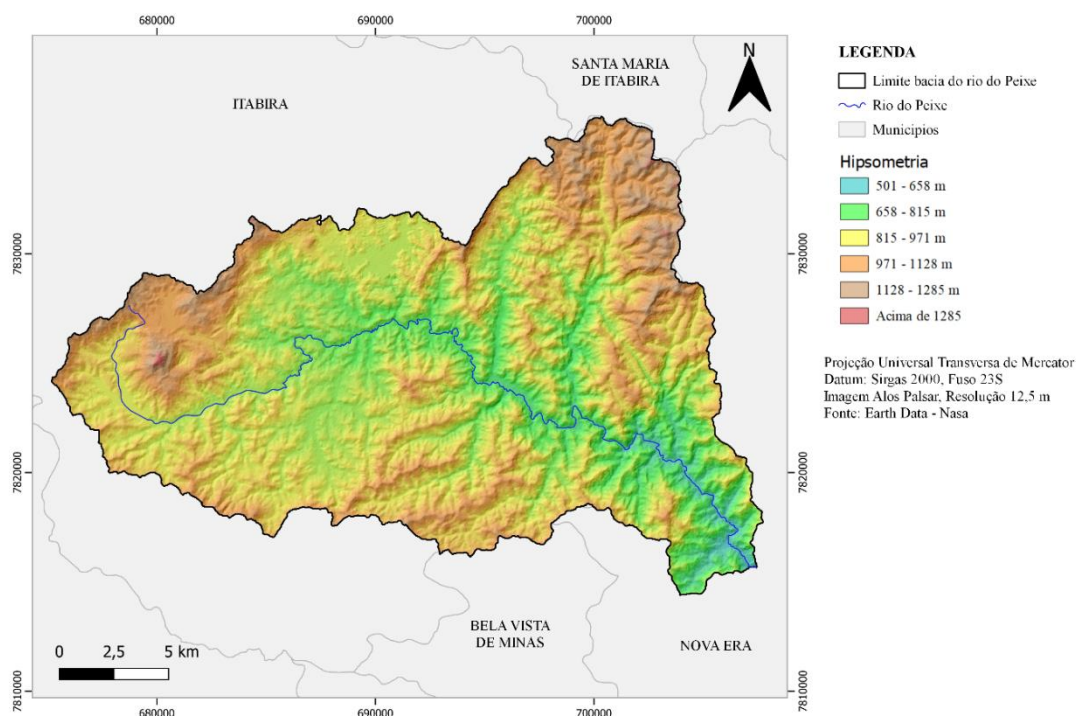


Figura 4. Mapa hipsométrico da sub-bacia do Rio do Peixe

A bacia mostra um relevo bem estruturado, com divisores de águas bem definidos nas sub-bacias. A altitude mínima e máxima da bacia é de 501 e 1285 m, respectivamente, sendo que as mais elevadas estão situadas à noroeste da área de estudo. De acordo com a classificação da Embrapa, a área de estudo possui um relevo

predominantemente ondulado (8 a 20%) até a porção média da bacia e, a partir daí, categorizado como forte-ondulado (20 a 45%). O relevo plano pode ser visualizado nas regiões dos rios, lagoas e represas. A bacia apresenta duas classes de solo, latossolo e neossolo, sendo essa primeira a predominante, Figura 5.

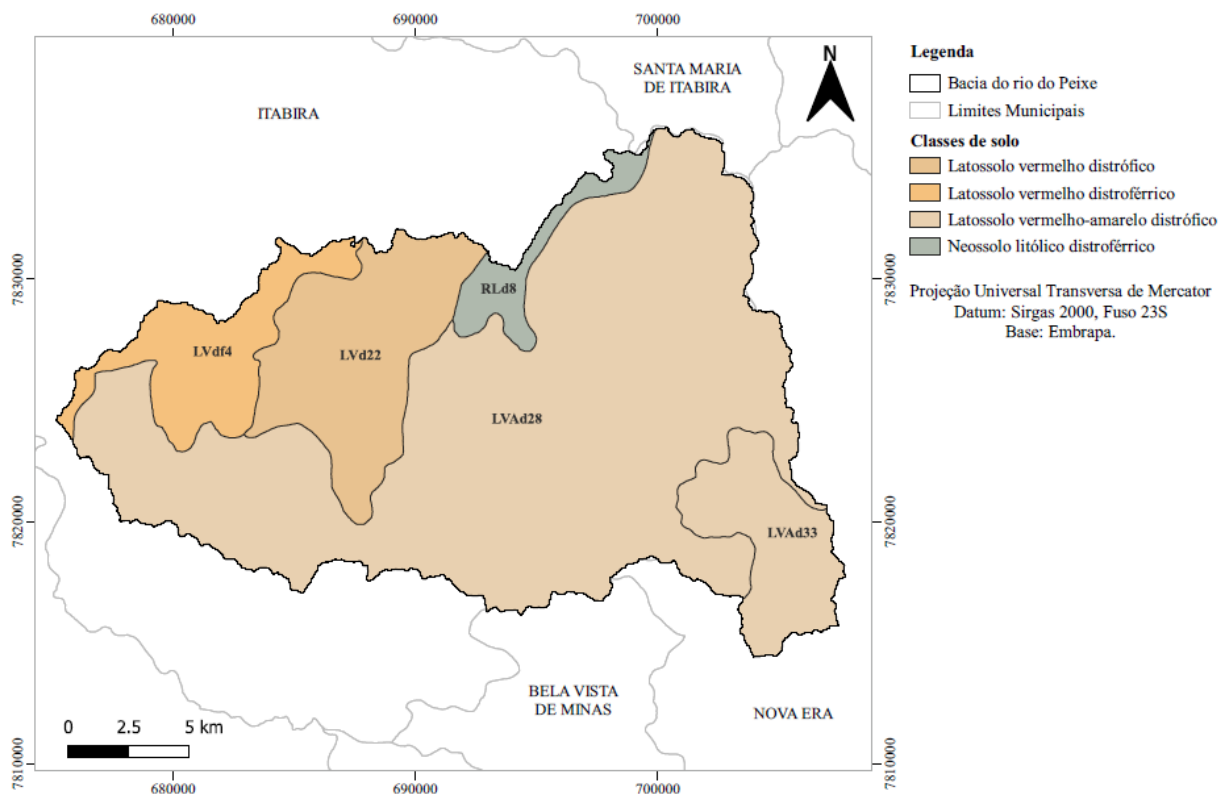


Figura 5. Classes de solo da sub-bacia do Rio do Peixe

O Latossolo vermelho-amarelo distrófico está localizado principalmente na parte média a baixa da sub-bacia do Rio do Peixe e corresponde a 74,10% do território estudado. Caracterizado pelo predomínio de areia em suas amostras, especialmente as frações mais finas, o que o torna susceptível à erosão mesmo em relevo plano e suave ondulado. São acentuadamente drenados.

Em segundo lugar, o latossolo vermelho distrófico que se estende em 14,11% da área estudada, é caracterizado por ser um solo muito intemperizado quimicamente, o que o leva a decomposição de componentes minerais, principalmente de origem caulínica (CBH DOCE, 2010). Possui saturação por base inferior a 50%. São profundos e apresenta resistência à erosão. Apresentam alta permeabilidade.

O latossolo vermelho distroférico, que compreende 8,48% da bacia, possui teores de Fe_2O_3 de 180 g Kg^{-1} a $< 360 \text{ g Kg}^{-1}$ de solo, ambos na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B.

Já o neossolo litólico distroférico são comumente encontrados em afloramentos rochosos e por isso possuem limitações como pedregosidade e o relevo movimentado. São pouco desenvolvidos, rasos e moderadamente a excessivamente drenados. É devido a essas características, considerados susceptíveis a erosão laminar. Na bacia hidrográfica do Rio do Peixe, ele está presente em 3,30% de sua extensão, Tabela 1.

Tabela 1. Área por classe de solo da sub-bacia do Rio do Peixe

Classe	Descrição do solo	Área	
		Km ²	(%)
LVAd28	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	269	65,92
LVd22	Latossolo vermelho distrófico	57,6	14,11
LVdf4	Latossolo vermelho distrófico	34,6	8,48
LVAd33	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	33,5	8,21
RLd8	Neossolo litólico distrófico	13,4	3,28

Geologicamente, a bacia pertence ao sinclinal Itabira, localizado na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero, sendo representada por onze unidades litoestratigráficas: 1) a Suíte Borrachudos; 2) Suíte Catas Altas da Noruega; 3) Suíte Santa Rita; 4) Grupo Itacolomi; 5) Grupo

Sabará; 6) Grupo Piracicaba; 7) Grupo Itabira; 8) Grupo Caraça; 9) Grupo Nova Lima; 10) Complexo Guanhanes; e 11) Complexo Santa Bárbara, Figura 6. A quantificação de cada litotipo dentro da sub-bacia do Rio do Peixe pode ser consultada na Tabela 2.

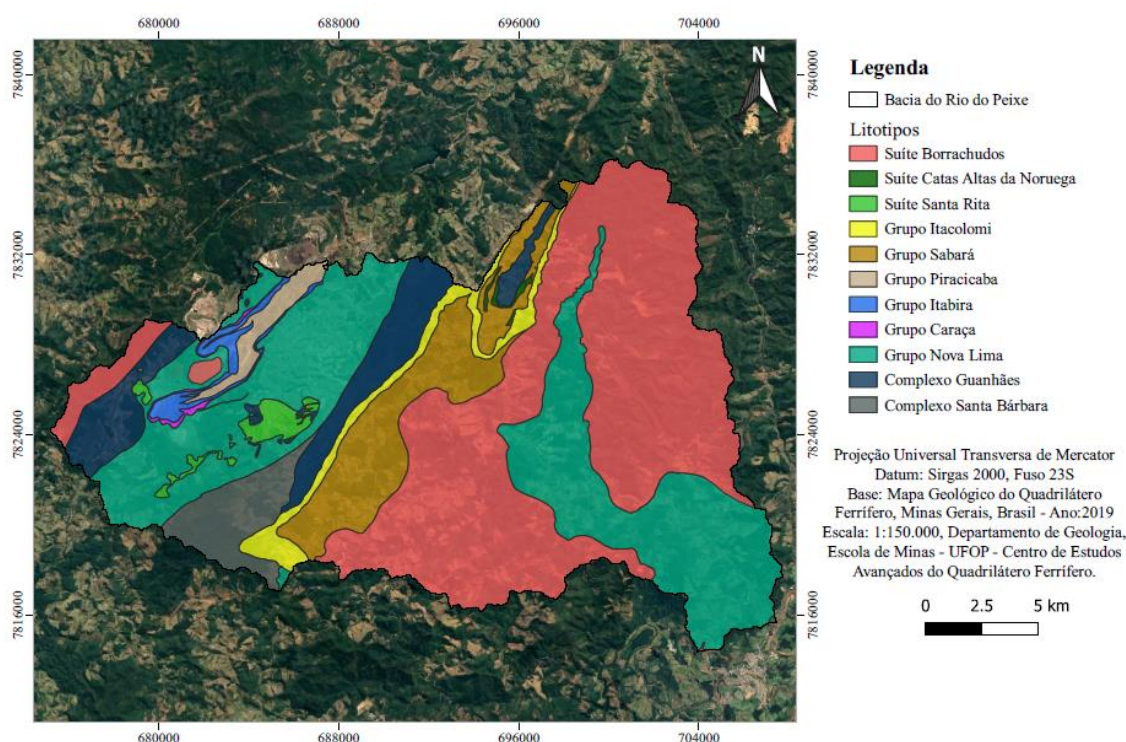


Figura 6. Geologia da sub-bacia do Rio do Peixe – MG, Fonte: Adaptado Endo et al., 2019.

Tabela 2. Área por litotipo da sub-bacia do Rio do Peixe

Litotipo	Área	
	Km ²	%
Suíte Catas Altas da Noruega	0,91	0,22
Suíte Santa Rita	5,61	1,37
Suíte Borrachudos	164,9	40,21
Grupo Itacolomi	12,78	3,12
Grupo Sabará	38,65	9,42
Grupo Piracicaba	6,44	1,57
Grupo Itabira	5,1	1,24
Grupo Caraça	1,38	0,34
Grupo Nova Lima	125,47	30,60
Complexo Guanhanes	32,23	7,86
Complexo Santa Bárbara	16,62	4,05

A Suíte Borrachudos é constituída por metagranitos, metasienito-granitos intrusivos e augen gnaisses (Jordt-Evangelista et al., 2016), da Era Paleoproterozoica, encontrando-se distribuída em uma grande faixa direcional SW-NE e em menor extensão, à noroeste da área de estudo. Os mais bem preservados tipos de granitos, dessa suíte alcalina são foliados, com grau de faturamento bastante variável. Apesar da natureza tectônica, são comuns corpos pegmatíticos no interior dos corpos e nas encaixantes, além de expostos naturalmente na forma de pães de açúcar ou no leito dos rios (Fernandes et al., 1994). Caracteriza-se por um relevo em meia laranja, com poucos afloramentos e de granulometria intercalando entre média e grossa (Andrade, 2012).

O Supergrupo Minas de Era Paleoproterozóica, compreende os seguintes grupos em ordem geocronológica: Caraça, Itabira e Piracicaba. Distribuído espacialmente no intermédio nor-noroeste da área estudada, no núcleo deste supergrupo prenomina-se o Grupo Piracicaba, constituído principalmente por quartzitos ferruginosos, quartzo-sericita xistos, mica xistos, xistos grafitosos e, esporadicamente, xistos carbonáticos, dolomitos manganíferos e itabiritos (Fernandes et al., 1994). As rochas do Grupo Piracicaba são foliadas, geralmente dobradas e com estruturação subvertical devido a ação de zonas transcorrentes que cortam e limitam o Supergrupo Minas (Gonçalves et al., 2019).

No entorno do grupo Piracicaba, o Grupo Itabira é traçado. Representado pela Formação Cauê, segundo Endo et al. (2019), consiste em itabiritos, itabiritos dolomíticos, itabiritos anfíbolíticos e, subordinadamente, de filitos, quartzitos e mármore. Em grandes profundidades tal formação apresenta-se alterada em produtos friáveis, possuindo imensa propriedade armazenadora de água devido a sua natureza porosa ou fraturada (Neto et al., 2001; Beato e Bertachini, 2005). O Grupo Caraça é a unidade basal do Supergrupo Minas sendo constituído pelas Formações Moeda e Batatal, Endo et al. (2019). As rochas deste grupo apresentadas em estreita faixa na área de estudo, contornando em partes, as minas de Periquito e Conceição, e sendo representado por quartzitos, metaconglomerados, filitos sericíticos e mármore dolomíticos no topo.

Sotoposto ao Grupo Caraça, o Grupo Nova Lima, de idade arqueana, apresenta intercalação de rochas de origem sedimentar e vulcânica que,

devido a imposição de uma forte deformação cisalhante e ação de processos hidrotermais, foram transformadas em xistos, xistos cloríticos e filitos (Fernandes et al., 1994). Três corpos distintos do Supergrupo Rio das Velhas estão especializados na área de estudo. O primeiro, localizado na porção mais alta da bacia, constitui a unidade vulcanoclástica, na qual são encontrados metabasaltos intercalados com BIFs, metacherts, filitos carbonosos, metapelito e metagrauvacas. O segundo, a Unidade sedimentar química, comportas por metamargas, formações ferríferas da fácies carbonato e xistos carbonosos intercalados a metapelito, metagrauvacas e metarenitos impuros, com turmalinitos e lentes de metaconglomerados (Endo et al., 2019). O terceiro, característico da Formação Indiviso, localiza-se majoritariamente na porção baixa da área estudada, e têm-se em sua constituição filitos terrígenos, quartzo-clorita-xistos, carbonato-quartzo-clorita-xisto, quartzitos, metagrauvacas, metaconglomerados, metavulcânicas félsicas, metaultramáficas, metamáficas tholeiíticas, metabasaltos komatiíticos e formações ferríferas bandadas.

As rochas do Complexo Guanhães, projetam-se na direção preferencial NNE-SSW, estão sotopostas às rochas do Grupo Nova Lima, e são representadas na área por uma diversidade de litotipos como ortognaisses tonalíticos-trondhjemiticos-granodioríticos, metagraníticos, gnaisses com intercalações ou anfíbolitos acamadados (Endo et al., 2019).

Pertencente ao Grupo Itacolomi, a Formação Florália apresenta-se em uma faixa que corta a região média da sub-bacia do Rio do Peixe. Apresentando variações em sua espessura, é composta por ortoquartzitos e seixos de formação ferrífera. Tal formação contorna o limite leste da Formação Samarenha do Grupo Sabará, sendo ela definida pela presença de biotita-clorita-granada xistos, quartzitos, metapelitos, filitos carbonosos, mármore dolomíticos, BIF, metadiamictitos, metagrauvacas e paragnaisses. Em forma de pequenos corpos inclui-se nas adjacências a Suíte Catas Altas da Noruega, diques máficos intrusivos nos xistos cloríticos do Grupo Sabará (Endo et al., 2019).

O Complexo Santa Bárbara, está inserido na região su-sudoeste e constitui-se de ortognaissetonalíticos-trondhjemiticos-granodioríticos, metagranitos e migmatitos. Compartimentado na porção alta da bacia, têm-se

se ainda a Suíte Santa Rita, integrando ao contexto geológico as metaultramáficas.

A área dispõe de quatro domínios hidrogeológicos, Figura 7. Os domínios Cristalino, Metassedimentos/Metavulcânicas e Vulcânicas são designados como aquíferos fissurais. Já o domínio Poroso/Fissural é categorizado como aquífero misto (Castro e Gonçalves, 2022; Almeida e Gonçalves, 2021).

O domínio Cristalino cobre 62% da sub-bacia do Rio do Peixe é o domínio hidrogeológico predominante na área de estudo. Tem como característica zonas aquíferas descontínuas, localizadas, heterogêneas e anisotrópicas. Quando há existência de lineamentos, fraturas, rocha são fraturada e manto de intemperismo, o processo de recarga natural ocorre por toda extensão exposta da rocha, enquanto o processo de descarga natural é evidenciado em pequenas nascentes nos fundos dos vales, ocorrendo também em fundo de voçorocas. Quando esses elementos da porosidade secundária não são evidenciados, a permeabilidade da água no meio torna-se nula. Por ser espesso, propicia a recarga das fraturas subjacentes e funciona como uma fonte de armazenamento para alimentação dos rios, tornando o embasamento cristalino um importante reservatório em períodos de estiagem (Castro e Gonçalves, 2022; Almeida e Gonçalves, 2021).

O domínio dos Metassedimentos/Metavulcânicas corresponde a 35% da sub-bacia do Rio do Peixe e formam aquíferos livres aleatórios, descontínuos e pouco extenso. Sua favorabilidade hídrica é baixa e suas águas um pouco menos salinizadas que aquela verificada no embasamento Cristalino.

Quanto ao domínio das rochas Vulcânicas, representando 3,38% da área total estudada, na porção sul, pode ser classificado com porosidade secundária, e de forma menos dominante, porosidade primária, sendo ela intrínseca as estruturas vesiculares. Por este motivo, sua potencialidade hidrológica pode vir a ser superior do que aquela verificada no Metassedimentos/Metavulcânicas (Gonçalves et al., 2019).

O domínio Poroso/Fissural, possui uma área de 0,09%, e ocorre predominantemente em uma faixa sentido nor-nordeste (NNE) na região central da bacia hidrográfica do Rio do Peixe, bem como em uma pequena porção a sudeste. Com largura variável, ela divide o domínio dos Metassedimentos-metavulcânicas. Considerando a sua propriedade de aquífero misto, têm-se em sua arquitetura, zonas aquíferas granulares, apresentando porosidade primária baixa à média e zonas aquíferas fissurais, com porosidade secundária. Tal domínio possui médio potencial hidrogeológico (Gonçalves et al., 2019).

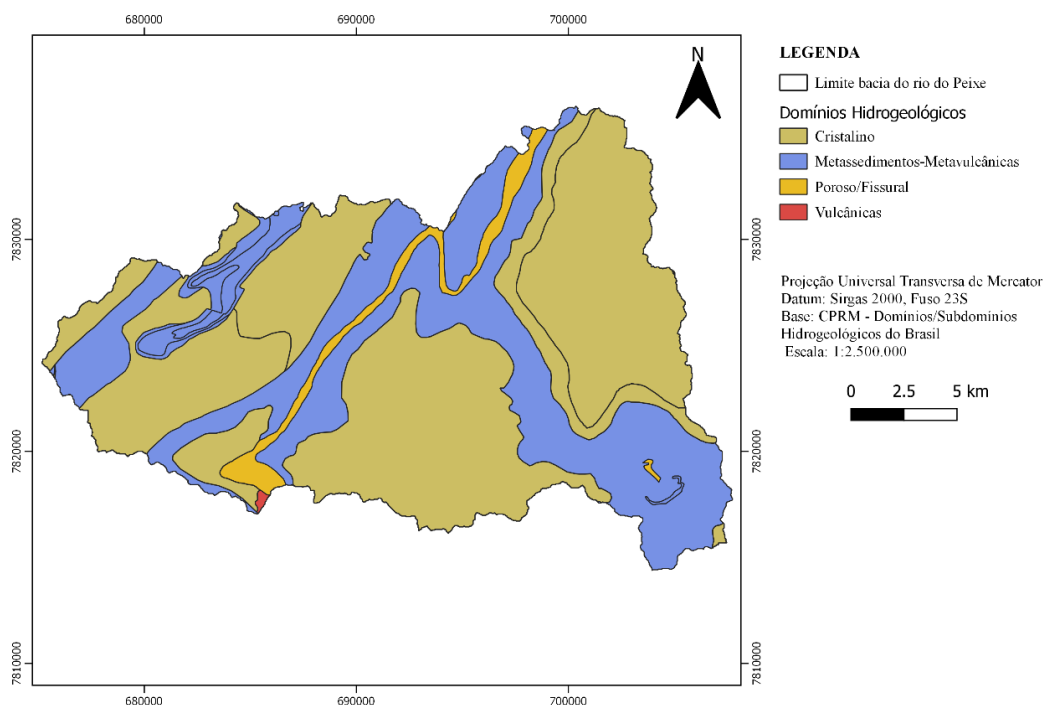


Figura 7. Mapa dos Domínios Hidrogeológicos

O uso e cobertura da terra é representado por: Formação Florestal (172,39 km²), Pastagem (94,10 km²), Mosaico de Usos (43,11 km²), Mineração (40,59 km²), Área urbanizada (25,36 km²), Silvicultura (23,67 km²), Formação Campestre (6,28 km²), Outras áreas não vegetadas (2,05 km²), Rios, lagos e oceanos (1,12 km²), Formação Savânica (0,54 km²) e Afloramento Rochoso (0,18 km²).

Ressalta-se que, somou-se ao uso Formação Florestal as plantações de café também encontradas na região. Este processamento foi feito visto que a parcela dessa camada foi bem pequena e nas adjacências encontram-se fragmentos de floresta. A discretização do uso e cobertura da terra pode ser visualizado na Figura 8.

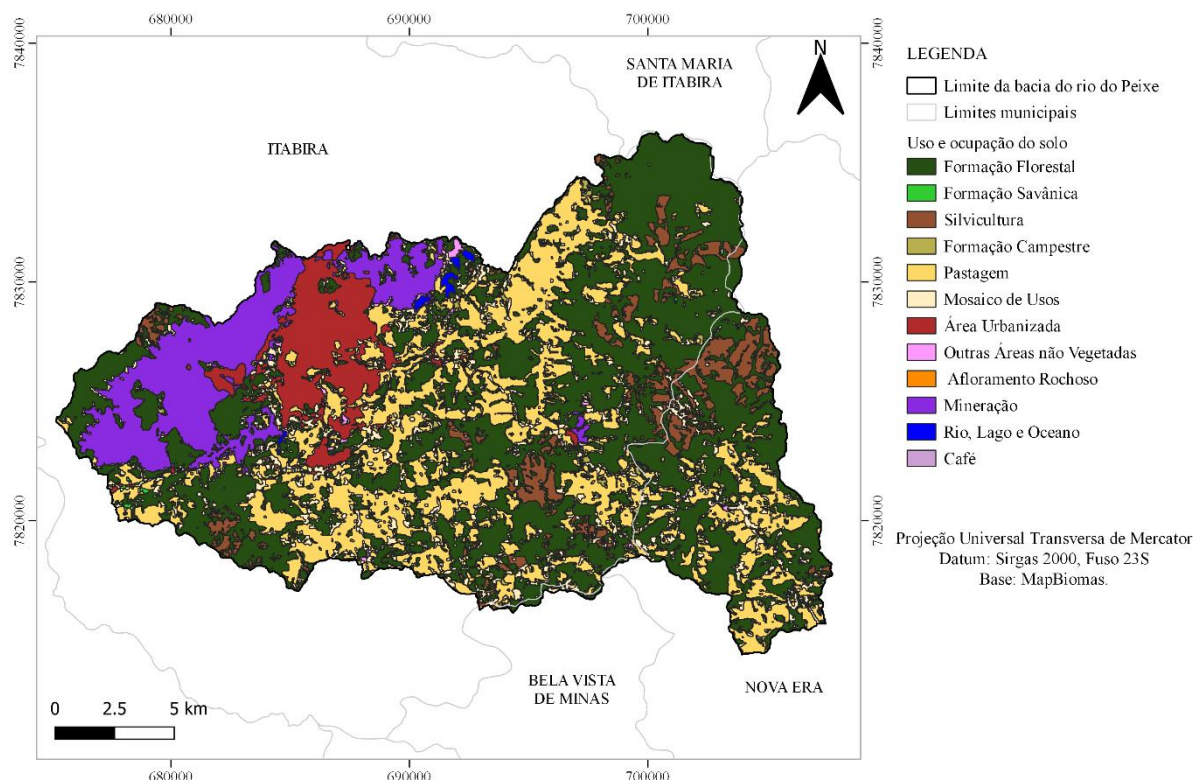


Figura 8. Uso e cobertura da terra da sub-bacia do Rio do Peixe

Resultados

O mapa de potencialidade hídrica subterrânea define, em escala variável, a capacidade potencial de haver água subterrânea em determinado local. Este, somado a outras camadas de informações, subsidiará questionamentos acerca da interconectividade hídrica entre as diferentes matrizes, superficial e subterrânea, na bacia hidrográfica do Rio do Peixe. Para a confecção do mapa de potencialidade hídrica, foram selecionados como critério a camada de Solo, Geologia, Uso e cobertura da terra, Declividade, Densidade de Drenagem e Densidade de Lineamentos, e estes, por sua vez, foram divididos em subcritérios, (Gonçalves et al., 2020).

Na definição dos critérios não foi considerado como parâmetro de entrada precipitação, visto que, dentro da bacia

hidrográfica do Rio do Peixe, existem poucas estações de monitoramento com dados consistentes. Dessa forma, considerou-se um mesmo volume de chuva em toda a extensão da bacia.

Para a definição de cada peso, foram avaliadas as condições favoráveis ou não para a infiltração da água na matriz subterrânea. Vale ressaltar que especificidades inerentes a cada subcritério não são objeto de discussão dessa pesquisa.

A infiltração da água no solo, pode ser definida por meio de sua granulometria (argila, silte e areia). Quanto maior o volume de espaços vazios entre os grânulos, maior a percolação e quanto menor o volume de espaços vazios entre os grânulos, menor a percolação. A Tabela 3 mostra a ponderação realizada para tal subcritério.

Tabela 3. Análise pareada para o critério Solo

Critérios	NLD	LV-AD	LVD	LVDF
Neossolo litólico distrófico	1,00	5,00	6,00	6,00
Latossolo vermelho-amarelo distrófico	1/5	1,00	2,00	2,00
Latossolo vermelho distrófico	1/6	1/2	1,00	2,00
Latossolo vermelho distroférrico	1/6	1/2	1/2	1,00

O RC para este critério foi de 0,03. O mapa de solo pode ser visualizado no item 5.

As estruturas geológicas influenciam no armazenamento, porosidade e permeabilidade da água subterrânea. Uma vez que exista a recarga direta/difusa, sendo essa, proveniente exclusivamente da infiltração da água meteórica na

zona não saturada do solo, e indireta, derivada dos canais de água superficial, lagos e similares, a geologia irá contribuir para a potencialidade hídrica subterrânea (Dekongmen et al., 2022), Tabela 4.

Tabela 4. Análise pareada para o critério Geologia

Critérios	GP	GI	GIT	GS	GC	CNL	CG	CSB	SCA	SSR	SB
Grupo Piracicaba (GP)	1,00	2,00	5,00	5,00	7,00	7,00	8,00	8,00	8,00	8,00	9,00
Grupo Itabira (GI)	1/2	1,00	5,00	5,00	7,00	7,00	8,00	8,00	8,00	8,00	9,00
Grupo Itacolomi (GIT)	1/5	1/5	1,00	2,00	5,00	5,00	7,00	7,00	7,00	7,00	8,00
Grupo Sabará (GS)	1/5	1/5	1/2	1,00	3,00	3,00	5,00	5,00	5,00	5,00	7,00
Grupo Caraça (GC)	1/7	1/7	1/5	1/3	1,00	2,00	5,00	5,00	5,00	5,00	7,00
Grupo Nova Lima (GNL)	1/7	1/7	1/5	1/3	1/2	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	5,00
Complexo Guanhanês (CG)	1/8	1/8	1/7	1/5	1/5	1/2	1,00	2,00	2,00	2,00	5,00
Complexo Santa Barbará (CSB)	1/8	1/8	1/7	1/5	0,2	1/2	1/2	1,00	2,00	2,00	5,00
Suíte Catas Altas da Noruega (SCA)	1/8	1/8	1/7	1/5	1/5	1/2	1/2	1/2	1,00	2,00	5,00
Suíte Santa Rita (SSR)	1/8	1/8	1/7	1/5	1/5	1/2	1/2	1/2	1/2	1,00	2,00
Suíte Borrachudos (SB)	1/9	1/9	1/8	1/8	1/7	1/5	1/5	1/5	1/5	1/2	1,00

O RC para este critério foi de 0,09. O mapa de geologia pode ser visualizado no item 5.

O uso e cobertura da terra estão relacionados diretamente a recarga, sendo que as áreas vegetadas permitem uma maior taxa de infiltração da água, e aquelas mais antropizadas, seja pela urbanização, atividades minerárias, ou

mesmo naturais como os afloramentos rochosos e fluxos de água superficiais, permite um maior escoamento em superfície da água, e consequentemente, menor infiltração, Tabela 5.

Tabela 5. Análise pareada para o critério Uso e cobertura da terra

Critérios	FF	FS	S	FC	P	UM	AU	OANV	AR	M	RLO
Formação Florestal	1,00	3,00	3,00	3,00	2,00	3,00	8,00	4,00	6,00	7,00	5,00
Formação Savânica	1/3	1,00	3,00	3,00	2,00	3,00	8,00	4,00	6,00	7,00	5,00
Silvicultura	1/3	1/3	1,00	3,00	2,00	3,00	8,00	4,00	6,00	7,00	5,00
Formação Campestre	1/3	1/3	1/3	1,00	2,00	3,00	8,00	4,00	6,00	7,00	5,00
Pastagem	1/2	1/2	1/2	1/2	1,00	2,00	5,00	4,00	6,00	7,00	5,00
Mosaico de usos	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1,00	5,00	4,00	6,00	7,00	5,00
Área Urbanizada	1/8	1/8	1/8	1/8	1/5	1/5	1,00	2,00	3,00	3,00	3,00
Outras áreas não vegetadas	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/2	1,00	3,00	3,00	3,00
Afloramento rochoso	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/3	1/3	1,00	3,00	2,00
Mineração	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/3	1/3	1/3	1,00	2,00
Rio, Lago, Oceano	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/3	1/3	1/2	1/2	1,00

O RC para este critério foi de 0,09. O mapa de uso e cobertura da terra pode ser visualizado no item 5.

A inclinação da topografia influencia diretamente na taxa de infiltração da água da chuva no solo. Logo, quanto maior a inclinação do terreno, menor é infiltração, sendo o contrário, também verdadeiro, Tabela 6.

Tabela 6. Análise pareada para o critério Declividade

Critérios	Plano	Suave ondulado	Ondulado	Forte ondulado	Montanhoso	Escarpado
Plano	1,00	3,00	4,00	5,00	7,00	9,00
Suave ondulado	1/3	1,00	3,00	4,00	5,00	9,00
Ondulado	1/4	1/3	1,00	3,00	5,00	7,00
Forte ondulado	1/5	1/4	1/3	1,00	3,00	5,00
Montanhoso	1/7	1/5	1/5	1/3	1,00	3,00
Escarpado	1/9	1/9	1/7	1/5	1/3	1,00

O RC para este critério foi de 0,06. O mapa de declividade pode ser visualizado no item 5.

A densidade de drenagem vai influenciar diretamente na quantidade de água a ser infiltrada. Quanto maior a densidade, maior o escoamento superficial e menor a infiltração. Neste sentido, a

densidade de drenagem muito baixa corresponde ao cenário ideal para tal critério Tabela 7.

O RC para este critério foi de 0,06. A Figura 9, apresenta a densidade de drenagem da bacia.

Tabela 7. Análise pareada para o critério Densidade de drenagem

Critérios	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
Muito baixa	1,00	3,00	4,00	5,00	7,00
Baixa	1/3	1,00	3,00	4,00	5,00
Moderada	1/4	1/3	1,00	3,00	5,00
Alta	1/5	1/4	1/3	1,00	3,00
Muito Alta	1/7	1/5	1/5	1/3	1,00

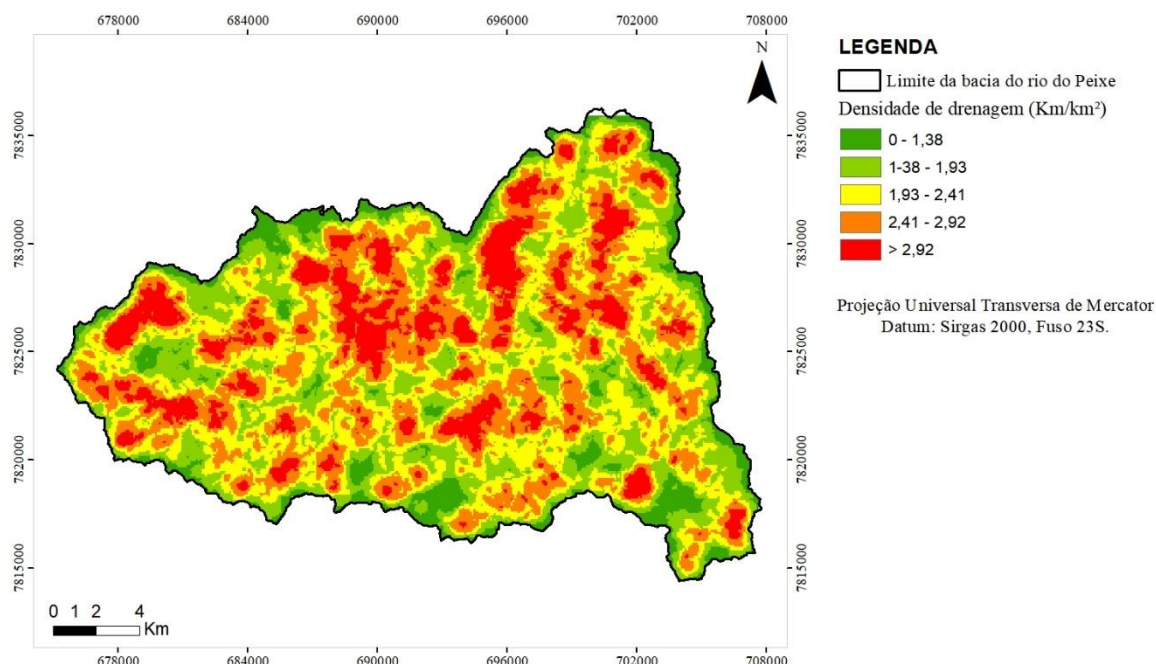


Figura 9. Mapa de densidade de drenagem da sub-bacia do Rio do Peixe

A ponderação dos lineamentos foi feita em termos de densidade. A maior quantidade de lineamentos indica que, na localidade onde ele está especializado, há uma zona de fraqueza. Isto implica em um aumento da porosidade e permeabilidade secundária. Logo, fluxos preferenciais podem ocorrer nessas áreas, promovendo um maior trânsito de águas superficiais e que podem infiltrar no subsolo,

(Kalantar et al., 2019; Arulbalaji et al., 2019; Chen et al., 2020). Neste mesmo sentido, o armazenamento de água também pode aumentar, a depender do comprimento e profundidade da fratura, Tabela 8

O RC para este critério foi de 0,06. A Figura 10, apresenta o mapa de densidade de drenagens para a bacia.

Tabela 8. Análise pareada para o critério Densidade de lineamentos

Critérios	Muito Alta	Alta	Moderada	Baixa	Muito Baixa
Muito Alta	1,00	3,00	4,00	7,00	9,00
Alta	1/3	1,00	3,00	7,00	9,00
Moderada	1/4	1/3	1,00	5,00	7,00
Baixa	1/7	1/7	1/5	1,00	3,00
Muito Baixa	1/9	1/9	1/7	1/3	1,00

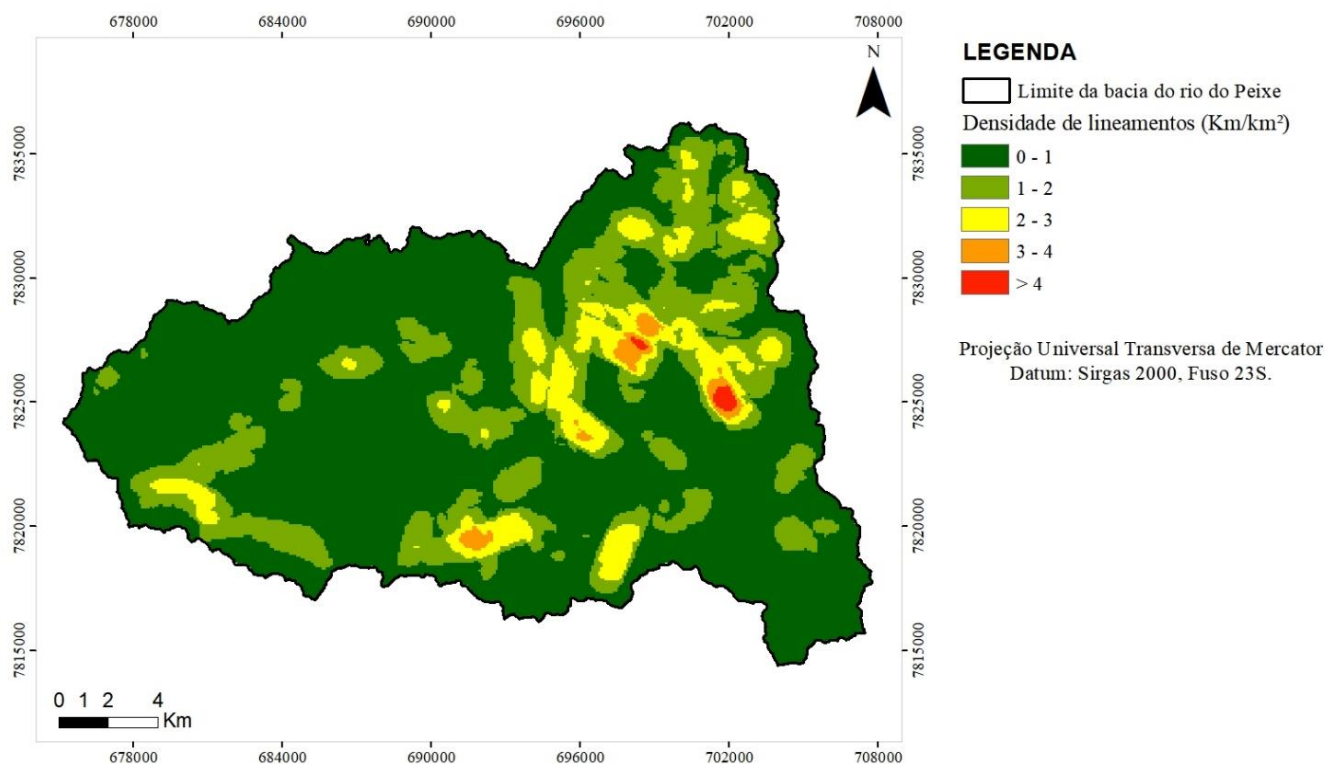


Figura 10. Mapa de densidade de lineamentos estruturais da sub-bacia do Rio do Peixe

O mapa da densidade de lineamentos mostra que na bacia do ribeirão São José, estão as regiões com as maiores densidades de lineamentos, assim como pode ser visualizado, ainda que em menor escala de intensidade, na região da bacia do

córrego Santa Cruz. Os pesos para cada critério e subcritério são apresentados na Tabela 10.

Com os pesos definidos, foi obtido o mapa de potencialidade hídrica subterrânea da bacia, Figura 11.

Tabela 10. Pesos discretizados por subcritérios

Critério/Peso	Subcritério/Peso	
Solo	Neossolo litólico distrófico	0,64
	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	0,17
0,39	Latossolo vermelho distrófico	0,12
	Latossolo vermelho distroférico	0,08
Geologia	Grupo Piracicaba	0,28
	Grupo Itabira	0,24
	Grupo Itacolomi	0,14
	Grupo Sabará	0,10
	Grupo Caraça	0,08
	Grupo Nova Lima	0,04
	Complexo Guanhães	0,03
	Complexo Santa Barbará	0,03
	Suíte Catas Altas da Noruega	0,03
	Suíte Santa Rita	0,02
Uso e cobertura da terra	Suíte Borrachudos	0,01
	Formação Florestal	0,22
	Formação Savânica	0,18
	Silvicultura	0,15
	Formação Campestre	0,12
	Pastagem	0,11
	Mosaico de usos	0,09
	Área Urbanizada	0,04
	Outras áreas não vegetadas	0,04
	Afloramento rochoso	0,03
Declividade	Mineração	0,02
	Rio, Lago, Oceano	0,02
	Plano	0,42
	Suave ondulado	0,25
	Ondulado	0,16
	Forte ondulado	0,09
	Montanhoso	0,05
	Escarpado	0,03
	Muito baixa	0,46
	Baixa	0,25
Densidade de drenagem	Moderada	0,16
	Alta	0,08
	Muito Alta	0,04
	Muito Alta	0,47
	Alta	0,28
	Moderada	0,16
	Baixa	0,06
	Muito baixa	0,03
	Muito Alta	0,47
	Alta	0,28
Densidade de lineamentos	Moderada	0,16
	Baixa	0,06
	Muito baixa	0,03
	Muito Alta	0,47
	Alta	0,28
	Moderada	0,16
	Baixa	0,06
	Muito baixa	0,03
	Muito Alta	0,47
	Alta	0,28

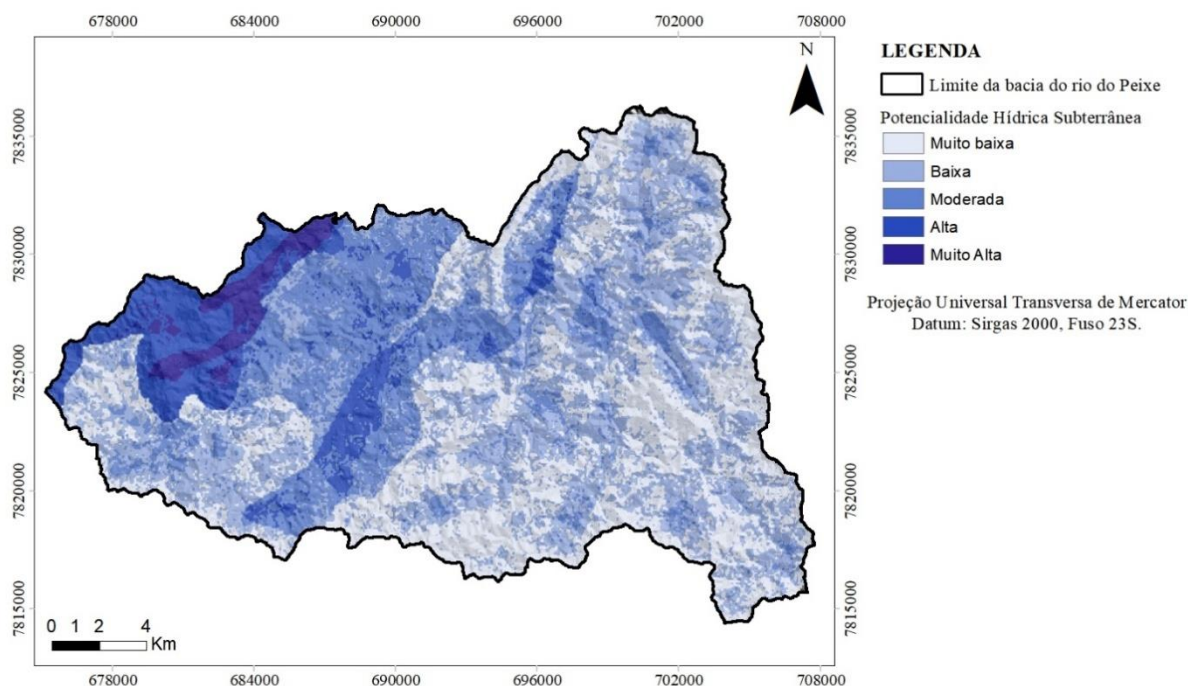


Figura 11. Potencialidade hídrica subterrânea

No mapa da Figura 11, observa-se uma proeminente influência da geologia no mapa final de potencialidade hídrica. A região marcada pela potencialidade hídrica muito alta está condicionada ao contexto geológico do Grupo Itabira e Grupo Piracicaba. Extrapolando a demarcação desses litotipos, têm-se áreas com potencialidade hídrica Alta. Intercalações entre produtividade Muito Alta a Moderada podem ser encontradas a leste dos grupos supramencionados. Nas regiões onde existe uma maior quantidade de lineamentos, o azul

apresenta nuances, indicando potencialidade hídrica moderada.

A análise conjunta dos critérios evidencia que as áreas com maior potencialidade hídrica são aquelas que contemplam solos e feições geológicas favoráveis a percolação de água e declividade menos acentuada. O gráfico de dispersão da Figura 12, mostra a distribuição da capacidade específica por grau de potencialidade hídrica subterrânea. Tal informação foi extraída do mapa de potencialidade hídrica (Lopes et al., 2023).

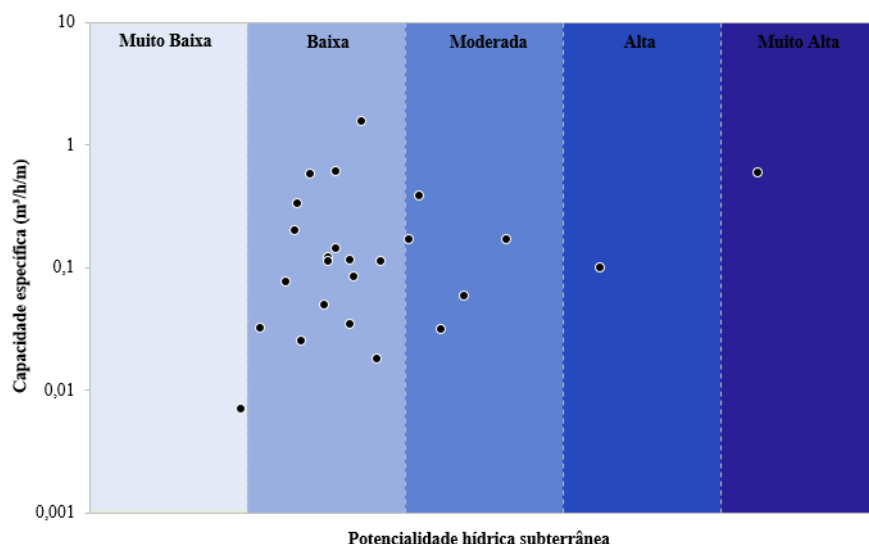


Figura 12. Classificação dos poços em relação a potencialidade hídrica vs capacidade específica

A maior parte dos poços analisados são classificados com potencialidade hídrica baixa,

apresentando capacidade específica que varia de 0,01 a 1 m³/h/m, aproximadamente, e que é

considerada como muito baixa e baixa. Um menor número de poços é observado na região de potencialidade hídrica subterrânea muito baixa, alta e muito alta.

Em relação a área com potencialidade hídrica muito alta, é possível verificar que o poço por ela representado possui ordem de grandeza na mesma faixa de valores já indicados para a área de potencialidade hídrica baixa. Visto a diferença amostral dos poços entre essas duas classificações, não é possível inferir se a capacidade específica de zonas com maior potencial de água subterrânea, de fato, é mais elevada.

Vale ressaltar que, os poços considerados nesta análise foram aqueles com dados

hidrodinâmicos disponíveis para o cálculo da capacidade específica. Dito isto, há uma limitação na análise realizada. Outro fator que contribui é que, existem poços que podem não estar cadastrados no sistema, e que podem estar localizados nas sub-bacias com maior quantidade de lineamentos, por exemplo. Tais lineamentos podem ser fontes produtivas de água.

Na Figura 13, é possível visualizar a disposição dos poços sob o mapa de potencialidade hídrica subterrânea. Com base neste mapa, é possível notar que, em geral, os poços com capacidade específica mais elevados estão nas zonas de potencialidade hídrica de Moderada a Muito alta.

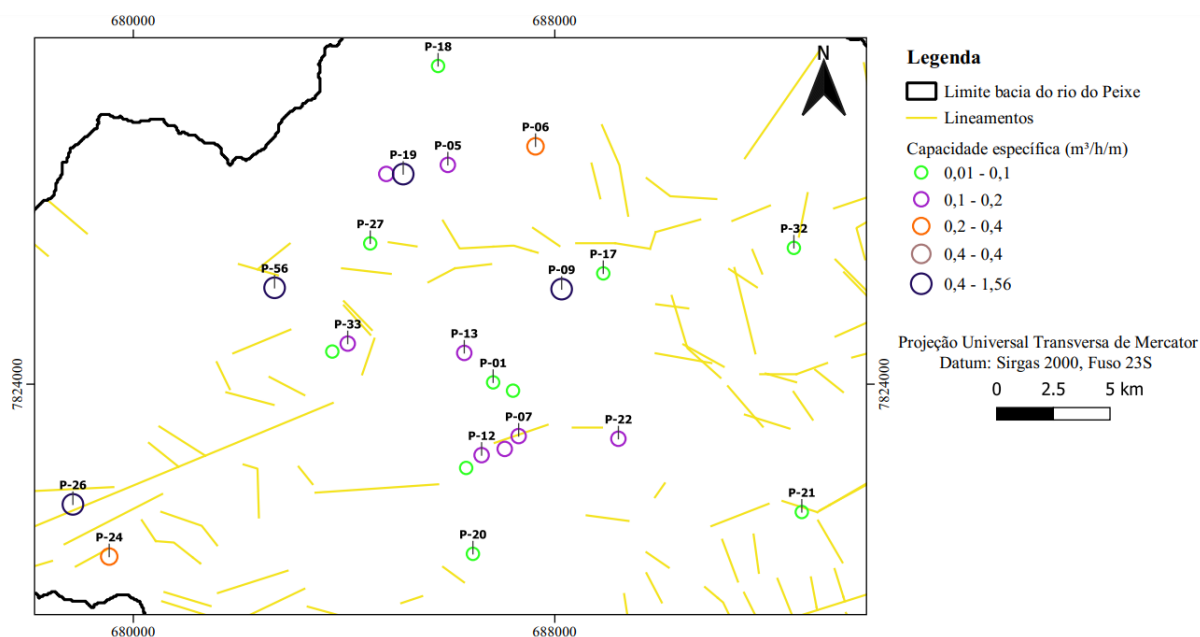


Figura 13. Disposição da capacidade específica dos poços

É notório que um conjunto de fatores tem influência nas águas subterrâneas, à saber: solo, geologia, uso e cobertura da terra, declividade, densidade de drenagens e densidade de lineamentos. Os lineamentos é a forma direta de conexão, em aquíferos como estes verificados predominantemente na área estudada, entretanto, é necessário compreender as outras variáveis que influenciam no interconectividade da água superficial com a subterrânea, (Farzin et al., 2021; Lopes et al., 2023).

Ao comparar o mapa de potencialidade hídrica subterrânea com o dos critérios que foram somatizados para gerá-lo, observa-se que a maior influência é do solo e da geologia, formando agrupamentos no mapa que remetem as feições das classes de solo e litotipos.

Especificamente no contexto geológico, é correspondente que a potencialidade hídrica subterrânea mais alta refira-se aos litotipos com maior capacidade de infiltração e permeabilidade. Já para o contexto geológico majoritário da Suíte Borrachudos, têm-se uma maior resistência para a passagem de água, (Liaquat et al., 2021).

Conclusão

A maior potencialidade hídrica está localizada em uma área onde a menos lineamentos estruturais. Entretanto, é possível visualizar que nas áreas onde há uma maior densidade de lineamentos, a potencialidade hídrica vai de alta a moderada. Vale dizer que este critério foi considerado como o de menor peso em relação aos demais, visto que de acordo com o método AHP, o critério posicionado na base, influencia em todos

os outros que estão acima dele, e assim sucessivamente.

A partir das informações obtidas nesta pesquisa, foi possível estabelecer uma análise das interações entre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos da sub-bacia do Rio do Peixe. A limitada base de informações hidrodinâmicas bem como o cadastro de poços incompleto, interferem no entendimento global da bacia, entretanto, o objetivo exploratório dessa pesquisa permite compreender premissas básicas sobre fatores controladores do potencial hídrico subterrâneo e a interação com a componente hídrica superficial.

São diversos os fatores que podem influenciar e contribuir para a potencialidade hídrica subterrânea da bacia. Foi constatado que a extração dos lineamentos estruturais a partir de imagens de satélite e a hierárquica multicritério utilizados como metodologia consagrada, se mostraram eficientes e eficazes na determinação da

potencialidade hídrica subterrânea na bacia, demonstrando a elevada favorabilidade a percolação e infiltração das águas nas camadas de solo e no arcabouço geológico. Dentro desta linha temática, é possível julgar a geologia e o solo como as principais camadas delimitadoras da interconectividade hídrica. Especificamente com base na matriz geológica, é configurado o tipo de densidade de drenagem e de lineamentos, elementos da paisagem que conectam as matrizes de água superficial e subterrânea. A promoção de estudos que integrem essas duas matrizes por meio de variáveis físicas e parâmetros quantitativos, como é o caso deste estudo, é essencial para aprofundar em outros conceitos que envolvem principalmente a matriz de água subterrânea, que possui a particularidade de ser muito dinâmica dentro de uma pequena escala e ainda pouco explorada.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, agradecemos também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

Referências

- Abdul-Ganiyu, S., Prosper, K. 2021. Estimating the groundwater storage for future irrigation schemes. *Water Supply* 1-15. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.041>.
- Abebrese, S., Anornu, G. K., Kobo-Bah, A. T., Dekongmen, B. W., Sunkari, E. D., 2022. Assessment of groundwater potential zones using GIS and remote sensing techniques in the Bole District, Savannah Region, Ghana. *International Journal of Energy and Water Resources* 6, 445-456. <https://doi.org/10.1007/s42108-022-00207-y>.
- Alipour, A., Hashemi, S., Shokri, S. B. S., Moravej, M. 2018. Spatio-temporal analysis of groundwater level in an arid area. *International Journal of Water* 12, 66-81. <https://doi.org/10.1504/IJW.2018.090185>.
- Almeida, M. S. L., Gonçalves, J. A. C. 2021. Application of Visual MODFLOW to the Analysis of Boundary Conditions for a Phreatic Porous Aquifer Using Limited Available Information: A Case Study. *Anuário do*

- Instituto de Geociências 44: 39646. https://doi.org/10.11137/1982-3908_20214439646
- Alqadhi, S., Mallick, J., Balha, A., Bindajam, A., Singh, C. K., Hoa, P.V. 2021. Spatial and decadal prediction of land use/land cover using multi-layer perceptronneural network (MLP-NN) algorithm for a semi-arid region of Asir, Saudi Arabia. *Earth Science Informatics* 14, 1547-1562. <http://doi.org/10.1007/S12145-021-00633-2>.
- ANA (Agência Nacional de Águas). 2013. Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce: Relatório executivo. Brasília. 129 p. ISBN: 978-85-8210-022-6.
- ANA (Agência Nacional de Águas). 2016. Relatório Final do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos Paranapanema. 335 p.
- Andrade, C. F. 2012. Relevo antropogênico associado à mineração de ferro no Quadrilátero Ferrífero: uma análise espaço-temporal do complexo Itabira (Itabira - MG). Tese de Doutorado - Departamento de Geografia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Arabameri, A., Pal, S. C., Rezaie, F., Nalivan, O. A., Chowdhuri, I., Saha, A., Lee, S., Moayedi, H. 2021. Modeling groundwater potential using novel GIS-based machine-learning ensemble techniques. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 36, 100848. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100848>.
- Arulbalaji, P., Padmalal, D., Sreelash, K. 2019. GIS and AHP techniques based delineation of

- groundwater potential zones: a case study from Southern Western Ghats, India. *Scientific Reports* 9, 1-17. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38567-x>.
- Beato, D. A. C., Bertachinni, A. C. 2005. Projeto APA Sul RMBH: Estudos do Meio Físico. Belo Horizonte. 8, 67 p.
- Benoit, S., Ghysels, G., Gommers, K., Hermans, T., Nguyen, F., Huysmans, M., 2019. Characterization of spatially variable riverbed hydraulic conductivity using electrical resistivity tomography and induced polarization. *Hydrogeology Journal* 27, 395-407. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1862-7>.
- BRASIL. 2022. Secretaria Nacional de Segurança Hídrica (SNSH)/Agência Nacional de Águas (ANA)/ Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Plano Nacional de Recursos Hídricos: Plano de Ação: Estratégia Nacional Para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos 2022-2040. Volume II, março/2022.
- Castro, K. Q., Gonçalves, J. A. C. 2022. Quantificação do Potencial Hídrico Subterrâneo do Baixo Curso do Rio Piracicaba (MG): Interação das Águas Subterrâneas e Superficiais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(4), 1881-1901. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.4.p1881-1901>
- CBH-DOCE - Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Plano de Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos Piracicaba – PARH Piracicaba. Belo Horizonte: Consórcio Ecoplan - Lume, 2010. 100 p. Disponível em: http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2015/01/PARH_Piracicaba.pdf Acesso em: 20 de Outubro de 2023.
- Chen, W., Li, Y., Tsangaratos, P., Shahabi, H., Ilia, I., Xue, W., Bian, H. 2020. Groundwater spring potential mapping using artificial intelligence approach based on kernel logistic regression, random forest, and alternating decision tree models. *Applied Sciences* 10, 1-23. <https://doi.org/10.3390/app10020425>.
- Cherepansky, M. M; Vsevolozhsky, V. A; Zektser, I. S. 2005. Interconnection of Surface and Groundwater. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS): Types and Properties of Water*, Belarus 1, 1-10. Disponível em: <https://www.eolss.net/sample-chapters/c07/E2-03-01-05.pdf>.
- Dekongmen, B. W., Anornu, G. K., Kabo-Bah, A. T., Larbi, I., Sunkari, E. D., Dile, Y. T., Agyare, A., Gyamfi, C. 2022. Groundwater recharge estimation and potential recharge mapping in the Afram Plains of Ghana using SWAT and remote sensing techniques. *Groundwater for Sustainable Development* 17, 100741. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100741>.
- Elmahdy, S., Mohamed, M., Ali, T. 2020. Land use/land cover changes impact on groundwater level and quality in the northern part of the United Arab Emirates. *Remote Sensing* 12, (11). <https://doi.org/10.3390/rs12111715>.
- Endo, I.; Galbiatti, H. F.; Delgado, C. E. R.; Oliveira, M. M. F.; Zapparoli, A. C.; Moura, L. G. B.; Peres, G. G.; Oliveira, A. H.; Zavaglia, G.; Danderfer, F. A.; Gomes, C. J. S.; Carneiro, M. A.; Nalini Jr., H. A.; Castro, P. T. A.; Suita, M. T. F.; Seixas, L. A. R.; Tazava, E.; Lana, C. C.; Martins-Neto, M. A.; Martins, M. S.; Ferreira, F. F. A.; Franco, A. P.; Almeida, L. G.; Rossi, D. Q.; Angeli, G.; Madeira, T. J. A.; Piassa, L. R. A.; Mariano, D. F.; Carlos, D. U. 2019. Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000. Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero. Disponível em: <www.qfe2050.ufop.br>; Acesso em 01/11/2021.
- Farzin, M., Avand, M., Ahmadzadeh, H., Zelenakova, M., Tiefenbacher, J. P. 2021. Assessment of ensemble models for groundwater potential modeling and prediction in a karst watershed. *Water* 13, (18). <https://doi.org/10.3390/w13182540>.
- Feitosa, Fernando A. C. 2008. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. Ed. - Rio de Janeiro: CPRM: LABHID. 812 p.
- Fernandes M. L. S., Marciano V. R. P. R., Oliveira R. C., Correia Neves J. M., Dilascio M. V. 1994. Granitos Borrachudos: um exemplo de granitogênese anorogênica na porção central do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte. *Geonomos*, 2, 2: 23-29
- Fossen, H. 2017. Geologia Estrutural. São Paulo: Oficina de Textos. Acesso em: 01 set. 2022.
- Gonçalves, J. A. C, Almeida, M. S. L., Vieira, E. M., Paiva, B. L. F., Ferreira, M. A. M. Marcellino, L. C. 2023. Interaction Between Surface and Underground Waters of the Itapemirim and Itabapoana River Basins in the Southern part of the State of Espírito Santo, Southeastern Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 46:49992. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2023_46_49992
- Gonçalves, J. A. C., Almeida, M. S. L., Ferreira, M., Paiva, B. 2019. Potencial e disponibilidade

- de águas superficiais e subterrâneas na bacia do Rio do peixe – Itabira - MG. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 23., 2019, Foz do Iguaçu, Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: jan. 2023.
- Gonçalves, J. A. C., Pereira, P. H. R., Vieira, E. M. 2020. Evaluation of the groundwater recharge potential using GIS multi-criteria data analysis: a case study from district of Itabira, Minas Gerais, southeastern Brazil. *Ciência E Natura* 42, e84. <https://doi.org/10.5902/2179460X40433>
- Guimarães, Borba Vilar, P; Rios Ribeiro, M. M. 2008. Águas Subterrâneas: Aspectos Compartilhados da Gestão de Recursos Hídricos na Legislação Brasileira. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.
- Hakim, W. L., Nur, A. S., Rezaie, F., Panahi, M., Lee, C. W., Lee, S. 2022. Convolutional neural network and long short-term memory algorithms for groundwater potential mapping in Anseong, South Korea. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 39, (November 2021).100990. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.100990>.
- IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas). Outorga. 2021, Belo Horizonte. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/outorga#:~:text=A%20Outorga%20%C3%A9%20o%20instrumento,o%20direito%20de%20seu%20uso.>>. Acesso em: abr. 2022.
- Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R., Rinaudo, J., Ross, A., Arshad, M., Hamilton, S. 2016. Integrated Groundwater Management: An Overview of Concepts and Challenges. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-91>.
- Jordt-Evangelista, H., Lana, C.; Delgado, C. E. R. Viana, D. J. 2016. Age of the emerald mineralization from the Itabira-Nova Era District, Minas Gerais, Brazil, based on LA-ICP-MS geochronology of cogenetic titanite. *Brazilian Journal of Geology*, 3, 427-437. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150074>
- Kalantar, B., Al-Najjar, H.A. H., Pradhan, B., Saeidi, V., Halin, A. A., Ueda, N., Naghibi, S. A. 2019. Optimized conditioning factors using machine learning techniques for groundwater potential mapping. *Water* 11 (9). <https://doi.org/10.3390/w11091909>.
- Liaqat, M. U., Mohamed, M. M., Chowdhury, R., Elmahdy, S. I., Khan, Q., Ansari, R. 2021. Impact of land use/land cover changes on ground water resources in Al Ain Region of the United Arab Emirates using remote sensing and GIS Techniques. *Groundwater for Sustainable Development* 14 (April), 100587. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100587>.
- Lin, C. H., Lin, C. P., Hung, Y. C., Chung, C. C., Wu, P. L., Liu, H. C. 2018. Application of geophysical methods in a dam project: life cycle perspective and Taiwan experience. *Journal of Applied Geophysics* 158, 82-92. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.07.012>
- Loh, Y. S. A., Akurugu, B. A., Manu, E., Aliou, A. S., 2020. Assessment of groundwater quality and the main controls on its hydrochemistry in some Voltaian and basement aquifers, northern Ghana. *Groundwater for Sustainable Development* 10, (November 2019). 100296 <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100296>.
- Lopes, L. S., Gonçalves, J. A. C., Vieira, E. M. 2023. Estudos Prévios para Locação de Poços Tubulares em Terrenos Cristalinos no município de Viçosa-MG. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 16(5), 2704-2720. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.5.p2704-2720>
- Muldoon, Maureen; Bradbury, Ken. 2005. Site Characterization in Densely Fractured Dolomite: Comparison of Methods. *Ground water*. 43. 863-76. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00091>.
- Neto, A. F. S., Bertachini, A. C., Girodo, A. C., Almeida, D. C. 2001. Hidrogeological Model of the Itabira iron ore district. IMWA - International Mine Water Association Symposium, Belo Horizonte, Brazil.
- Pandey, H. K., Tiwari, V., Kumar, S., Yadav, A., Srivastava, S. K. 2020. Groundwater quality assessment of Allahabad smart city using GIS and water quality index. *Sustain. Water Resources Management* 6, (2). <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00375-x>.
- Poeter, E., Fan, Y., Cherry, J., Wood, W., Mackay, D. 2020. Groundwater in our water cycle: getting to know Earth's most important fresh water source. Ontario: The Groundwater Project. 136 p. <https://doi.org/10.21083/978-1-7770541-1-3>.
- Rosenberry, D. O., Labaugh, J. W., 2008, Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 4–D2, 128 p.
- Saaty, R. W. 1987. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Model* 9, 161-176.

- [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).
- Saaty, T. L. 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* 15, 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).
- Seidu, J., Ewusi, A., Kuma, J. S. Y. 2019. Combined electrical resistivity imaging and electromagnetic survey for groundwater studies in the Tarkwa Mining Area, Ghana. *Ghana Mining Journal*. 19, 29-41. <https://doi.org/10.4314/gm.v19i1.4>.
- Singhal, B. B. S.; Gupta, R. P. 2010. Fractures and discontinuities. In: Singhal, B.B.S.; Gupta, R. P. *Applied Hydrogeology of fractured rocks*. 2^o Edition, Springer Science & Business Media, p. 13-33.
- Sophocleous, M. 2002. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeologic Journal*. Vol.10, p.52-67. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0170-8>
- Tafila, O., Ranganai, R. T., Moalafhi, D. B., Moreri, K. K., Maphanyane, J. G. 2022. Investigating groundwater recharge potential of Notwane catchment in Botswana using geophysical and geospatial tools. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 40, 101011. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101011>.
- Teixeira, W. (ORGS.). 2009. *Decifrando a Terra*. 2.ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional. 623 p. ISBN 9788504014396.
- Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L., Alley, W. M. 1998. *Ground Water and Surface Water: a single resource*. Serviço Geológico dos EUA, Denver, Colorado, p. 1-79. <https://doi.org/10.3133/cir1139>