



Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas



Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos
Hídricos PROFÁGUA

Cristiano Martins da Costa Guerra

**Potencial de recarga das bacias hidrográficas do município de
Nova Era - MG: um subsídio para as políticas públicas**



Itabira- Minas Gerais
2023



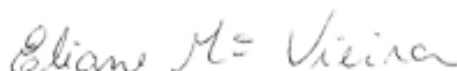
Cristiano Martins da Costa Guerra

**Potencial de recarga das bacias hidrográficas no município de
Nova Era - MG: um subsídio para as políticas públicas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), na Universidade Federal de Itajubá. Área de concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos

Aprovada em: 14 de Julho de 2023

Banca Examinadora:



Profª. Dra. Eliane Maria Vieira (Orientadora)

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI



Prof. Dr. José Augusto Costa Gonçalves

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI


Prof. Dr. Gláucio M. Marques

Prof. Dr. Gláucio Marcelino Marques

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – Unifei



Profª. Dra. Alessandra Lopes Braga Fonseca

Instituto Federal de Educação – IFES – Campus Vitória.

Itabira – Minas Gerais

2023

DEDICATÓRIA

Dedicado aos meus filhos Lucas e Beatriz.

AGRADECIMENTOS

A todos os Professores que escreveram em minha alma, em especial minha mãe que me preenche com a sabedoria dos anos. Agradeço à minha família, meus irmãos e em especial à minha companheira de vida Fernanda, fervorosa torcedora que sempre me estendeu seu abraço acolhedor nos percalços desta jornada. Ao amigo Carlos e esposa Laila pela mágica palavra: motivação; à Professora e orientadora Dra. Eliane Maria Vieira que tão prontamente se debruçou no labor e na lapidação desta obra e nas orientações por mim recebidas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, agradeço 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.

Se não morre aquele que escreve um livro e planta uma árvore, com mais razão não morre o educador que semeia vida e escreve na alma.

Bertolt Brechet

RESUMO

GUERRA, Cristiano Martins da Costa. **Potencial de recarga das bacias hidrográficas no município de Nova Era - MG: um subsídio para as políticas públicas.** 2023. 106 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2023.

A gestão dos recursos hídricos envolve a administração e o planejamento como forma de garantir o uso sustentável e equitativo da água. Isso inclui a implementação de políticas e regulamentos eficientes, o estabelecimento de mecanismos de monitoramento, controle e a promoção da conservação da água. O objetivo deste trabalho é contribuir para o planejamento e gestão dos recursos hídricos por meio da determinação das áreas mais propícias à infiltração de água para a recarga dos aquíferos do município de Nova Era - MG. Foram utilizadas técnicas de geoprocessamento juntamente com a análise multicritério utilizando-se o Processo Analítico Hierárquico (PAH) para geração de mapas temáticos correlacionando-se os fatores pluviosidade, geologia, solo, drenagem, lineamentos, declividade e uso do solo. O método PHA foi utilizado para atribuir pesos aos fatores e às suas respectivas classes, visando reduzir a subjetividade na análise. Em seguida os mapas temáticos foram integrados por meio da álgebra de mapas em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) gerando como produto final um mapa com as áreas mais propícias à recarga dos aquíferos, subdivididas em cinco classes. Os resultados indicam que em termos de áreas favoráveis à recarga, a classe predominante é a Moderada com destaque para a coincidência entre as áreas naturalmente vegetadas com aquelas mais propícias à recarga. Apesar das condições geológicas e da topografia não serem muito propícias ao armazenamento de água subterrânea, o município possui solos bem estruturados, pluviosidade anual adequada, densidade de drenagem moderada e uma boa conservação do solo, o que o torna um bom produtor de água. Existem pequenas regiões classificadas como Muito Alta, localizadas no extremo sul, centro-oeste e extremo norte. Os resultados obtidos confirmam também a importância das boas práticas de uso e conservação do solo para a produção de água, e ressaltam a necessidade da manutenção dos remanescentes florestais, das áreas de Preservação Permanente em relevo acentuado, e a implementação de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) como medidas apropriadas para melhorar a recarga de água e a manutenção do fluxo de base da área de estudo.

Palavras-chave: Aquífero. Recarga. Geoprocessamento. Gestão dos Recursos Hídricos. Processo Analítico Hierárquico.

ABSTRACT

GUERRA, Cristiano Martins da Costa. **Recharge potential of hydrographic basins in the municipality of Nova Era - MG: a subsidy for public policies.** 2023. 106 f. Dissertation (Professional Master's Program in National Network in Water Resources Management and Regulation - PROFÁGUA), Institute of Pure and Applied Sciences, Federal University of Itajubá, Itabira Campus. Itabira, Minas Gerais, 2023.

Water resource management involves administration and planning to ensure sustainable and equitable water usage. This includes efficient policy implementation, establishment of monitoring and control mechanisms, and promotion of water conservation. The objective of this study is to contribute to water resource planning and management by determining areas most suitable for water infiltration to recharge aquifers in Nova Era Municipality, Minas Gerais, Brazil. Geoprocessing techniques were employed, along with a multicriteria analysis using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to generate thematic maps correlating factors such as precipitation, geology, soil, drainage, lineaments, slope, and land use. The AHP method was used to assign weights to the factors and their respective classes, reducing subjectivity in the analysis. The thematic maps were then integrated using map algebra within a Geographic Information Systems (GIS) environment, resulting in a final map with five classes representing areas most conducive to aquifer recharge. The results indicate that the predominant class for recharge-prone areas is "Moderate," with a notable coincidence between naturally vegetated areas and those more suitable for recharge. Despite geological and topographical conditions not being highly conducive to groundwater storage, the municipality benefits from well-structured soils, adequate annual precipitation, moderate drainage density, and good soil conservation, making it a productive water source. Small regions classified as "Very High" recharge potential are located in the extreme south, center-west, and extreme north. The findings also confirm the importance of implementing good soil usage and conservation practices to enhance water production and emphasize the need to preserve forest remnants and areas with steep relief, as well as implementing Payment for Environmental Services (PES) as suitable measures to improve water recharge and maintain the base flow in the study area.

Keywords: Aquifer. Recharge. Geoprocessing. Water Resource Management. Analytic Hierarchy Process.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Aquíferos fissurais-fraturados | 20 |
| Figura 2: Tipos de aquíferos..... | 20 |
| Figura 3: Ciclo da água | 21 |
| Figura 4: Área de recarga dos aquíferos confinado e livre | 24 |
| Figura 5: Localização do município de Nova Era. | 41 |
| Figura 6: Temperaturas e precipitações médias em Nova Era..... | 42 |
| Figura 7: Hidrografia do município. | 43 |
| Figura 8: Sistemas aquíferos do município de Nova Era-MG..... | 44 |
| Figura 9: Fluxograma metodológico. | 46 |
| Figura 10: Densidade de lineamentos | 53 |
| Figura 11: Mapa de cargas - Densidade de lineamentos | 55 |
| Figura 12: Mapa geológico da área de estudo | 56 |
| Figura 13: Mapa de cargas - geologia..... | 60 |
| Figura 14: Malha hidrográfica da área de estudos | 61 |
| Figura 15: Mapa de densidade de drenagem..... | 62 |
| Figura 16: Mapa de cargas - Densidade de drenagem | 63 |
| Figura 17: Mapa de solos | 65 |
| Figura 18: Mapa de cargas - solos | 66 |
| Figura 19: Mapa de pluviometria | 68 |
| Figura 20: Mapa de cargas pluviométricas..... | 69 |
| Figura 21: Mapa de declividade | 70 |
| Figura 22: Mapa de cargas - Declividade | 72 |
| Figura 23: Mapa de uso e ocupação do solo | 73 |
| Figura 24: Mapa de cargas do uso e ocupação do solo | 77 |
| Figura 25: Mapa das áreas com potencial de recarga | 81 |
| Figura 26: Mapa do potencial de recarga e locais visitados..... | 83 |
| Figura 27: Visão parcial do ponto 1, às margens da MG120 | 84 |
| Figura 28: Visão parcial do ponto 1, em planície aluvial | 84 |
| Figura 29: Ponto 1. Ao fundo pastagens com baixa capacidade de recarga ... | 85 |
| Figura 30: Representação do domínio morfoclimático - ponto 2 | 86 |

| | |
|---|----|
| Figura 31: Semelhante representação do domínio morfoclimático - ponto 2 ... | 86 |
| Figura 32: Mapa das áreas de recarga e dos poços de captação subterrânea com cadastro no IGAM..... | 88 |
| Figura 33: Mapa do potencial de recarga - com destaque para a bacia hidrogr. do córrego da Passagem. | 90 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1:Estrutura hierárquica | 36 |
| Quadro 2: Escala numérica | 37 |
| Quadro 3: Exemplo de Critérios e escala de julgamento | 38 |
| Quadro 4: Estações pluviométricas | 67 |
| Quadro 5: Resultado do julgamento pela análise hierárquica dos temas..... | 78 |
| Quadro 6: Caracterização hidrogeológica dos poços tubulares, na área de estudo. | 89 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Índice Randômico Médio do AHP em função do tamanho da matriz. | 39 |
| Tabela 2: Quantificação das classes de densidade de lineamentos para o município de Nova Era. | 53 |
| Tabela 3: Faixas da Densidade de Lineamentos utilizadas na reclassificação | 54 |
| Tabela 4: Quantificação das classes de Geologia..... | 57 |
| Tabela 5: Cargas para a Geologia, utilizadas na reclassificação | 59 |
| Tabela 6: Cargas para Densidade de Drenagem | 62 |
| Tabela 7:Quantificação das classes de Densidade de Drenagem | 64 |
| Tabela 8: Cargas para Solos..... | 65 |
| Tabela 9: Carga para a pluviometria | 68 |
| Tabela 10: Quantificação das classes de declividade | 71 |
| Tabela 11: Cargas para Declividade | 71 |
| Tabela 12: Quantificação das classes de uso e ocupação do solo | 74 |
| Tabela 13: Cargas para uso e ocupação do solo | 77 |
| Tabela 15: Pesos para os critérios-resultado do método AHP | 79 |
| Tabela 16: Quantificação das classes de recarga-Nova Era-MG..... | 82 |
| Tabela 17: Classificação do potencial de recarga da bacia do córrego da Passagem. | 91 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------------|--|
| AHP | Analytic Hierarchy Process |
| ANA | Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico |
| ASF | Alaska Satellite Facility |
| AVNIR-2 | Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2 |
| CNPA | Capacidade Natural de Produção de Água |
| CPRM | Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais |
| CR | Razão de Consistência |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| ESRI | Environmental Systems Research Institute |
| HAND | Heigh Above the Nearest Drainage |
| IBIO | Instituto BioAtlântica |
| IDE-SISEMA-MG | Sistema de Infraestrutura de Dados Espaciais de Minas Gerais |
| IFSAR | Interferometric Synthetic Aperture Radar |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia |
| LEGAL | Linguagem Espacial de Tratamento Algébrico |
| MDE | Modelo Digital de Elevação |
| MDT | Modelos Digitais do Terreno |
| PALSAR | Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar |
| PMSB | Plano de Saneamento Básico |
| PRISM | Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping |
| PSA | Pagamento por Serviços Ambientais |
| SIG | Sistema de Informações Geográficas |
| SINGREH | Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos |
| SIRGAS | Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas |
| SRTM | Shuttle Radar Topography Mission |
| SSR | Sistema de Sensoriamento Remoto |
| UNIFEI | Universidade Federal de Itajubá |
| UPGRH | Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos |
| UTM | Unidade Transversal de Mercator |
| VNA | Variação do Nível d'Água |
| WTF | Water Table Fluctuation |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 16 |
| 2.1 | Objetivo Geral..... | 16 |
| 3 | REFERENCIAL TEÓRICO | 17 |
| 3.1 | Gestão integrada dos recursos hídricos | 17 |
| 3.2 | Potencial hídrico | 19 |
| 3.3 | Potencial de recarga dos aquíferos | 22 |
| 3.4 | Zonas de recarga..... | 24 |
| 3.5 | Fatores que interferem na zona de recarga..... | 26 |
| 3.5.1 | Pluviosidade | 26 |
| 3.5.2 | Solos..... | 28 |
| 3.5.3 | Lineamentos | 29 |
| 3.5.4 | Densidade de drenagem..... | 32 |
| 3.5.5 | Uso e ocupação do solo | 32 |
| 3.5.6 | Declividade | 33 |
| 3.5.7 | Hidrogeologia..... | 34 |
| 3.6 | Análise multicritério – método AHP (Processo de Análise Hierárquica) | 35 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 40 |
| 4.1 | Caracterização da área de estudo..... | 40 |
| 4.1.1 | Clima..... | 42 |
| 4.1.2 | Hidrografia | 42 |
| 4.1.3 | Hidrogeologia..... | 44 |
| 4.2 | Metodologia | 44 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 52 |
| 5.1 | Mapas temáticos..... | 52 |
| 5.1.1 | Mapa de densidade de lineamentos | 52 |
| 5.1.2 | Mapa geológico | 55 |
| 5.1.3 | Mapa densidade de drenagem | 60 |
| 5.1.4 | Mapa de solos | 64 |
| 5.1.5 | Mapa de precipitação..... | 66 |
| 5.1.6 | Mapa de declividade..... | 69 |
| 5.1.7 | Mapa de uso e ocupação do solo | 72 |
| 5.2 | AHP..... | 78 |

| | |
|--|----|
| 5.3 Mapa da potencialidade de recarga | 80 |
| 5.3.1 Captação de água subterrânea no município..... | 87 |
| 5.3.2 Bacia do córrego da Passagem | 90 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 93 |
| Bibliografia..... | 95 |

1 INTRODUÇÃO

Um dos requisitos para que se alcance o desenvolvimento humano é a garantia da disponibilidade de água. A segurança hídrica é condição necessária para que se obtenham melhorias nas áreas social, econômica e ambiental (VERIATO et al., 2015).

O Brasil é o maior depositário de água doce do planeta, porém, já enfrenta sérios problemas de abastecimento nas grandes cidades como São Paulo e mesmo assim os níveis de desperdício de água ainda são elevados (OLIVO e ISHIKI, 2014).

Segundo Richter (2015), muitos livros e artigos técnicos já foram escritos abordando a questão da escassez hídrica, porém apesar da consciência do problema, este vem se agravando e o poder público tem sido ineficiente na gestão destes recursos hídricos.

Para o século XXI já se prevê para a região Sudeste do Brasil uma situação pessimista de períodos de aumento nas taxas de evaporação, secas mais intensas, níveis mais baixos dos rios, crises no fornecimento de água, conflitos sociais e possíveis reduções de recarga dos aquíferos a partir de 2050 (MARENGO, 2021).

Em um cenário em que se vislumbra uma escassez de água e todas as suas possíveis consequências negativas, é necessário que se estabeleçam mecanismos de gestão dos recursos hídricos.

Em novembro de 2013, o Instituto BioAtlântica (IBIO) - que até então era a Agência de Bacia do rio Doce - assinou um contrato com a empresa Engecorps para elaboração do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), instituído Lei Ordinária 2001 em março de 2016, para a cidade de Nova Era – integrante da Unidade de Planejamento de Gestão de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piracicaba.

Neste Plano, o item 1 – Abordagem dos aspectos ligados à oferta de água para abastecimento público do Produto 5 do PMSB, determinou que o saldo disponível para outorga do Córrego da Passagem (responsável por 61,2% do abastecimento de água tratada da cidade) é de 60,64 L/s, o que não atende a

demanda atual, que segundo o Atlas do abastecimento de água (Brasil, 2018) é de 72l/s, e nem à demanda futura até 2035 projetando a cidade para um cenário preocupante no tocante ao abastecimento de água – um problema a ser resolvido.

O PMSB (2015) de Nova Era projetou uma garantia de oferta mínima de água potável de 156 L/hab/dia até 2035. Porém, esta garantia pode estar comprometida. O córrego da Passagem vem apresentando vazão abaixo do necessário para captação, em épocas de escassez de chuva. Isto pode estar evidenciando uma possível degradação de sua bacia hidrográfica e reforçando a necessidade de ações a serem realizadas para um aumento da oferta de água para a população, conforme recomendado pelo PMSB.

Realizar obras que viabilizem a transposição de bacias nem sempre é a melhor opção, uma vez que não traz soluções para a reversão da degradação e consequente crise hídrica da bacia considerada, o que pode a longo prazo, levar a um desequilíbrio entre a oferta e a demanda hídrica no futuro.

Assim, a principal bacia hidrográfica que abastece a cidade de Nova Era está hoje com fortes indícios de queda na produção de água, o que demanda Políticas Públicas que propiciem ações nas bacias hidrográficas do município que objetivem a produção de água e melhoria na gestão dos recursos hídricos e proporcionem segurança hídrica à população.

Contudo, para que tais políticas públicas e respectivas ações sejam efetivas é necessário conhecer a realidade da bacia e suas relações naturais para que sejam adotadas ações de gestão condizentes com o cenário atual e futuro desejado.

Neste sentido, a relevância do presente trabalho se baseia na utilização de métodos de Zoneamento Ambiental e de técnicas de geoprocessamento para a construção de um produto que seja utilizado no planejamento e gestão dos recursos hídricos.

O Zoneamento Ambiental está previsto como instrumento de gestão de território pela Lei Federal 6938/81 e se baseia na divisão do território em diferentes tipos de zonas nas quais o Poder Público estabelece determinados regimes de uso (ARAGÃO et al., 2014).

Segundo Campos (2014), existem vários métodos de zoneamento ambiental, mas nenhum considera a água como agente formador da paisagem. Assim, este autor propõe realizar um Zoneamento Geohidroecológico destacando-se por “analisar, de forma integrada, as variáveis ambientais, avaliando os processos físicos que regem a distribuição e o movimento da água na paisagem”. Para tanto, ele propõe a atribuição de “pesos” para as variáveis ambientais de modo a determinar a capacidade de produção de água nas bacias hidrográficas.

Sendo assim, seguindo pela linha de pesquisa das metodologias para implementação deste instrumento de gestão de recursos hídricos, este trabalho pretende analisar o potencial de recarga das bacias hidrográficas do município de Nova Era. Para tanto, pretende-se atribuir “pesos” aos atributos de solo, pluviosidade, geologia, declividade e uso e ocupação do solo, como forma de se determinar as áreas propícias, ou não, à produção de água.

Desta forma, as informações geradas pelo presente trabalho permitirão melhor planejamento, podendo gerar maior segurança hídrica para a população com o aumento da garantia da oferta de água no município, em atendimento ao PMSB, além de orientar ações para a implementação de programas governamentais como, por exemplo, o pagamento por serviços ambientais – Lei 14119/21, recentemente sancionada pelo Executivo Federal.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar o potencial de recarga das bacias hidrográficas do município de Nova Era – MG, estudando de forma integrada os elementos formadores da paisagem.

Objetivos específicos

- Definir pesos que indiquem a menor e a maior importância e correlação dos atributos pluviosidade, geologia, solo, drenagem, lineamentos, declividade e uso e ocupação do solo para a Capacidade Natural de

Produção de Água (CNPA) considerando as características da área de estudo;

- Elaborar a carta de CNPA para o município classificando as regiões de acordo com sua capacidade de produção de água;
- Analisar a capacidade de produção de água na bacia do Córrego da Passagem, atual bacia de captação do município.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Gestão integrada dos recursos hídricos

A Lei Federal 9433 de 8 de janeiro de 1997 veio instituir a Política Nacional de Recursos Hídricos e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH).

Esta considera a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos e estabelece que planejar, regular e controlar o uso, bem como a recuperação dos corpos d'água, são objetivos do SINGREH (MIZUKAWA, 2020). Sendo assim, é necessária a elaboração de instrumentos que irão subsidiar políticas públicas locais voltadas para a produção de água e que garantam ações na bacia que promovam o aumento da oferta de água como premissas básicas de um planejamento.

Neste contexto importante destaque se dá para atuação das agências de água, que segundo Poletto (2014) “são unidades executivas descentralizadas que servem de apoio aos seus respectivos Comitês de Bacia Hidrográfica e são parte integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos-SINGREH”.

Segundo Brasil (1997) é função das agências de água:

“ I - manter balanço atualizado da disponibilidade de recursos hídricos em sua área de atuação;

...

VII - celebrar convênios e contratar financiamentos e serviços para a execução de suas competências;

...

X - elaborar o Plano de Recursos Hídricos para apreciação do respectivo Comitê de Bacia Hidrográfica”;

A Lei 9433/1997 que instituiu a Política Nacional dos Recursos Hídricos, vem balizar a gestão integrada dos recursos hídricos no Brasil, esta prevê a implementação dos seguintes instrumentos de gestão dos recursos hídricos: outorga de uso, no enquadramento dos cursos d'água em classes de uso, planos de recursos hídricos, na cobrança pelo uso dos recursos hídricos e no sistema nacional de informações sobre recursos hídricos (BRASIL, 2020).

Para implementação dos instrumentos de gestão dos recursos hídricos é necessário utilizar-se de uma base consistente de dados e informações para o planejamento e tomada de decisão, de acordo com as premissas do Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos - SINGREH, o que leva necessariamente ao emprego de metodologias que utilizam modelos de simulação da realidade ambiental inclusive com o uso de ferramentas de geoprocessamento, conforme se propõe com este trabalho.

A adoção de um modelo sistêmico de integração participativa no gerenciamento dos recursos hídricos, como preconizado pela Lei 9433/97, que segundo Freitas (2009) é o marco legal, já alerta para a consciência do esgotamento frente às atividades antrópicas :

“... o fim da crença na capacidade infinita do meio ambiente em suportar os efeitos das atividades humanas. Tal mudança passa a acreditar nas políticas públicas – entendidas como o conjunto de orientações e ações de um governo com vistas ao alcance de determinados objetivos através de instrumentos de controle da atividade econômica – a expectativa de reversão do atual quadro de degradação dos recursos naturais. O planejamento estratégico de bacia hidrográfica é um processo de planejamento contínuo e articulado, dentro de uma abordagem sistêmica, e baseado em estudo de cenários futuros (objetivos de longo prazo), com o estabelecimento de metas alternativas específicas de desenvolvimento

sustentável (crescimento econômico, equidade social e sustentabilidade ambiental), tendo como unidade básica de gestão a bacia hidrográfica”.

Na tentativa de se reverter o cenário atual de crescente escassez hídrica, algumas medidas podem ser efetivadas no âmbito da bacia hidrográfica, mais especificamente na restauração dos ambientes de vegetação nativa. Segundo Martins (2013) as melhores técnicas de restauração dos ecossistemas são aquelas que consideram as várias combinações de espécies e diversas formas de vida da flora local. De forma complementar às práticas edáficas e vegetativas, as obras de engenharia também podem ser utilizadas. As práticas mecânicas de conservação de solo e água como a construção de terraços e bacias de acumulação (barraginhas) que são estruturas utilizadas no controle da erosão hídrica (PRUSKI, 2009).

3.2 Potencial hídrico

Segundo Giampá e Gonçalves (2013) o substrato hidrogeológico é formado por rochas do período pré-cambriano, que devido às condições de formação são praticamente impermeáveis e vão dar origem ao manancial subterrâneo formado pelas águas infiltradas no solo e subsolo. Assim, as zonas aquíferas são definidas como os locais destas rochas afetadas por falhas, fraturas e fissuras (Figura 1) ou descontinuidades entre corpos de rochas diferentes.

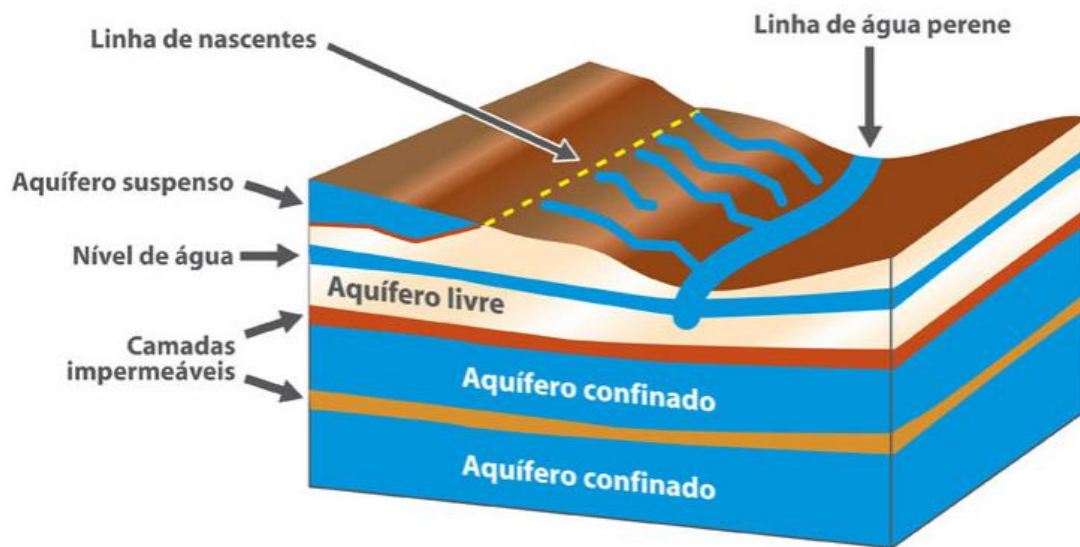
Figura 1: Aquíferos fissurais-fraturados.



Fonte: Gaspar (2019).

Os aquíferos formados por duas camadas de rochas impermeáveis são do tipo confinados e a água em seu interior está submetida a pressão e os aquíferos denominados livres estão nas camadas mais superficiais (TAVEIRA, 2018). A Figura 2 esquematiza a disposição dos aquíferos no perfil do solo e subsolo.

Figura 2: Tipos de aquíferos.



Fonte: DAE Bauru.

Na dinâmica do ciclo da água na superfície terrestre (Figura 3), a chuva exerce a função essencial de renovar a parcela significativa da água que flui nos rios e córregos sendo a principal fonte de recarga dos aquíferos. A água da chuva

infiltra no solo até atingir a saturação e a partir deste momento ocorre o escoamento superficial (TUCCI, 2001).

Figura 3: Ciclo da água.



Fonte: Evans, 2006.

De toda a parcela da chuva que infiltra no solo poroso, uma parte pode sofrer evaporação ou ser utilizada pelos organismos vivos. A outra parte sofre percolação no perfil do solo e vai atingir porções mais interiores do solo e dependendo das condições geológicas pode ser armazenada se tornando praticamente a nossa única fonte de água doce que mantém a perenidade dos rios e córregos (OLIVEIRA; SILVA; MELLO, 2020).

Sendo assim, é nesta etapa do ciclo da água que acontece o reabastecimento dos aquíferos e neste processo a taxa de recarga dependerá da quantidade e do regime de chuvas para que se tenha uma maior ou menor capacidade efetiva de renovação de água subterrânea (FEITOSA *et al.*, 2008).

Outros fatores também colaboram para a maior ou menor capacidade de recarga: a permeabilidade do solo, relevo, o teor de umidade do solo, cobertura vegetal, evaporação, uso e ocupação do solo e condições geológicas o que torna a mensuração da recarga um trabalho difícil devido a esta variabilidade de fatores que a influenciam (PEREIRA e BEZERRA, 2018).

Geralmente em regiões que chove muito apresentam zonas de saturação não muito profundas, rios permanentes e vários pontos de recarga proveniente da chuva, com condições que podem ser influenciadas pelas características geológicas do aquífero de transmitir ou armazenar água. De outra forma, as regiões mais secas possuem geralmente uma zona de saturação mais profunda, rios intermitentes e uma recarga mais pontual (MAZIERO e WENDLAND, 2005).

É possível estudar o potencial hídrico de um aquífero. Castro (2021) baseando-se no período de recessão hidrológica, nos dados de estações fluviométricas e na construção de hidrogramas, quantificando as componentes superficiais e subterrâneas de escoamento caracterizando a potencialidade dos aquíferos locais pela capacidade de restituição destes pela mensuração da descarga subterrânea, inclusive realizando as devidas correlações com o embasamento geológico. Gonçalves et al. (2021) estimaram, a partir de curvas potenciométricas de período seco e cálculos de condutividade hidráulica, as reservas exploráveis de um aquífero inclusive utilizando outros métodos específicos para estimar também o volume da reserva reguladora (recarga).

3.3 Potencial de recarga dos aquíferos

A manutenção do processo de recarga dos aquíferos é muito importante para a garantia de água potável e segurança hídrica. Segundo Viégas Campos et al. (2021) é necessário realizar a gestão integrada dos recursos hídricos; tanto das águas superficiais quanto das subterrâneas, visto que ambas fazem parte de um sistema único que rege a disponibilidade de água na bacia hidrográfica. Portanto, é necessário que se avalie as reservas renováveis dos sistemas aquíferos como forma de melhoria dos processos de gestão dos recursos hídricos.

São várias as funções que os aquíferos podem desempenhar, como a produção de água para consumo, ambiental, transporte de água de um local de recarga para outro local onde há escassez, de armazenamento em épocas de restrição, filtragem e regularização da vazão de rios (GIAMPÁ, 2013). Assim, avaliar e manter as fontes de recarga é condição de atendimento aos preceitos da Lei 9433 – Política Nacional de Recursos Hídricos e requisito para a gestão dos recursos hídricos.

Na identificação das áreas de recarga e na caracterização do nível freático de uma região, inclusive na determinação das reservas renováveis, permanente e explotável, também se consideram os fatores naturais que promovem o reabastecimento da água nos aquíferos tais como: geologia, clima, relevo e solos. Para os cálculos são utilizados métodos que levam em consideração o balanço hídrico, imagens de satélite para o geoprocessamento, a densidade de drenagem, a textura dos solos, os testes de condutividade hidráulica, escoamento superficial, a porosidade efetiva, entre outros fatores, a depender do modelo adotado (SOUSA, 2019).

Segundo Rodrigues e Cambraia Neto (2022) é possível estimar a recarga em uma região por meio de vários métodos utilizados para esta finalidade, como por exemplo modelos numéricos e técnicas de sensoriamento remoto. Para tanto, é necessário inicialmente que se obtenha dados de geologia, hidrologia, clima e relevo. Devido às várias incertezas e estimativas é comum a utilização simultânea de vários métodos.

Teramoto (2018) estimou pelo método Water Table Fluctuation (WTF) uma recarga média de 25% da precipitação acumulada anual.

Wahnfried e Hirata (2005) compararam três métodos de estimativa de recarga: variação do nível d'água (VNA), balanço hídrico e estimativa darcyniana constatando ser o método VNA o mais sensível a eventos de precipitação.

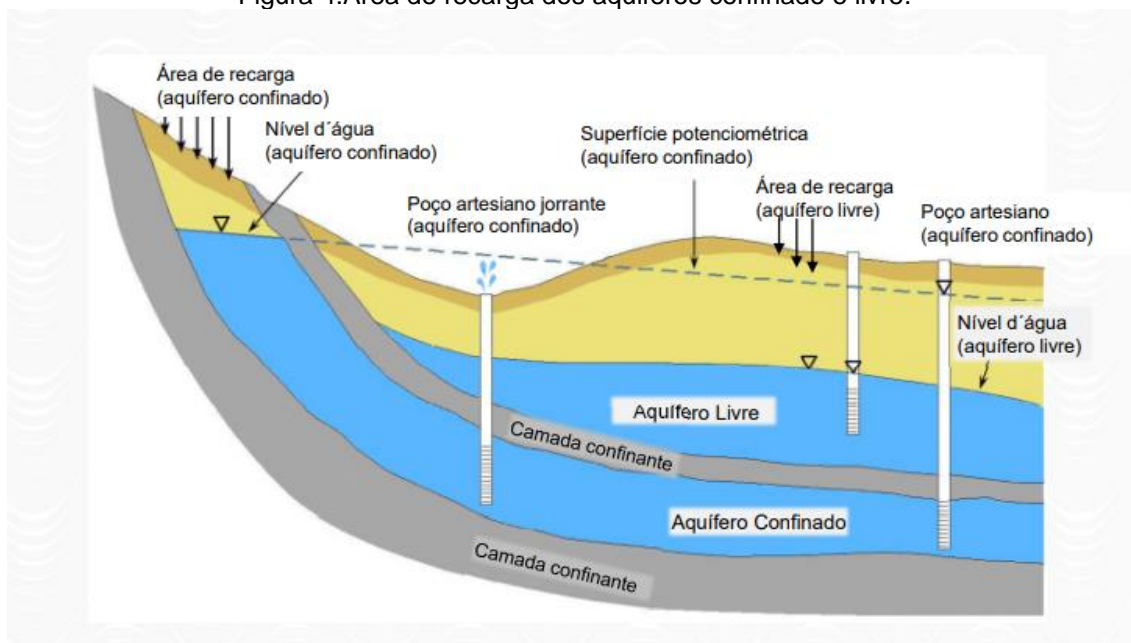
Assim, diante da variação de métodos, deve-se observar os que são possíveis de serem implementados, diante da disponibilidade de dados, e dentre estes o que melhor representaria as condições locais.

O potencial de água subterrânea está diretamente ligado às zonas de recarga presentes da região, que por sua vez podem ser alteradas ao longo dos anos por meio da ação antrópica, impactando diretamente no potencial.

3.4 Zonas de recarga

A água se movimenta no solo pela ação da gravidade, assim, a recarga dos aquíferos (Figura 4) ocorre quando ela passa da região de insaturação para a região de saturação.

Figura 4: Área de recarga dos aquíferos confinado e livre.



Fonte: Adaptado de Gaspar (2019).

Assim, é considerada zona de recarga toda região da superfície terrestre capaz de promover a infiltração e a percolação da água ao longo do perfil do solo direcionando-a para um local onde será armazenada e distribuída (HORTA, 2000). Estas áreas estão intimamente relacionadas com o relevo. Regiões onde o relevo é plano e com elevadas altitudes são mais propícias à recarga. A condição de planície favorece a infiltração e a condição de elevada altitude favorece a recarga pelo maior potencial gravitacional, diferentemente das regiões planas e em baixas altitudes que geralmente apresentam baixa capacidade de recarga (ROMERO, FORMIGA e MARCUZZO, 2017).

A capacidade de uma determinada região em reabastecer um aquífero varia de acordo com o regime de chuvas, cobertura vegetal, extensão territorial da área de recarga e principalmente pelo uso e ocupação do solo. Na maioria das vezes em que ocorre diminuição da capacidade de recarga é devido a alterações

realizadas na cobertura vegetal do solo, quer seja por desmatamento, urbanização ou queimadas sucessivas (SERAPHIM e BEZERRA, 2019).

As áreas urbanas podem influenciar o regime hidrológico promovendo alterações na recarga dos aquíferos promovendo o aumento das superfícies impermeáveis, na infraestrutura do saneamento básico e nas estruturas de drenagem. A estimativa desta influência é um processo interativo e nunca um cálculo definitivo, conforme Maziero (2005).

Ainda segundo o autor, para a tomada de decisão nos projetos de urbanização deve-se considerar o conhecimento a respeito dos processos locais que favorecem a infiltração da água que vai abastecer o aquífero. Para tanto, utilizam-se dados geomorfológicos, climáticos, pedológicos e de uso e ocupação do solo que irão subsidiar os cálculos do impacto da urbanização sobre a recarga dos aquíferos.

Vários estudos vêm sendo desenvolvidos no Brasil e no mundo com o objetivo de identificar as áreas de recargas e promover uma melhor gestão destas, como o desenvolvido por Seraphim (2019), realizado para o Distrito Federal, onde foi analisado um período de 15 anos. O estudo apontou que o Distrito Federal-DF vem sofrendo uma expansão da área urbana de maneira que em 2016 uma parcela de 81,24% da área urbana estava sobreposta às áreas de recarga e 90% da cobertura vegetal estava desmatada com consequente diminuição da recarga provocada pelo desmatamento.

Na identificação das áreas de recarga do município de Iporá-GO, Sousa (2019), utilizou técnicas de geoprocessamento e o software ArcGis® para determinar a declividade, hipsometria, relevo sombreado e distância vertical da drenagem mais próxima (Heigh Above the Nearest Drainage - HAND), a densidade de drenagem e como resultado final produziu um mapa das áreas de recarga identificando grande influência das pastagens e áreas mal conservadas na diminuição da recarga dos aquíferos.

As áreas de recarga também podem ser identificadas pela investigação litológica de subsuperfície e pelo mapeamento do fluxo subterrâneo. Desta forma, é possível determinar que a recarga tem influência direta da água da chuva e é favorecida pela geologia podendo, assim, receber cargas poluidoras provenientes da urbanização o que faz com que as áreas de recarga devam receber proteção do poder público (BANDEIRA, 2009).

3.5 Fatores que interferem na zona de recarga

Para Taveira (2018) dentre os fatores que influenciam a infiltração de água no solo está o tipo de solo que depende da porosidade e o tamanho das partículas, a cobertura vegetal e a pluviosidade.

Na identificação das zonas de recarga Musa et al. (2000), utilizaram os fatores pluviosidade anual, litologia, densidade de lineamentos, uso e ocupação do solo, relevo, declividade, densidade de drenagem e tipo de solo na identificação e classificação das zonas com potencial hídrico da área de estudo.

Já Maziero (2005), avaliando o impacto da urbanização na infiltração da água que vai abastecer o aquífero, utilizou dados geomorfológicos, climáticos, pedológicos e de uso e ocupação do solo.

Sousa (2019) utilizou a declividade, hipsometria, relevo sombreado e distância vertical da drenagem mais próxima (Heigh Above the Nearest Drainage-HAND), a densidade de drenagem para produzir um mapa das áreas de recarga dos aquíferos.

Assim, os fatores que interferem na recarga dos aquíferos são selecionados de acordo com o modelo a ser adotado, que por sua vez é escolhido dentre os que melhor representam o processo de recarga e há disponibilidade dos dados para a área de estudo.

Na sequência serão abordados os principais fatores que interferem na recarga dos aquíferos em uma bacia hidrográfica.

3.5.1 Pluviosidade

Considera-se precipitação a água meteórica que chega na forma líquida ou sólida. No ciclo hidrológico exerce papel fundamental na recarga e produção de água dos aquíferos e na manutenção da vazão dos rios, porém, é um fenômeno do tipo descontínuo, que varia no espaço e no tempo.

Sua medição é realizada por pluviômetros e pluviógrafos que são os aparelhos comumente utilizados para captar e acumular a água da chuva para medição posterior (FEITOSA, 2008).

A ocorrência de chuva é um processo aleatório e não tem uma previsão determinada com uma boa antecedência. Por isso os dados de precipitação são então tratados pela estatística (TUCCI, 2001).

A chuva que cai numa bacia durante o ano é o fator que define a quantidade de água a ser utilizada na irrigação de culturas, no abastecimento doméstico e industrial, além de produzir escoamento de base, tão necessário para a perenidade dos rios.

De acordo com Brito et al. (2020), uma diminuição da frequência de chuvas não necessariamente repercutirá na diminuição linear da recarga podendo este efeito ser ainda maior porque há outros fatores físicos da litologia e de uso do solo que afetam o processo de recarga.

Para Feitosa (2008), o fenômeno da precipitação é considerado um dos fatores mais importantes do ciclo da água. Ele é fortemente responsável pela descarga dos rios e pela recarga dos aquíferos. Nas metodologias para a identificação das zonas de recarga este parâmetro é espacializado por meio do cálculo da média aritmética empregando isoetas e método de Thiesen para a interpolação.

Para um modelo simétrico de distribuição, a média pode ser utilizada como uma boa estimativa do valor mais frequente do total de chuva. Assim, a distribuição espacial da pluviosidade em um determinado período pode ser determinada por exemplo pelo traçado, em cartas, de linhas denominadas isoetas definidas a partir da união de pontos de valores pluviométricos médios de chuva total. Para tanto, utilizam-se dados mensais ou anuais de 30 anos ou mais de registros contínuos (SILVA, 2006).

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) disponibiliza publicamente por meio do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), os registros de várias estações pluviométricas distribuídas pelo país, no banco de dados Hidroweb. Porém, nem sempre se pode contar com uma rede de estações que seja adequada a uma determinada área de estudo, havendo muitas vezes necessidade de se fazer ajustes para completar eventuais falhas nos registros e ausência de estação no local ou proximidade (FEITOSA, 2008).

Segundo Tucci (2001), o método da ponderação regional é utilizado para homogeneização do período de informações de pelo menos 3 estações com pelo

menos 10 anos de dados, visando o preenchimento de registros mensais ou anuais de chuva com base na análise estatística das precipitações e não deve ser utilizado para preenchimento de falhas diárias devido à grande variabilidade temporal e espacial da precipitação.

Sousa (2019) utilizou precipitação média de dados históricos de chuva na identificação de zonas de recarga no estudo da relação entre a precipitação acumulada e a área superficial do reservatório da Cantareira-SP. Já Machado (2017) utilizou dados Hidroweb de precipitações diárias convertidas em acumuladas do período de 2003 a 2014 fazendo as compensações necessárias para as séries com falha e realizando a interpolação pelo método da Krigagem ordinária para verificar o comportamento da chuva acumulada na área de estudo.

Na estimativa da recarga subterrânea para diferentes usos agrícolas, Melo (2016) utilizou dados de precipitação obtidos do site da Agência Nacional de Águas - ANA para determinar a média ponderada entre os registros considerando como peso a distância entre a estação e outro ponto determinado.

Neves et al. (2015) utilizou planilhas do Excel® para organizar os dados de chuva, completando as falhas que não ultrapassaram 10 dias no mês com dados existentes em postos vizinhos.

Assim, os trabalhos partem de dados históricos que por muitas vezes necessitam do preenchimento de falhas, que são agrupados em médias e estes por sua vez empregadas na estimativa em regiões não monitoradas por meio de interpoladores.

3.5.2 Solos

Os solos são originados das rochas que ao sofrerem uma série de fenômenos, biológicos, físicos e químicos dão origem à organização do regolito em uma série de camadas denominadas horizontes. As partículas do solo relacionadas com a textura são classificadas em argila, silte e areia e estão em proporções variadas na composição dos horizontes (LEPSCH, 2010).

É a textura juntamente com a estrutura adequada do solo que irão influenciar a porosidade e conseqüentemente a capacidade de armazenamento de água (Cooper, 2015). Os solos arenosos retêm menos água quando

saturados porque têm menor porosidade total, ou seja, têm maior quantidade de poros grandes. Os solos argilosos têm uma distribuição de poros mais homogênea, então retêm mais água. O solo arenoso tem menor área superficial, então retém menos água que o argiloso (SANTOS e REICHERT [s.d.]).

O agrupamento das partículas minerais e matéria orgânica em agregados forma a estrutura do solo. As características estruturais do solo são responsáveis pela maior ou menor capacidade de infiltração de água e permeabilidade do solo (SANTOS e REICHERT, [s.d.]).

As condições de infiltração de água no solo dependem da porosidade. Os latossolos, classe de predominância na área de estudo, por exemplo, são solos bem drenados, muito intemperizados e praticamente sem a presença de minerais primários. O teor de argila aumenta com a profundidade, são muito ácidos, típicos de regiões tropicais e equatoriais e presentes em regiões de relevo plano e suave ondulado, mas também presentes em relevo montanhoso.

3.5.3 Lineamentos

Os lineamentos de drenagem e de relevo podem ser utilizados para a caracterização morfoestrutural de uma área (CORDEIRO *et al.*, 2021). A identificação destas linhas retilíneas na morfologia e nas feições de drenagem e de relevo indica os locais do ambiente onde é mais propício à recarga dos aquíferos por infiltração das águas de chuva (FROTA, 2019).

Isto ocorre porque existe uma relação entre lineamentos, fraturas nas rochas e recarga dos aquíferos. A existência de lineamentos geralmente está associada a fraturas nas rochas e descontinuidades litológicas, o que favorece a infiltração de água (COUTINHO *et al.*, 2017).

Pires e Miranda (2017) estudaram a relação entre lineamentos e as vazões anômalas de poços construídos aleatoriamente nas proximidades de padrões geométricos de lineamentos utilizando imagens de satélite e constataram uma maior probabilidade de maior vazão nos poços que se encontram nas proximidades dos lineamentos.

A geologia estrutural e a geomorfologia, aliadas às técnicas de sensoriamento remoto têm sido muito utilizadas na determinação de padrões nas

estruturas geomorfológicas e sua relação com os fatores determinantes da produção de água (FURTADO *et al.*, 2021).

Conforme Moreira (2003), o sensoriamento remoto tem sido muito utilizado como um sistema de obtenção de informações no âmbito dos recursos naturais, renováveis e não-renováveis e segundo Féres e Fortes (2017), pode ser utilizado para a identificação dos lineamentos em uma determinada região.

Com o desenvolvimento dos sistemas de informações geográficas muitos estudos ambientais passaram a ser realizados de forma mais dinâmica. Existem vários equipamentos e métodos disponíveis para este fim e a utilização dos satélites é um dos mais promissores, inclusive na gestão da qualidade e quantidade dos recursos hídricos.

No âmbito da qualidade da água, segundo Staehr *et al.* (2022), as características temporais e espaciais das tecnologias do sensoriamento remoto são vantajosas no monitoramento dinâmico, além do desenvolvimento de novos sensores hiperespectrais e da inteligência artificial.

Contudo, segundo Florenzano (2002), mesmo que tenhamos à nossa disposição vários dados do SSR (Sistema de Sensoriamento Remoto) é necessário submeter estes dados a um processo de interpretação. Os dados brutos obtidos pelos sensores remotos necessitam ser transformados em informações. Assim, a interpretação ocorre quando se identificam os objetos representados na cena, quer sejam estradas, rios, áreas urbanas, vegetação, etc.

Para tanto, é necessário utilizar elementos de interpretação: tonalidade/cor, textura, tamanho, forma, sombra, altura, padrão e localização. Destes elementos e também no caso dos lineamentos o padrão, segundo Leonardi (2020), é muito utilizado no reconhecimento de características das estruturas tanto naturais, quanto artificiais.

Atualmente os satélites são muito utilizados na identificação de lineamentos. Um exemplo são dados advindos do satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite), que segundo a EMBRAPA (2022), teve seu início de operação em janeiro de 2006 e terminou sua operação em maio de 2011. Possuía os sensores: AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2), o PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) e o PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping) com um

radiômetro pancromático com resolução espacial de 2,5 metros que fornecia dados com alta acurácia (1m) para elaboração de modelos digitais de elevação. Suas imagens são fornecidas gratuitamente pela internet.

Os Modelos Digitais do Terreno (MDT) são muito utilizados em geoprocessamento para representação do relevo. Consiste em uma descrição matemática do terreno por meio de interpolação. Uma de suas grandes vantagens é poder obter informações importantes da superfície do terreno sem a necessidade de ir ao local.

O MDT é obtido por meio da aquisição de dados que podem ser realizados por sensoriamento remoto, como o obtido pelo ALOS por meio do sensor PALSAR, e a geração do MDT por meio de programação computacional empregando-se interpoladores que estimam o valor da altitude para locais não amostrados a partir dos dados de Curvas de Nível e Pontos Cotados (GONÇALVES, 2002).

Segundo Tinós *et al.* (2014), existem várias técnicas de utilização do MDT como fonte de dados para a identificação de estruturas geológicas e formas de relevo. O sombreamento é uma delas e garante um bom resultado na análise das feições do ambiente.

A técnica de relevo sombreado é utilizada por alguns softwares de geoprocessamento. Utiliza uma fonte de luz, a declividade e aspectos da superfície de elevação para obtenção de uma representação 3D de uma superfície do terreno levando em consideração a posição relativa do sol (ARCGIS, 2023).

Para grandes bacias hidrográficas Carvalho e Latrubesse (2004) utilizaram imagens Interferometric Synthetic Aperture Radar - IFSAR, derivados da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) na identificação de lineamentos estruturais com base no realce do relevo e utilizando diferentes ângulos de iluminação para obter o sombreamento e o efeito de concavidade e convexidade, necessários na identificação das feições.

3.5.4 Densidade de drenagem

São muitos os fatores que podem ser utilizados na determinação do potencial de recarga dos aquíferos. A densidade de drenagem é um destes fatores.

A rede de drenagem é formada por todos os cursos de água, quer seja um pequeno córrego, riacho ou rio principal (Pinto *et al.*, 2017). A densidade de drenagem é um dos parâmetros utilizados na análise morfométrica de uma bacia hidrográfica e se expressa pela relação dada entre o comprimento de todos os rios e córregos, pela área total da bacia hidrográfica.

Sua determinação é critério importante para a análise do potencial de recarga dos aquíferos. Quanto maior a densidade de drenagem, menor será a capacidade de infiltração da água de chuva que poderia abastecer o aquífero (CHRISTOFOLETTI, 1980 apud ALVES SOUZA, 2022).

Sendo assim, para sua determinação é necessária uma análise que envolva, muitas vezes, grandes áreas.

3.5.5 Uso e ocupação do solo

Houve, nos últimos 30 anos no Brasil, um rápido crescimento das cidades. Em 1970 o país tinha 53% da sua população na área urbana, no início do século XXI já estava com 83% da população vivendo nas cidades (MATA *et al.*, 2006). Esta expansão é também preocupante visto que as áreas urbanas podem influenciar o regime hidrológico promovendo alterações na recarga dos aquíferos.

Esta expansão em sua maioria se dá de forma desordenada, o que agrava ainda mais os impactos causados. Uma forma de se minimizar tais impactos seria por meio de projetos de urbanização que considerem o conhecimento a respeito dos processos locais relacionados à infiltração da água que vai abastecer o aquífero. Para tanto, utilizam-se dados geomorfológicos, climáticos, pedológicos e de uso e ocupação do solo que irão subsidiar os cálculos do impacto da urbanização sobre a recarga dos aquíferos.

As alterações na recarga pela ocupação não planejada ou sem controle vêm crescendo a cada ano, como exemplo cita-se o trabalho de Martins Júnior *et al.* (2021), que afirma que mesmo protegidas pela legislação, as áreas verdes públicas não têm mantido a cobertura vegetal necessária ao solo.

O manejo adequado das áreas agrícolas, incluindo a adoção de práticas conservacionistas como a rotação de culturas, o uso de cobertura vegetal e a implementação de sistemas de irrigação eficientes, pode contribuir para a recarga dos aquíferos. Essas práticas ajudam a reduzir a erosão do solo e a compactação, melhorando a infiltração da água e, conseqüentemente, a recarga dos aquíferos. De outra forma, a utilização de técnicas agrícolas rudimentares como a queimada e o desmatamento contribuem para a degradação dos recursos naturais, inclusive o solo, ainda mais quando se associam ações antrópicas em regiões de clima semiárido (SILVA *et al.*, 2018).

Segundo Galvão (2020), áreas de pastagem possuem baixa capacidade de retenção de umidade na camada superficial do solo o que, juntamente com pisoteio dos animais, contribuem para a diminuição da capacidade de infiltração de água no solo.

Quando o solo está exposto, seja devido ao desmatamento, à remoção da vegetação nativa ou à prática de cultivos intensivos, há um aumento da erosão e da perda de matéria orgânica, o que pode afetar negativamente a capacidade de infiltração da água no subsolo. A presença de cobertura vegetal, como gramíneas e árvores, desempenha um papel importante na retenção de água e na redução da erosão, facilitando assim a recarga dos aquíferos.

3.5.6 Declividade

A declividade tem influência direta na taxa de infiltração de água no solo. O deflúvio, ou escoamento superficial, é o processo de escoamento da água por ação da gravidade, após sua precipitação na superfície do terreno. Se o deflúvio é de grande magnitude, ou não, depende de uma série de fatores como por

exemplo tipo de vegetação, área da bacia, intensidade da chuva e outros, inclusive da declividade (FEITOSA, 2008).

Vidaletti *et al.* (2021), determinou o efeito da declividade na taxa de infiltração de água no solo comparando-a com a cobertura de palha e constatou que esta exerce maior influência na infiltração do que a declividade, porém, a declividade tem maior influência na infiltração quando ocorrem chuvas de maior intensidade.

Existe uma forte influência da declividade sobre o tempo de permanência da água na superfície do solo e consequentemente na recarga dos aquíferos. Em terrenos planos de alta altitude a recarga dos aquíferos é ainda mais acentuada, já em terrenos planos de baixa altitude há uma tendência de diminuir o potencial de recarga (FRANCISCO; BRAGA e ALBUQUERQUE FILHO, 2019).

3.5.7 Hidrogeologia

Um dos pontos mais importantes do ciclo da água está na infiltração no solo de parte da chuva que irá ficar armazenada nos depósitos denominados aquíferos, constituindo-se como parcela da água subterrânea.

De forma geral no Brasil os depósitos sedimentares, pelas suas características de porosidade e permeabilidade intersticial primária, são umas das mais importantes estruturas por armazenarem parcelas significativas de água doce.

Acontece que na maioria das vezes os estudos e ações gerenciais em bacias hidrográficas consideram as águas superficiais distintas das águas subterrâneas. No entanto, existe uma relação entre o escoamento de base e o escoamento superficial que geralmente é influenciado indiretamente pelas classes hidrogeológicas. Na maioria das vezes o escoamento de base é muito maior do que a vazão dos cursos d'água o que evidencia a necessidade de se estabelecer estratégias de melhoria da infiltração nas bacias hidrográficas como forma de garantia da vazão perene dos rios (COELHO *et al.*, 2015)

No caso específico do aquífero Cauê, situado no Quadrilátero Ferrífero-MG, Mourão, Loureiro e Alkimin (2008) constataram uma provável mistura de águas originárias de aquíferos adjacentes e dos aquíferos rasos inconsolidados e até mesmo uma grande variabilidade química em função da heterogeneidade mineralógica da unidade Cauê.

Assim, a obtenção de informações a respeito da hidrogeologia e da hidrolitologia de uma região é condição básica para o entendimento da recarga dos aquíferos e seu relacionamento com a precipitação podendo-se, a partir daí, inclusive caracterizar os aquíferos quanto à produção de água pelos poços perfurados (MARCUIZZO, 2018).

A garantia do abastecimento de água para um município está relacionada com as suas características lito-estruturais de maneira que a sistematização dos sistemas aquíferos auxilia na compreensão do comportamento do meio condutor de água (GONÇALVES, 2021).

3.6 Análise multicritério – método AHP (Processo de Análise Hierárquica)

Da necessidade de se ter a resolução de problemas é que se faz a opção por uma tomada de decisão. Assim, surgiu a Teoria da Decisão no campo do conhecimento científico para apoiar o processo decisório que é um processo que envolve várias etapas. Porém, não é um processo plenamente racional porque existe sempre a intuição no âmbito do seu exercício (GOMES, 2007).

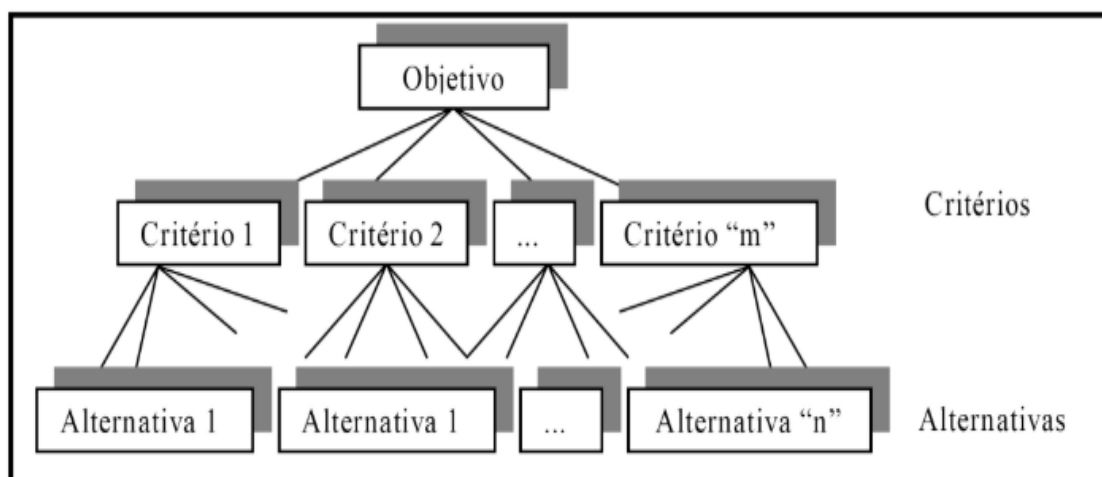
Em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), para efeito de modelagem em estudos hidrogeológicos, utiliza-se o conhecimento empírico para selecionar os vários fatores ou multicritérios que influenciam o processo estudado atribuindo-se, de forma intuitiva, pesos a estes fatores de acordo com algumas regras.

Assim, um dos métodos de análise de decisão multicriterial muito utilizado em SIG é o modelo matemático de análise hierárquica (Analytic Hierarchy Process – AHP), desenvolvido por Saaty na década de 70 que consiste numa metodologia de uso consagrado na tomada de decisão que define escolhas e

determina alternativas ponderando aspectos qualitativos e quantitativos (RIBEIRO, 2011).

Segundo Costa (2002), o AHP se baseia na construção de hierarquias sendo que o problema a ser resolvido fica no primeiro nível hierárquico, o segundo nível corresponde aos critérios e no terceiro nível estão as alternativas (Quadro 1).

Quadro 1: Estrutura hierárquica.



Fonte: Barros, Marins; Souza, 2009

A definição de prioridades se faz dentro de um processo de escolha intuitiva, par a par, dos critérios utilizados, dentro de um mesmo nível de hierarquia, compondo, por meio da transformação de uma linguagem verbal para uma linguagem numérica (Quadro 2) e um quadro de julgamento (Quadro 3) com conteúdo normalizado.

Quadro 2: Escala numérica

| Escala numérica | Escala conceitual | Descrição |
|-----------------|--|--|
| 1 | Igual importância | As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo |
| 3 | Importância pequena de uma sobre a outra | A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação à outra |
| 5 | Importância grande ou essencial | A experiência e o juízo favorecem fortemente uma atividade em relação à outra |
| 7 | Importância muito grande ou demonstrada | Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra. Pode ser demonstrada na prática. |
| 9 | Importância absoluta | A evidência favorece uma atividade em relação a outra, com o mais alto grau de segurança |
| 2, 4, 6, 8 | Valores intermediários | Quando se busca uma condição de compromisso entre duas definições |

Fonte: adaptado de Saaty (1987).

Quadro 3: Exemplo de Critérios e escala de julgamento.

| | | Criteria | | more important ? | Scale |
|---|---|------------------|------------------|------------------|-------|
| i | j | A | B | A or B | (1-9) |
| 1 | 2 | Geologia | Dens. Lineamento | A | 4 |
| 1 | 3 | | Dens. Drenagem | A | 3 |
| 1 | 4 | | Solos | A | 5 |
| 1 | 5 | | Precipitação | A | 6 |
| 1 | 6 | | Declividade | A | 9 |
| 1 | 7 | | Uso do solo | A | 9 |
| 1 | 8 | | | | |
| 2 | 3 | Dens. Lineamento | Dens. Drenagem | A | 3 |
| 2 | 4 | | Solos | A | 4 |
| 2 | 5 | | Precipitação | A | 5 |
| 2 | 6 | | Declividade | A | 7 |
| 2 | 7 | | Uso do solo | A | 8 |
| 2 | 8 | | | | |
| 3 | 4 | Dens. Drenagem | Solos | A | 3 |
| 3 | 5 | | Precipitação | A | 4 |
| 3 | 6 | | Declividade | A | 6 |
| 3 | 7 | | Uso do solo | A | 7 |
| 3 | 8 | | | | |

Fonte: Adaptado de Goepel, 2018.

Finalmente, para que os julgamentos realizados tenham um adequado grau de coerência, se calcula a Razão de Consistência (CR) que irá medir a confiabilidade dos valores de comparação atribuídos na construção da matriz. Para valores de CR maior que 0,1, considera-se que os julgamentos não são confiáveis, ou seja, os valores de comparação atribuídos na matriz.

$$RC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} / IR$$

Onde:

- n é a ordem da matriz; e
- $\lambda_{m\acute{a}x}$ é dado pela equação

$$\lambda_m = \text{m\acute{e}da do vetor} \frac{Aw}{w}$$

Sendo:

- A é a matriz de comparação paritária; e

- w é o vetor peso

Existem várias formas de obtenção do vetor peso, neste trabalho optou-se pelo método da média geométrica, onde cada componente do vetor peso é calculado como a média geométrica dos elementos da respectiva linha divididos por um termo de normalização, conforme a equação:

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij}\right)^{1/n}}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{i=1}^n a_{ij}\right)^{1/n}}$$

Nesta:

- w_i : peso do critério i ;
- a_{ij} : valor de importância do critério i em relação ao critério j .

IR é definido como Índice Randômico Médio, que varia com o tamanho da matriz. Na Tabela 1 são apresentados os valores de IR, de acordo com Saaty (2000).

Tabela 1: Índice Randômico Médio do AHP em função do tamanho da matriz.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,00 | 0,00 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 | 1.51 | 1.48 | 1.56 | 1.57 | 1.59 |

Fonte: Saaty (2000).

Após a obtenção dos valores que compõem o grau hierárquico de cada tema, é empregada a álgebra de mapas para se obter um resultado único. A álgebra de mapas é muito utilizada em sistemas de informações geográficas quando se deseja realizar uma modelagem cartográfica realizando o tratamento e análise de dados espaciais. Por meio de operadores matemáticos e funções analíticas combinam-se temas de mapas para gerar novos temas de mapas.

Padilha, Gobatto e Batistella (2017), utilizaram a técnica para estimar a aptidão agrícola das terras utilizando a combinação de mapa de solo com mapa de declividade por meio da Linguagem Espacial de Tratamento Algébrico (LEGAL).

Calderano Filho *et al.* (2018), estimaram áreas propensas à vulnerabilidade ambiental em uma área serrana por meio da combinação de

mapas de solo, litologia, relevo, declive, uso da terra, vegetação e pluviosidade sobrepondo estes temas com base na interação, ponderação e atribuição de valores de acordo com o grau de importância.

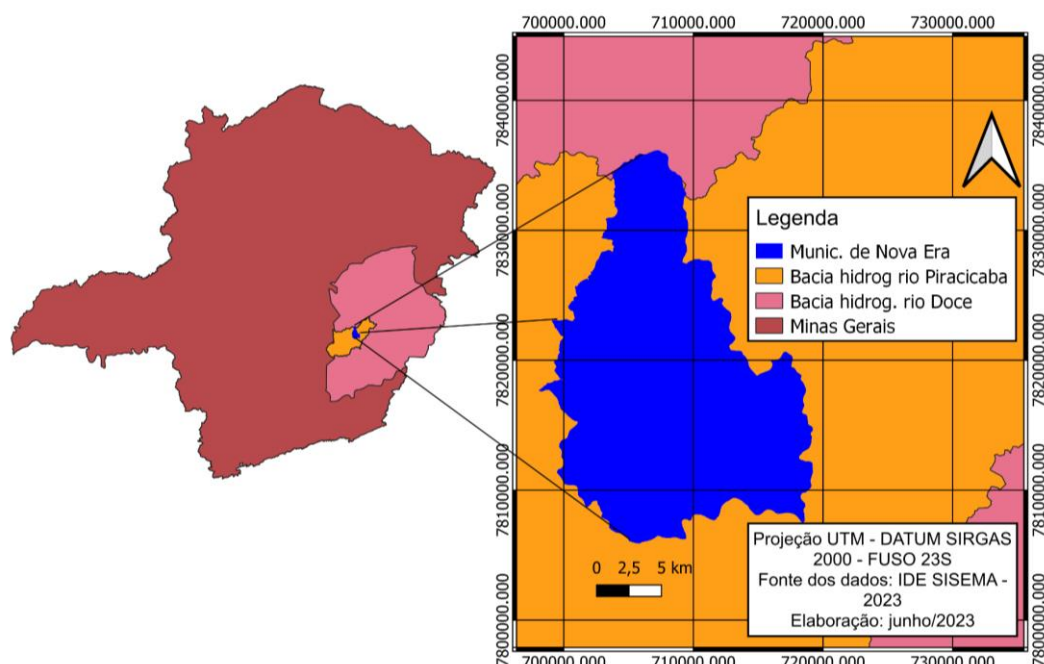
De forma semelhante, utilizou-se neste trabalho a combinação dos mapas temáticos com operadores matemáticos considerando-se a importância de cada tema e o grau de sua influência conforme os critérios hierárquicos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

O município de Nova Era está situado na região centro-leste do estado de Minas Gerais, nas coordenadas geográficas: Latitude: 19° 46' 01,02" Sul, Longitude: 43° 2' 07,41" Oeste, na bacia do rio Piracicaba afluente do rio Doce (Figura 5), entre a Mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte, a região Metropolitana do Vale do Aço e a Microrregião de Itabira. Faz divisa com os municípios de Bela Vista de Minas, Antônio Dias, São Domingos da Prata, Itabira e Santa Maria de Itabira.

Figura 5: Localização do município de Nova Era.



Fonte: Autor, 2022.

O município tem 17.528 habitantes, distribuídos da seguinte forma: 88% na área urbana (15.420 habitantes) e 12% na zona rural (2.108 habitantes); uma área de 361,9 km² e densidade demográfica de 48,43 hab/km² (IBGE, 2022).

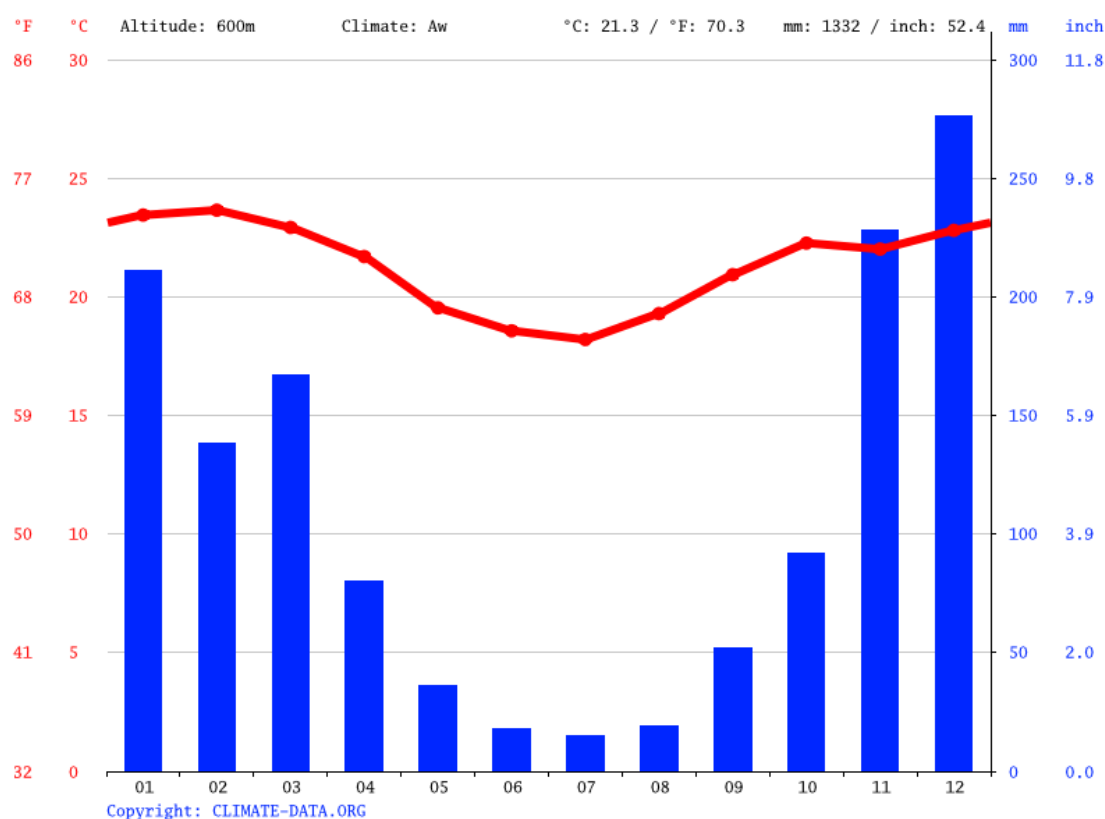
A altitude máxima é de 1.222 m no Alto dos Passos, e a altitude mínima, 790 m, ocorre na foz do córrego Barbosa. A densidade de drenagem do município é bem alta. Os vales são muito encaixados, com vertentes de 100 a 200 m e com raras planícies fluviais.

Nova Era, assim como toda microrregião de Itabira, está inserida no contexto geotectônico do Quadrilátero Ferrífero, onde estão concentradas grandes reservas minerais (PMSB, 2015).

4.1.1 Clima

O clima de Nova Era, segundo a classificação de Köppen e Geiger, é Aw, a temperatura média anual é de 21,3° C e a média anual de pluviosidade é de 1332 mm. Dezembro é o mês que mais chove, com média de 276 mm e julho é o mês com a menor pluviosidade, com média de 15 mm (CLIMATE-DATA.ORG, 2022), conforme demonstrado na Figura 6.

Figura 6: Temperaturas e precipitações médias em Nova Era.



Fonte: CLIMATE-DATA.ORG, 2022.

4.1.2 Hidrografia

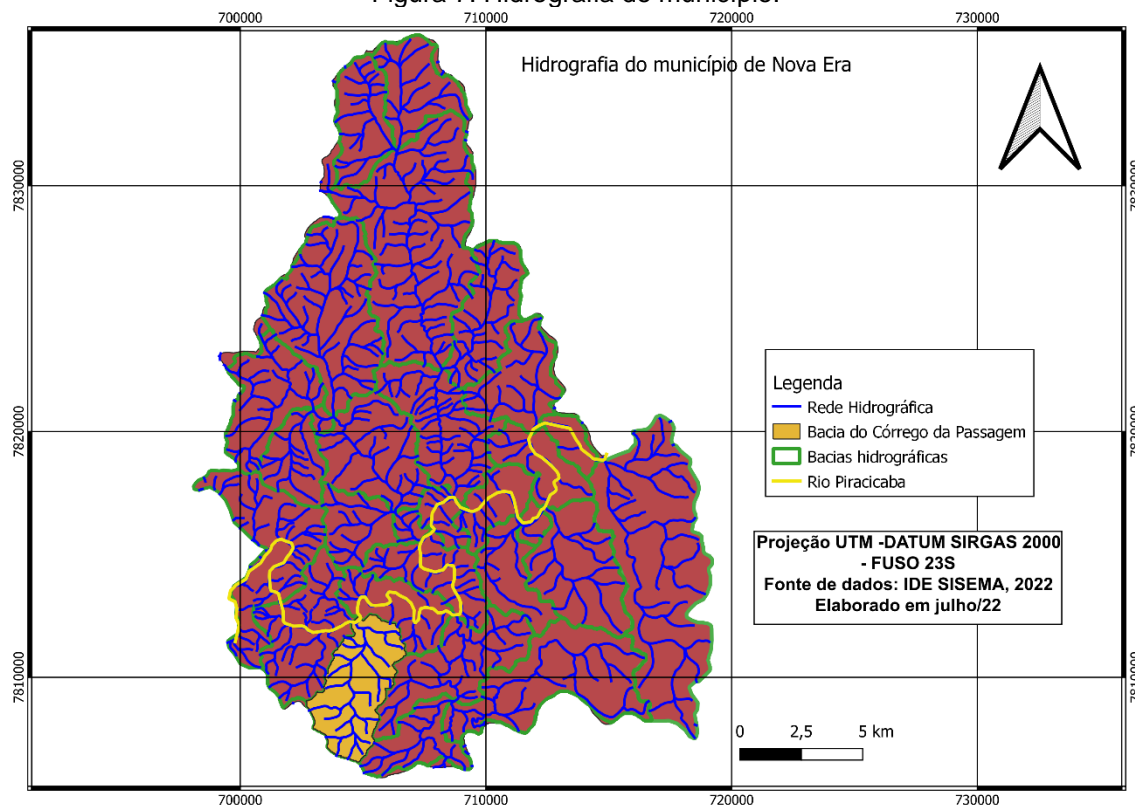
O rio Piracicaba é o principal rio do município e cruza o território principalmente em sua porção urbana central (Figura 7). Nova Era está situada

na região do médio Piracicaba e pertence à Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) denominada DO2, do rio Doce.

Os principais afluentes do rio Piracicaba no município são o rio do Peixe, pela margem esquerda, e o rio da Prata, pela margem direita. Além destes, merecem destaque os córregos da Passagem, do Piçarrão e São José, responsáveis por boa parte do abastecimento de água potável para o município, inclusive o rio da Prata.

Ressalta-se que a bacia do córrego da Passagem (em destaque na Figura 7) fornece cerca de 61,2% da água tratada, porém, já vem sofrendo queda na vazão ao longo dos últimos anos principalmente nos meses finais do período de estiagem comprometendo o pleno abastecimento de água para a população.

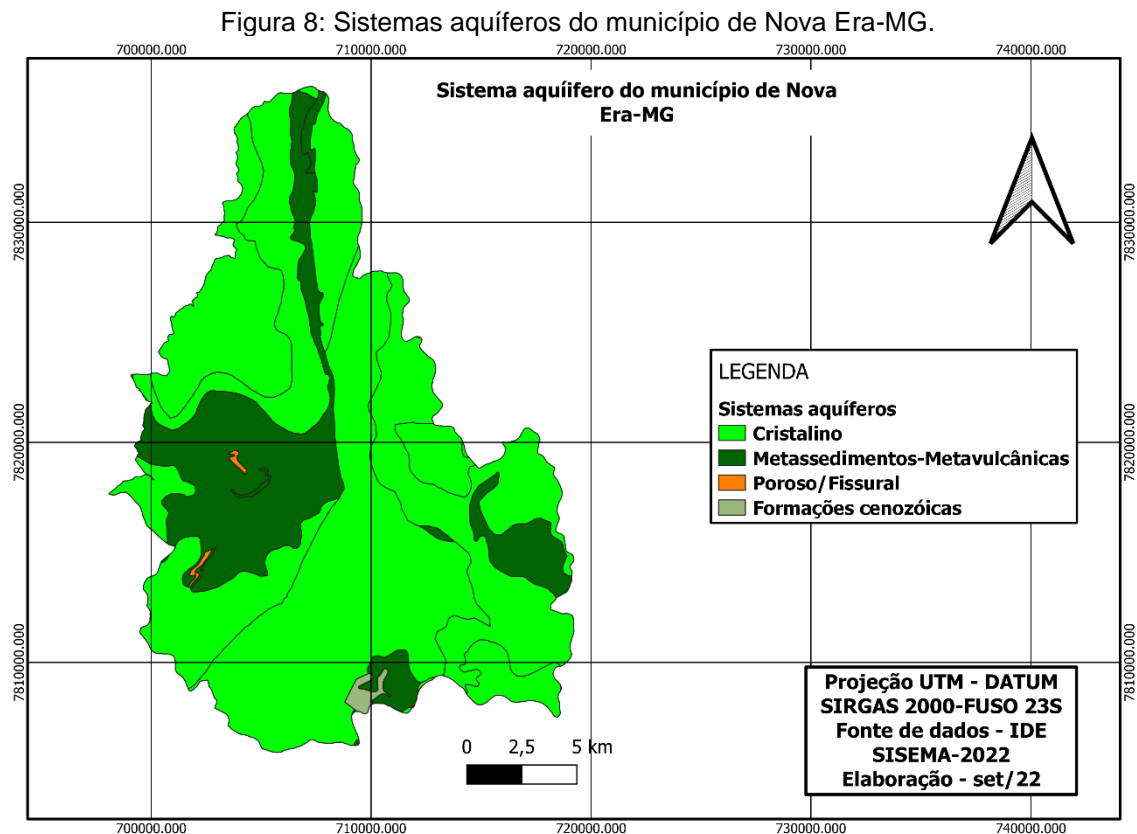
Figura 7: Hidrografia do município.



Fonte: Autor, 2022.

4.1.3 Hidrogeologia

A Figura 8 ilustra os sistemas aquíferos do município de Nova Era, sendo a formação Cristalino a predominante na área de estudo, seguida de Metassedimento-Metavulcânicas.



Fonte: Autor, 2022.

Conforme DINIZ *et al.* (2014), a caracterização da área de estudo de acordo com as classes de aquíferos é (5) Fr – unidade fraturada de produtividade baixa de difícil fornecimento contínuo. A vazão está situada entre 1 a 10m³/s.

4.2 Metodologia

Esta pesquisa foi desenvolvida por meio da aquisição de dados provenientes do sensoriamento remoto e bases de dados secundárias. As plataformas digitais utilizadas foram o Sistema de Infraestrutura de Dados

Espaciais – IDE-SISEMA-MG para a aquisição do mapa geológico, a malha hidrográfica e o mapa de solos, a ASF Data Search Vertex para a aquisição do Modelo Digital de Elevação-MDE do satélite Alos Palsar, o Banco de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, para os dados de precipitação e do MapBiomas para a aquisição do mapa de uso e ocupação do solo.

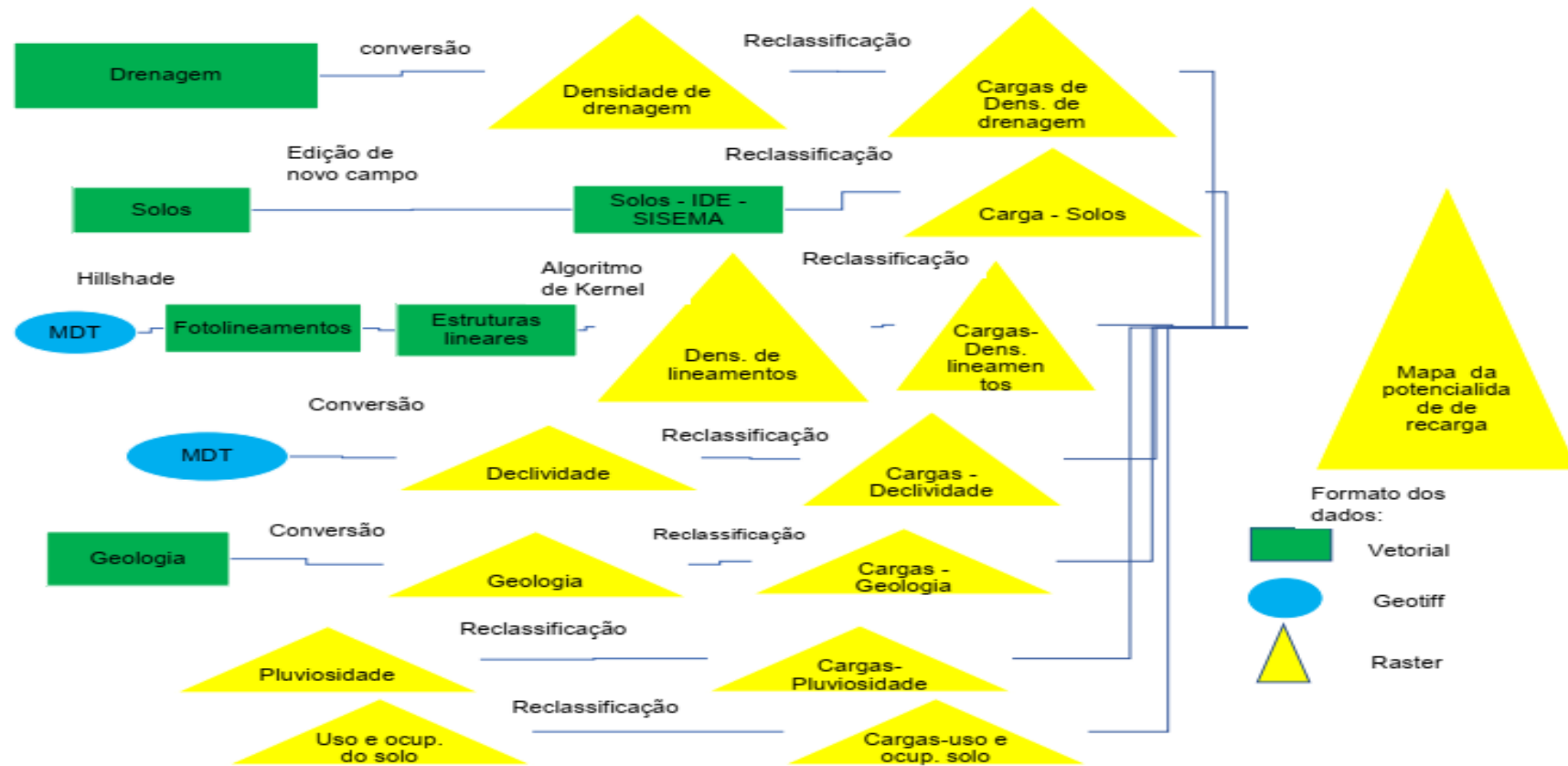
Estes dados foram processados em ambiente SIG, empregando-se o Qgis e por meio do software ArcGis®, versão 10.3 da ESRI (Environmental Systems Research Institute) disponibilizado pelo laboratório de geoprocessamento da Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI. Os mapas foram recortados para o limite da área de estudo e todos sob o sistema de coordenadas UTM, datum SIRGAS 2000, zona 23S.

A determinação da correta influência dos fatores de recarga dos aquíferos (pluviosidade, solos, densidade de lineamentos, densidade de drenagem, uso e ocupação do solo, declividade e hidrogeologia) no alcance dos objetivos propostos deste trabalho não é tarefa fácil. Para diminuir o grau de subjetividade quando se trabalha com vários fatores, foi utilizado o método AHP (Analytic Hierarchy Process) ou Processo Analítico Hierárquico (método multicritério para tomada de decisão) para a determinação menos subjetiva dos pesos que representam a influência dos fatores na recarga dos aquíferos.

Cada um destes fatores foi denominado critério para aplicação do AHP que posteriormente foram transformados em mapas temáticos. Porém, cada critério foi subdividido em classes que também exercem influência peculiar na determinação da recarga, influência está aqui denominada de carga, definidas por meio de uma revisão bibliográfica.

Em síntese, a Figura 9 – um fluxograma metodológico - representa os procedimentos realizados nas diferentes fases deste trabalho.

Figura 9: Fluxograma metodológico.



Fonte: Ribeiro (2011), adaptado.

Em um sistema de matriz foram estabelecidos pares de comparação dos fatores utilizados para determinar o quanto um fator é mais importante do que outro no processo de recarga dos aquíferos. Assim, por procedimentos matemáticos e baseando-se na literatura como referência, estabeleceram-se pesos para cada um dos critérios e respectivas classes e posteriormente, utilizando-se da álgebra de mapas foi gerado o produto final.

Foram gerados os mapas temáticos considerando os seguintes fatores ambientais determinantes da recarga dos aquíferos: a densidade de lineamentos, geologia, densidade de drenagem, solos, precipitação, declividade e uso e ocupação do solo.

4.2.1 Mapas temáticos

4.2.1.1 Mapa de densidade de lineamentos

Na identificação dos lineamentos estruturais foi utilizado um Modelo Digital de Elevação (MDE) juntamente com técnicas de geoprocessamento para fazer o sombreamento. Foi empregada a imagem ALPRP273796780 de 16/3/2011 - órbita 27379 - sistema sensor: PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo) com resolução espacial de 12,5m do satélite ALOS, adquirida gratuitamente em Imagem Mapping: <https://search.asf.alaska.edu/>.

Para identificar os lineamentos foram observadas as discontinuidades estruturais, os traçados retilíneos de drenagem superficial, bruscas variações de litologias, partindo-se de determinadas orientações preferenciais. Utilizou-se o ArcGIS® 10.8 com o MDE (Modelo Digital de Elevação) adicionado a seu banco de dados e a ferramenta Spatial Analyst e HillShade para elaboração dos mapas do relevo com sombreamentos originados das faixas de ângulos azimutais de

315; 270, 225; 180; 135; 90, 45 e 0 graus de iluminação artificial gerando uma camada para cada ângulo. Para todos os sombreamentos foi considerado um ângulo vertical de 45°.

O efeito do sombreamento em várias direções é útil porque promove o contraste que beneficia o reconhecimento das feições. Na obtenção dos lineamentos considerou-se no relevo as cristas alinhadas, trechos de rios, fundos de vales e drenagens, de acordo com a interpretação dos mapas azimutais de sombreamento gerados e produzidos com a ferramenta Hillshade do ArcGIS.

Assim, foram geradas 8 camadas de lineamentos, uma para cada ângulo azimutal de iluminação artificial. Em seguida estas 8 camadas foram transformadas em apenas uma contendo todos os lineamentos. Esta camada foi empregada para o cálculo da densidade de lineamentos por meio da ferramenta Line Density do ArcGIS.

A determinação das classes de densidade de lineamentos em baixa, moderada, alta e muito alta bem como a reclassificação do mapa por cargas foram definidas tomando como referência a classificação de Pereira (2016). Esta reclassificação considerou o fato de que quanto maior a densidade de lineamentos, maior a favorabilidade de abastecimento dos aquíferos, recebendo a classe “muito alta” a maior carga e a classe “baixa” a menor carga.

4.2.1.2 Mapa de geologia

Conforme estratigrafia da área de estudo, o Supergrupo Rio das Velhas (composto pelo grupo Maquiné e Nova Lima) compõe uma boa parte do embasamento geológico do município; a geologia da área de estudo compreende rochas de idades arqueana e proterozóica que foram tectonizadas por diversos eventos de dobramento, cisalhamento e falhamento (PMSB, 2015). As principais rochas que predominam nestes domínios são o Gnaiss Monlevade, Metagranitóides com fluorita e Metagranitóides Borrachudos.

A existência de lineamentos estruturais no terreno pode significar presença de falhas, auxiliam no entendimento do contexto tectônico local e

influenciam a morfologia superficial. Assim, pode-se estabelecer uma relação entre a litologia, as estruturas, o relevo e a hidrografia (Feitosa, 2008).

Segundo Guarnieri (2003), existem no município três domínios de complexidade litoestrutural e lito-estratigráfica que compõem um sistema de falhas e lineamentos nas direções NNW/SSE, NNE/SSW e WSW/ENE que exerce considerável influência no sistema de drenagem e na morfologia regional.

Segundo Gonçalves, Pereira e Almeida (2021), o sistema aquífero formado por gnaisses e granitos são descontínuos, anisotrópicos, heterogêneos, fraturados e livres ou confinados sendo que a porosidade de fraturas favorece uma condição de maior permeabilidade.

O mapa geológico foi elaborado conforme CPRM (2023), utilizando-se originalmente os dados em formato vetorial.

4.2.1.3 Mapa densidade de drenagem

Para determinação da densidade de drenagem foi empregada a malha hidrográfica do IDE-SISEMA recortada para a área de estudo, processados no SIG – ArcGIS 10.3 ® com o uso da ferramenta “Line Density”. O mapa gerado foi reclassificado em baixa, moderada, alta e muito alta densidade de drenagem (Km/Km²) e as cargas definidas por meio de uma revisão bibliográfica.

4.2.1.4 Mapa de solos

O solo corresponde ao manto de intemperismo que recobre a litologia e sua gênese, relacionada com a rocha que lhe deu origem. Sua contribuição para a recarga está relacionada com sua porosidade que lhe confere permeabilidade.

Utilizaram-se dados vetoriais da plataforma IDE-SISEMA (2022) para a elaboração do mapa de solos recortado para a área de estudo. As cargas para cada classe de solos presente na área de estudo, foram definidas por meio de uma revisão bibliográfica.

4.2.1.5 Mapa de precipitação

O mapa de precipitação foi elaborado por meio da interpolação no SIG – ArcGIS 10.3® utilizando-se a precipitação média anual de estações pluviométricas que possuíam série histórica e se encontram dentro ou nas proximidades da área de estudo.

Foram selecionadas as estações das cidades de Conselheiro Lafaiete, Nova Era, Santa Maria de Itabira, Conceição do Mato Dentro, Belo Horizonte e Caratinga disponíveis no INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e da ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). Foi calculada a média de precipitação anual do período de 2003 a 2022 (19 anos) para cada estação e os valores interpolados para toda a área de estudo empregando-se o interpolador IDW do QGIS.

O interpolador IDW realiza atribuição de pesos aos pontos da amostra de maneira que a influência de um ponto sobre outro diminui com a distância do novo ponto a ser estimado (QGIS, 2023). Assim, pontos próximos do ponto a ser interpolado têm maior influência do que pontos mais distantes (EL-SHEIMY et al., 2005 apud GIACOMIN, 2014).

Após a elaboração do mapa de precipitação, este foi estratificado em classes de faixas de precipitação e reclassificado empregando-se cargas para cada faixa, tendo como referência a revisão bibliográfica realizada para este fim.

4.2.1.6 Mapa de declividade

A partir do MDE do Alos Palsar (ASF, 2022), recortado para a área de estudo, foi gerado o mapa de declividade em porcentagem, para a área de estudo.

O mapa foi estratificado em classes de declividade, empregando as classes definidas pela EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária)

Posteriormente o mapa estratificado foi reclassificado empregando as cargas definidas para cada classe por meio de uma revisão bibliográfica.

4.2.1.7 Mapa de uso e ocupação do solo

Há significativas diferenças na infiltração de água no solo de acordo com o uso e ocupação do solo. Em terrenos urbanos a impermeabilização do solo tem impacto significativo na diminuição da infiltração, ao passo que em áreas de mata nativa ocorre diminuição do escoamento superficial em eventos de grande precipitação.

O mapa de uso e ocupação do solo obtido a partir do raster da plataforma MapBiomas, do ano de 2020, foi recortado para o limite da bacia e reclassificado por meio das cargas definidas baseadas em uma revisão bibliográfica.

4.2.2 Método AHP

Na submissão ao método AHP a estruturação do problema e a atribuição dos pesos que correspondem à influência dos critérios foi baseada no trabalho de Pereira (2016).

Os critérios estudados, que geraram os mapas temáticos, foram submetidos à matriz de comparação para julgamento, normalização e determinação do índice de consistência dos julgamentos em planilha eletrônica preparada e especificamente fundamentada nos princípios teóricos do método AHP desenvolvida por Goepel (2018).

Após a definição dos pesos foi empregada a álgebra de mapas, tendo por ferramenta a “Calculadora de Raster” do QGis 3.24. Neste cálculo foram considerados os pesos de cada fator determinante para a recarga bem como cada mapa temático reclassificado de acordo com suas respectivas classes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Mapas temáticos

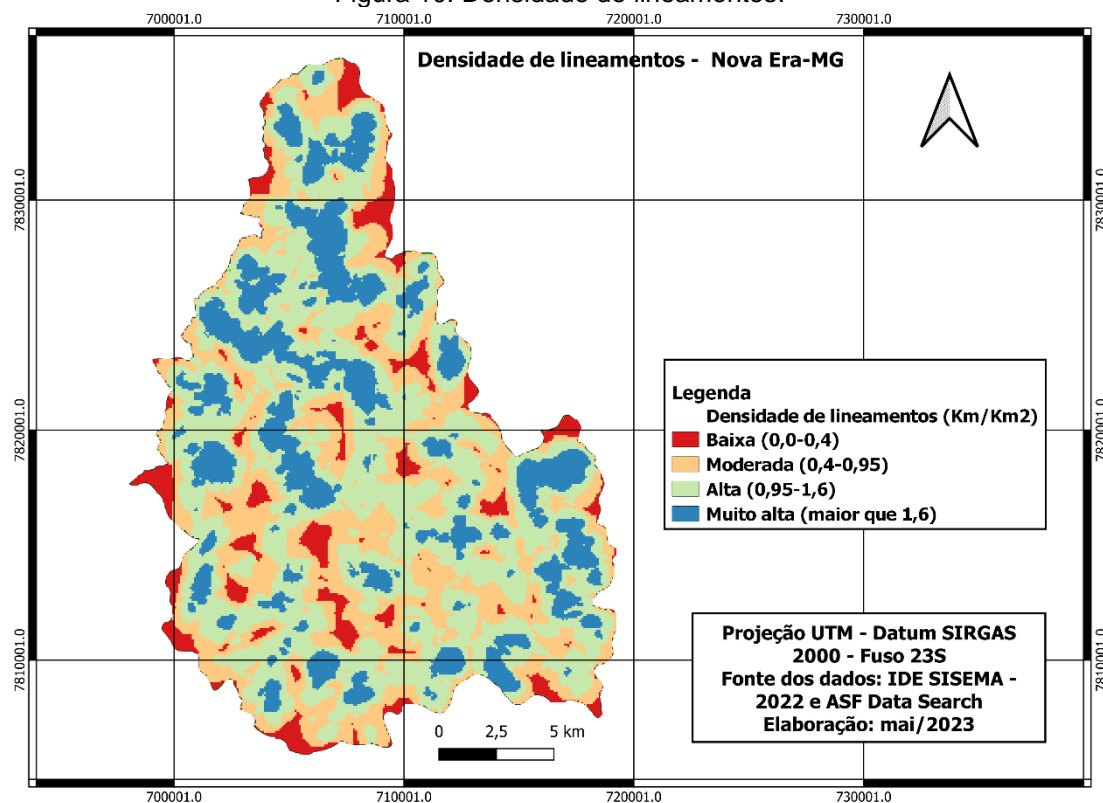
Os mapas temáticos foram obtidos das respectivas plataformas citadas na descrição da metodologia empregada neste trabalho e recortados para a área de estudo.

Cada mapa foi convertido para o mapa de cargas e empregados ao final para compor o mapa de Capacidade Natural de Produção de Água (CNPA), conforme resultados descritos a seguir.

5.1.1 Mapa de densidade de lineamentos

Foi empregada a ferramenta Line Density, presente no ArcToolbox - Spatial Analyst Tools - Density, do SIG ArcGis 10.3, com uma resolução espacial de 12,5m, obtendo-se o mapa densidade de lineamentos conforme ilustrado pela Figura 10.

Figura 10: Densidade de lineamentos.



Fonte: Autor, 2022.

A Tabela 2 traz a quantificação das classes de densidade de lineamentos determinadas para o município.

Tabela 2: Quantificação das classes de densidade de lineamentos para o município de Nova Era.

| Classes de densidade de lineamentos (km/km ²) | Área -km ² | % |
|---|-----------------------|-----|
| Baixa (< 0,4) | 27,84 | 8% |
| Moderada (0,40 - 0,95) | 104,99 | 29% |
| Alta (0,95 - 1,60) | 155,24 | 43% |
| Muito alta (> 1,60) | 73,88 | 20% |

Observa-se que a porção norte concentra uma quantidade maior de lineamentos, seguida da porção leste evidenciando também baixo a moderado valor para a densidade de drenagem nas regiões limites do município onde estão localizados os topos de morro e os “divisores de água”.

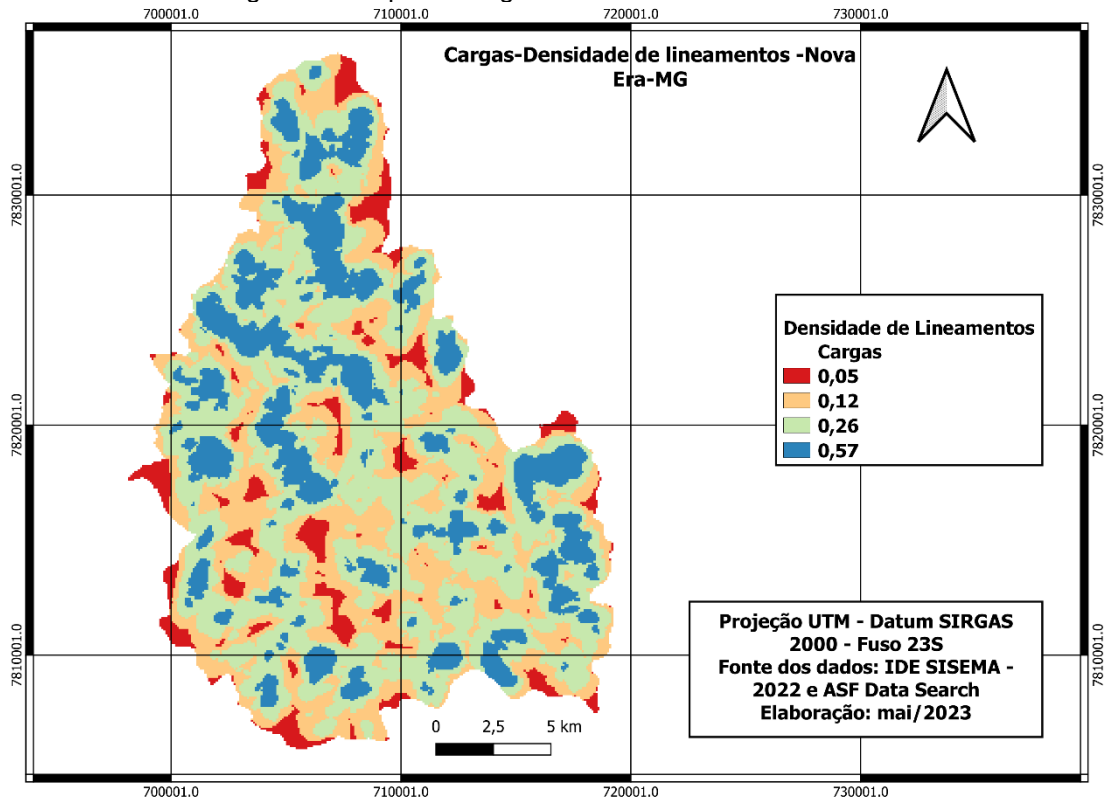
Para efeito de recarga dos aquíferos, quanto maior a densidade de lineamentos, maior a favorabilidade ao processo de recarga.

Assim, resultado foi reclassificado de acordo com as faixas apresentadas na Tabela 3, cujas cargas foram definidas a partir de revisão bibliográfica, tendo como autor de referência Pereira (2016), adaptado para a área de estudo, assim chegou-se ao mapa de cargas para o tema Densidade de lineamentos (Figura 11).

Tabela 3: Faixas da Densidade de Lineamentos utilizadas na reclassificação.

| Densidade de lineamentos -km/km² | Cargas |
|--|---------------|
| 0,00 – 0,4 | 0,05 |
| 0,4 – 0,95 | 0,12 |
| 0,95 – 1,6 | 0,26 |
| 1,6 – 3,27 | 0,57 |

Figura 11: Mapa de cargas - Densidade de lineamentos.

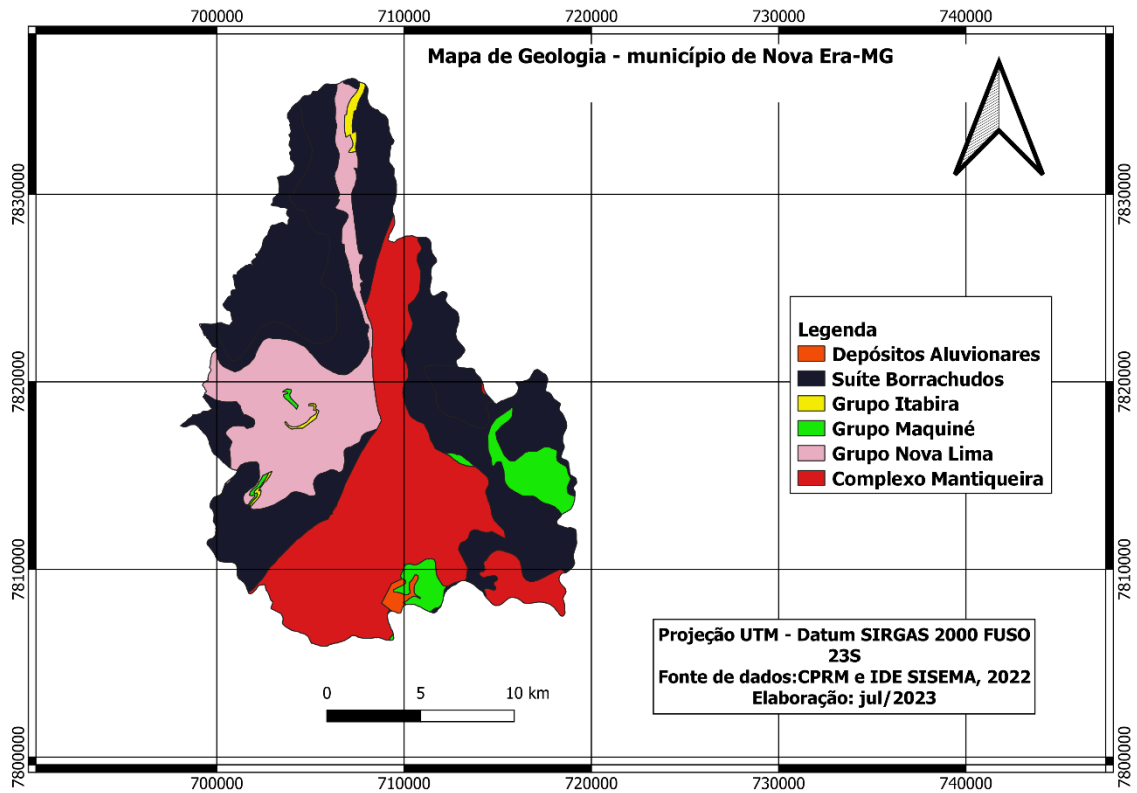


Fonte: Autor, 2023.

5.1.2 Mapa geológico

O mapa geológico foi recortado para o limite da bacia, como apresentado na Figura 12. De acordo com esta figura, existem 6 classes geológicas na área de estudo.

Figura 12: Mapa geológico da área de estudo.



Fonte: Autor, 2022.

A classe com predominância na área é a Suíte Borrachudos, como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4: Quantificação das classes de Geologia.

| Classes de Geologia | % |
|---|----------|
| Suíte Borrachudos (Açucena-augen gnaiss granítico, Açucena-biotita, granito e Bicas) | 48% |
| Grupo Maquiné (Rio das Velhas) | 4% |
| Grupo Nova Lima | 16% |
| Complexo Mantiqueira | 30% |
| Grupo Itabira | 1% |
| Depósitos aluvionares | 0,5% |

Segundo Oliveira (2018) os corpos Açucena são pertencentes à Suíte Borrachudos formado por rochas ígneas denominadas granitóides.

Os Depósitos Aluvionares compreendem areias, siltes e argilas e cascalhos. Os materiais de granulometria mais grosseira são encontrados junto às calhas fluviais enquanto que o material mais fino é encontrado geralmente nas planícies de inundação. De comportamento hidráulico sazonal e possuindo conexão hidráulicas com as águas de superfície, contribui para o fluxo de base nos períodos secos. Geralmente possuem níveis de água pouco profundos (RAMOS e PAIXÃO, 2004).

O grupo Mantiqueira compõe os complexos metamórficos da porção sul do Cráton São Francisco e são constituídos por gnaisses polideformados fazendo parte do embasamento cristalino (HERTZ, 1970 apud FAVERSANI, 2019).

O grupo Itabira, composto pela Formação Gandarela e Formação Cauê, faz parte do Supergrupo Minas. A Formação Cauê é composta por rochas de itabirito anfibolítico e dolomítico, xistos e filitos, A formação Gandarela é composta essencialmente por filitos (ENDO,1997 apud FAVERSANI, 2019).

Os grupos Maquiné e Nova Lima são formados por metassedimentos (quartzitos), metavulcânicas, filitos (SCHRANK & SOUZA FILHO, 1998 apud FAVERSAN, 2019).

Considerando a hidrogeologia já destacada na Figura 8, o embasamento Cristalino compreende os grupos geológicos Suíte Borrachudos e Complexo Mantiqueira. Já a unidade hidrogeológica das rochas metassedimentos/metavulcânicas compreende os grupos Itabira, Maquiné e Nova Lima.

Segundo Fernandes et al. (1994) e Mourão (2007) apud Gonçalves, Pereira e Almeida (2021), a unidade Cristalino - Formação Suíte Borrachudos e Complexo Granito-Gnáissico-Migmatítico - com rochas de granulometria média a predominantemente grossa, são pouco eficientes em termos de recarga. Esta unidade hidrogeológica comporta-se como aquífero fissural, sem porosidade primária em suas rochas. A ocorrência de água subterrânea está condicionada à presença de fraturas e fendas que lhe confere uma porosidade secundária. Os reservatórios são aleatórios, descontínuos e de pequena extensão (BOMFIM, 2010).

O aquífero Nova Lima de rochas xistosas e quartzíticas ferruginosa e metapelitos é fraturado, porém, impermeável a ponto de formar barreira hidráulica entre dois compartimentos, com capacidade de armazenamento e circulação bem reduzida e pequena favorabilidade hídrica (GONÇALVES et al., 2021).

Por outro lado, o grupo Itabira, pertencente ao Supergrupo Minas, é reconhecido nas formações rochosas de quartzito-itabiríticas com hematita das formações Caraça e Cauê em associação. Na região Norte do município cobrem o Gnaiss na localidade de Piçarrão onde é composto por itabiritos ricos, quartzito-itabiritos e quartzitos (SCHORSCHER, 1975 apud GUARNIERI, 2003).

Segundo Pereira (2016), a formação Cauê possui uma boa capacidade de recarga devido à sua característica granular, além de possuir corpos friáveis que favorecem a condutividade hidráulica. A recarga ocorre por meio da infiltração de águas pluviais pela espessa camada intemperizada, ocorrendo circulação de água por meio das fraturas e planos de estratificação e ao longo dos obstáculos impermeáveis promovidos pelas rochas intrusivas (GONÇALVES, 2021).

Considerando o exposto, as formações geológicas receberam cargas de acordo com sua maior ou menor favorabilidade no processo de recarga dos aquíferos.

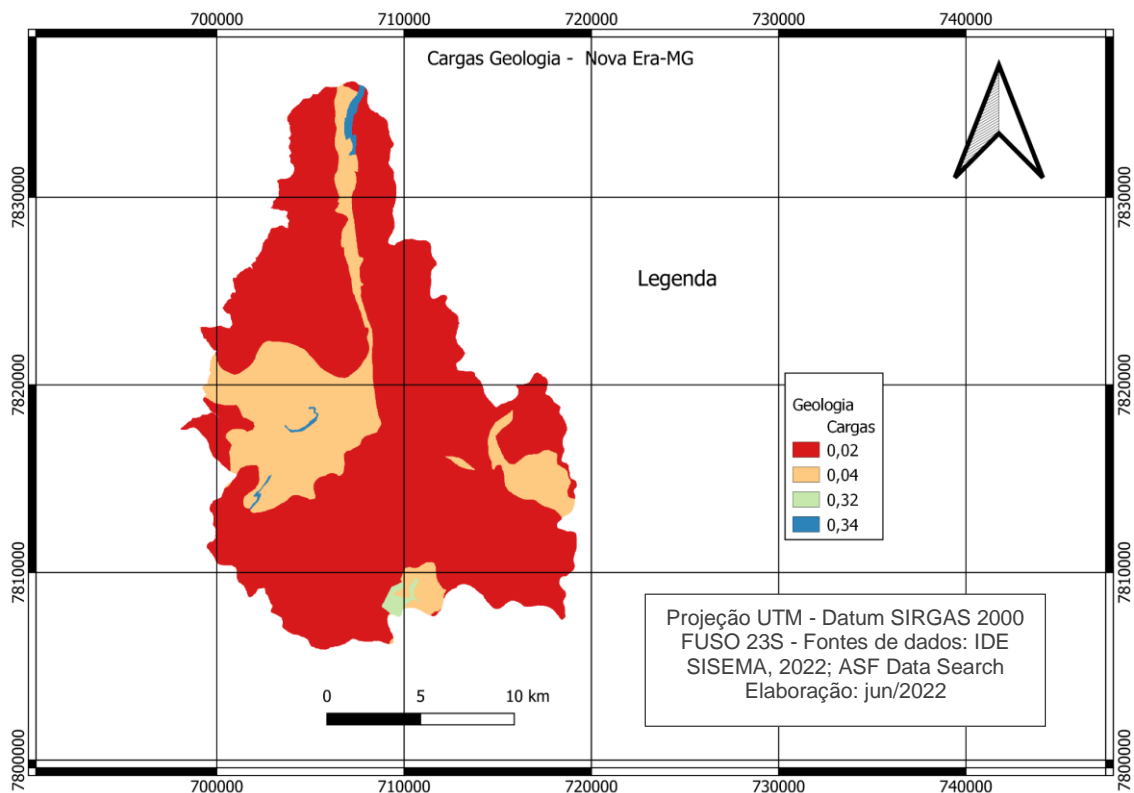
Após revisão bibliográfica, foi realizada a definição das cargas considerando-se como referência, os trabalhos de Pereira (2016) e Jacó (2019), conforme Tabela 5.

Tabela 5: Cargas para a Geologia, utilizadas na reclassificação.

| Unidade geológica | Carga |
|--|--------------|
| Maquiné e Nova Lima | 0,04 |
| Itabira | 0,34 |
| Complexo Mantiqueira e Suíte Borrachudos | 0,02 |
| Depósitos aluvionares | 0,32 |

Após a definição o mapa geológico da área de estudos foi reclassificado, chegando-se ao mapa de cargas geológicas apresentado na Figura 13.

Figura 13: Mapa de cargas – geologia.

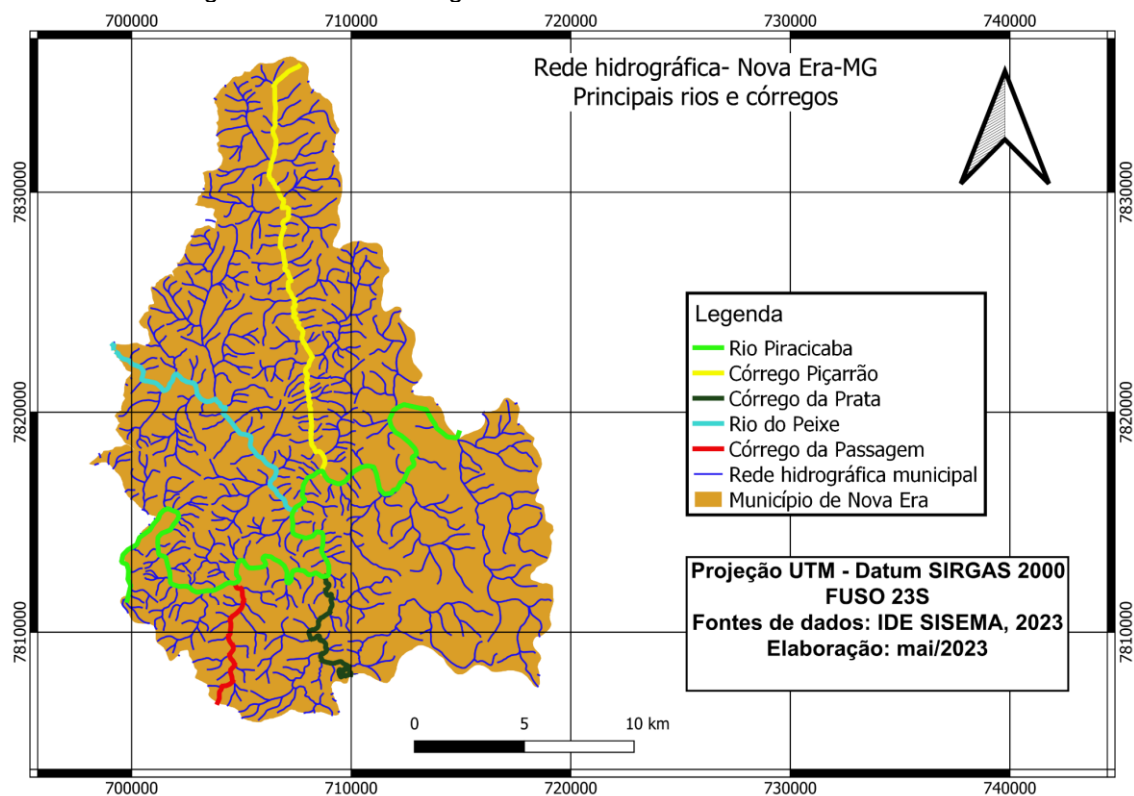


Fonte: Autor, 2023.

5.1.3 Mapa densidade de drenagem

A área de estudo apresenta uma ampla rede de drenagem, contando com 967 afluentes do rio Piracicaba que é o rio principal, com destaque para os afluentes rio do Prata, rio do Peixe, do Piçarrão e o córrego da Passagem (Figura 14).

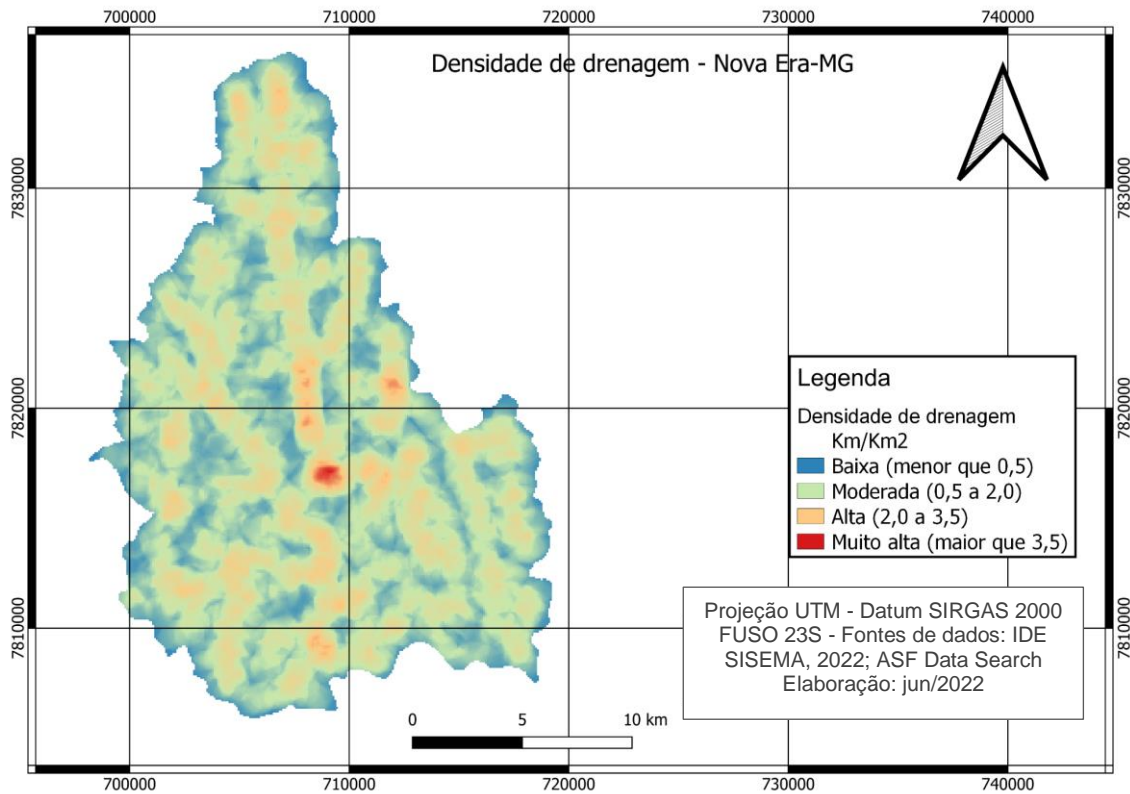
Figura 14: Malha hidrográfica da área de estudos.



Fonte: Autor, 2023.

A partir da malha hídrica obtida da base de dados geográfica do IDE Sisema e recortada para o limite da área de estudo, foi gerado o mapa de densidade de drenagem, apresentado na Figura 15.

Figura 15: Mapa de densidade de drenagem.



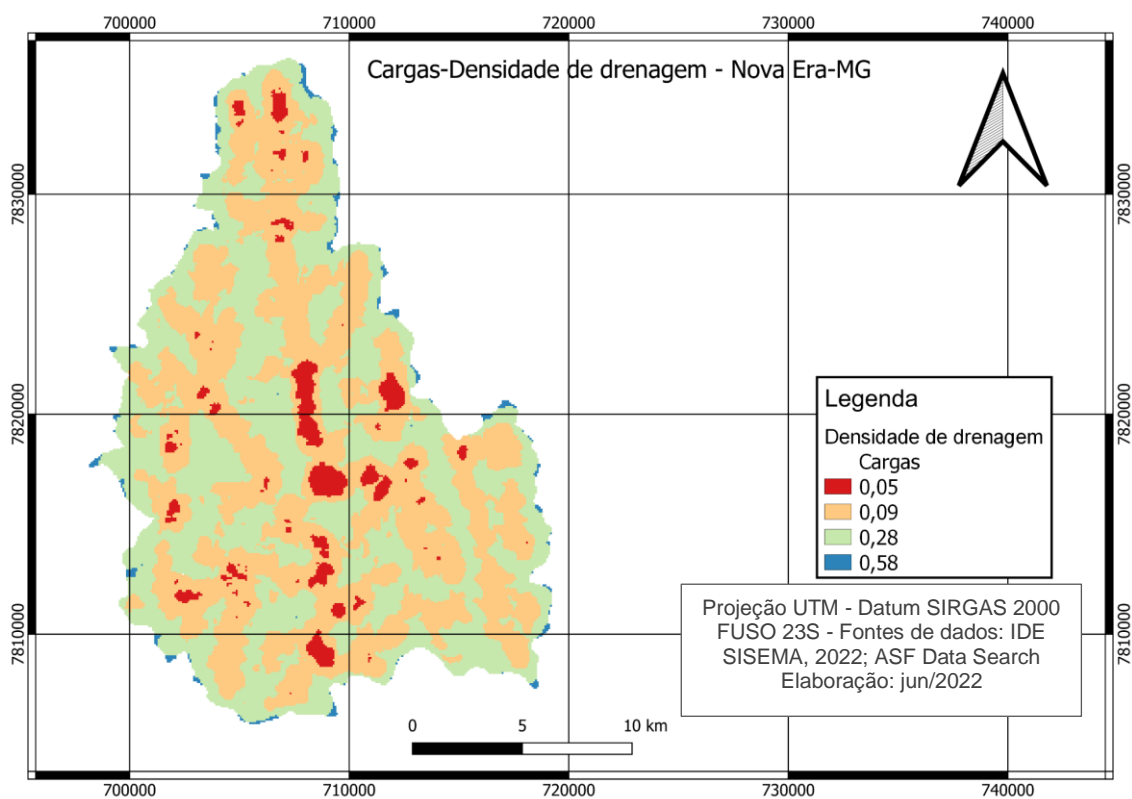
Fonte: Autor, 2023.

Este mapa foi reclassificado em função das cargas estabelecidas em revisão bibliográfica tendo como referência o trabalho de Pereira (2016), conforme Figura 16. A Tabela 6 representa a distribuição de cargas para as classes de densidade de drenagem. Na Tabela 6 é apresentada a quantificação das classes de densidade de drenagem.

Tabela 6: Cargas para Densidade de Drenagem.

| Densidade de Drenagem -km/km ² | Cargas |
|---|--------|
| Baixa(menor que 0,5) | 0,58 |
| Moderada (0,5 - 2,00) | 0,28 |
| Alta (2,00 - 3,5) | 0,09 |
| Muito alta (maior que 3,5) | 0,05 |

Figura 16: Mapa de cargas - Densidade de drenagem.



Fonte: Autor, 2023.

Assim, pode-se afirmar que o município se caracteriza por ter uma alta a moderada densidade de drenagem (Tabela 7), contudo, percebe-se que os topos de morro e as porções limítrofes se classificam como de baixa densidade de drenagem sendo, portanto, áreas com boa favorabilidade ao abastecimento dos aquíferos.

Tabela 7:Quantificação das classes de Densidade de Drenagem.

| Classes de densidade de drenagem(km/km2) | Área - km² | % |
|---|------------------------------|----------|
| Muito alta (maior que 3,5) | 15,82 | 4% |
| Alta (2,00 - 3,5) | 174,38 | 48% |
| Moderada (0,5 - 2,00) | 167,64 | 46% |
| Baixa (menor que 0,5) | 4,06 | 1% |

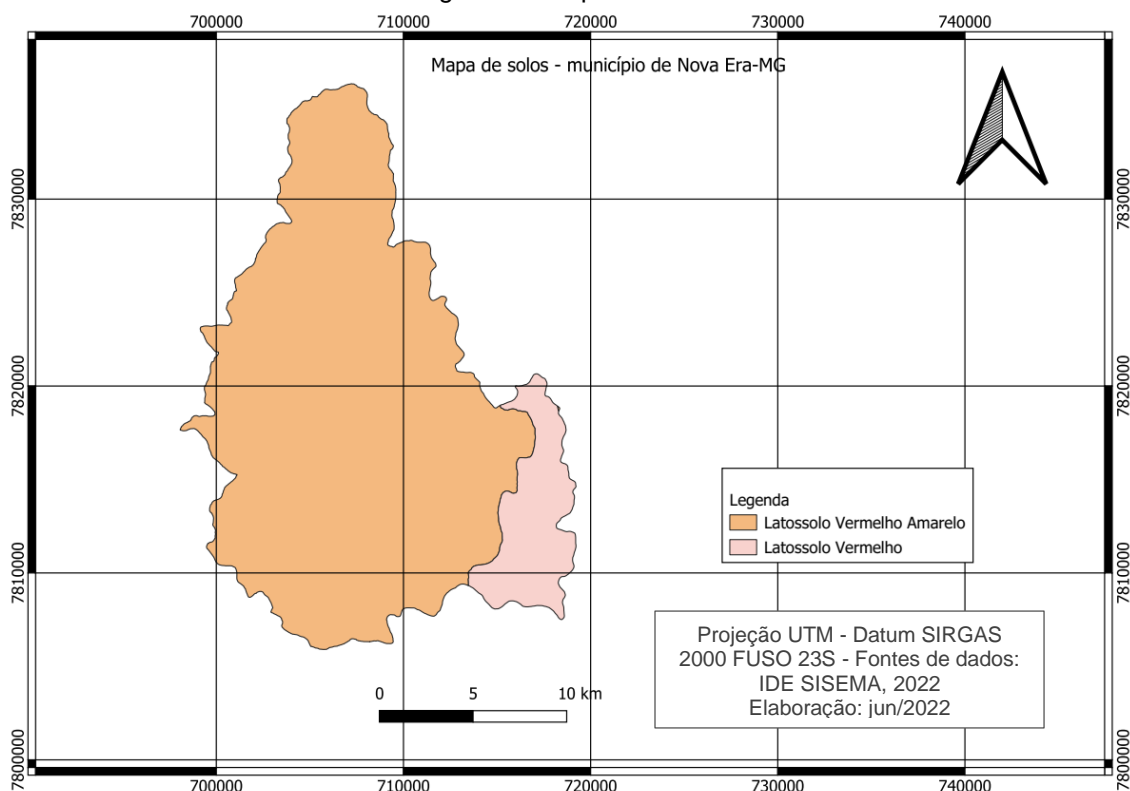
5.1.4 Mapa de solos

O mapa de solos foi também recortado para o limite da área de estudo, conforme Figura 17.

A área de estudo é composta por dois tipos de solos: Latossolo Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho. Segundo EMBRAPA (2018), os latossolos:

“São solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo...Variam de fortemente a bem drenados...São normalmente muito profundos, sendo a espessura do solum raramente inferior a 1 m”.

Figura 17: Mapa de solos.



Fonte: Autor, 2022.

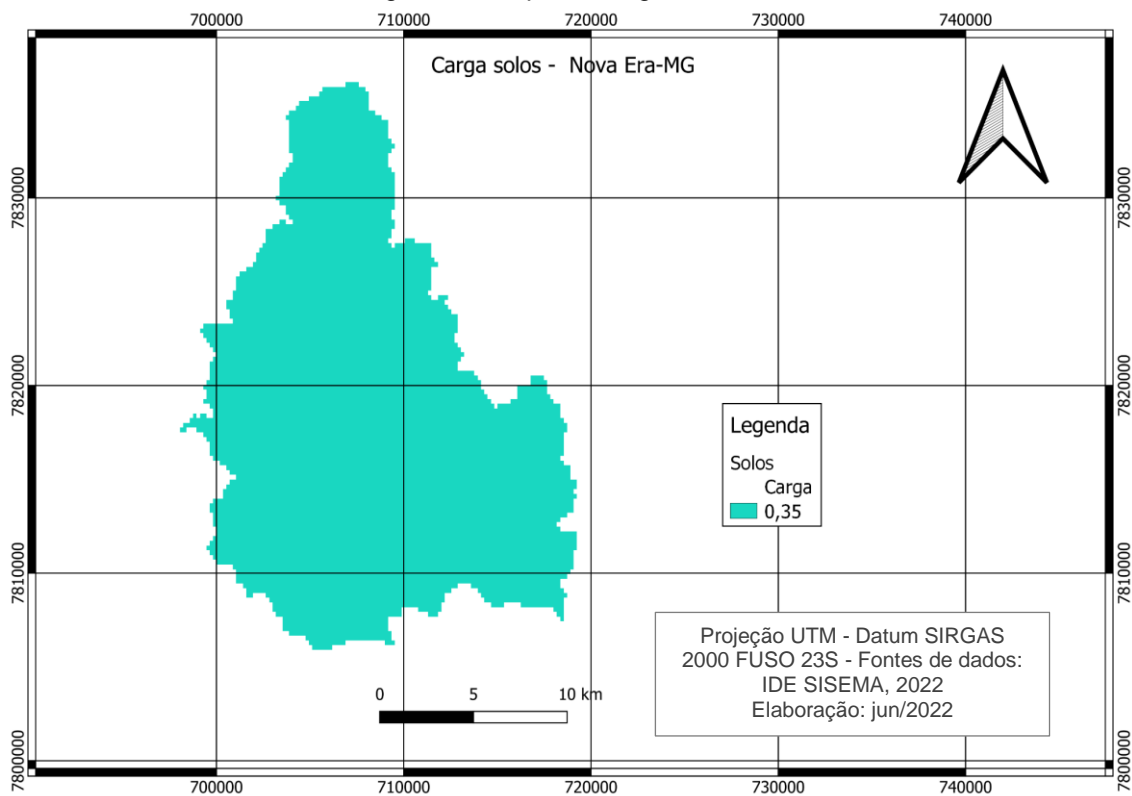
Este mapa foi rasterizado e reclassificado utilizando-se a revisão bibliográfica para definição das cargas, adotando-se, assim, os valores do trabalho de Pereira (2016), conforme a Tabela 8.

Tabela 8: Cargas para Solos.

| Solos | Cargas |
|----------------------------|--------|
| Latossolo Vermelho Amarelo | 0,35 |
| Latossolo Vermelho | 0,35 |

Assim, e considerando que ambos exercem a mesma influência na capacidade de recarga dos aquíferos devido às características semelhantes, considerou-se a mesma carga para os dois tipos de solo, conforme Figura 18.

Figura 18: Mapa de cargas – solos.



Fonte: Autor, 2023.

5.1.5 Mapa de precipitação

O mapa pluviométrico foi elaborado a partir da coleta de dados meteorológicos das estações meteorológicas, conforme o Quadro 4.

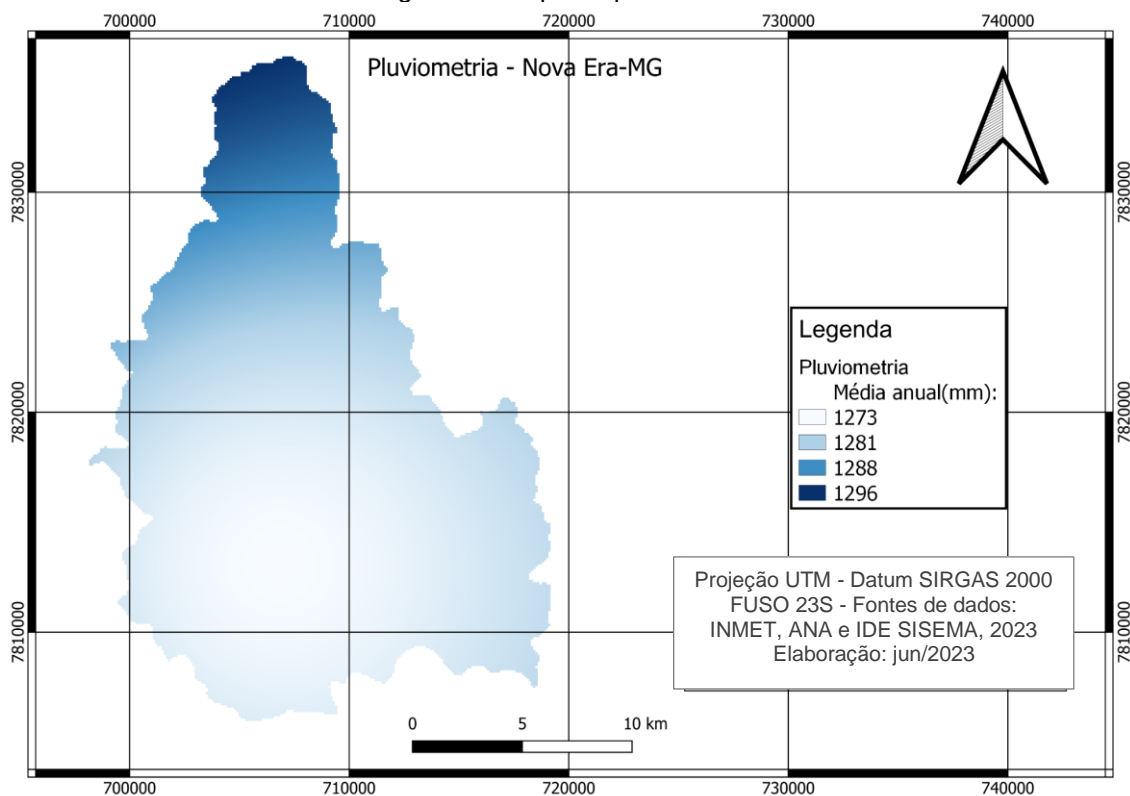
Quadro 4: Estações pluviométricas.

| ESTAÇÃO | IDENTIFICAÇÃO | LATITUDE | LONGITUDE | FONTE |
|--------------------------|---------------|----------|-----------|-------|
| NOVA ERA | 1943100 | 19,7667 | 43,0261 | ANA |
| CONSELHEIRO LAFAIETE | 2043005 | 20,625 | 43,7536 | ANA |
| SANTA MARIA DE ITABIRA | 1943008 | 19,4403 | 43,1186 | ANA |
| CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO | 83589 | 19,0203 | 43,4339 | INMET |
| BELO HORIZONTE | 83587 | 19,9344 | 43,9522 | INMET |
| CARATINGA | 83592 | 19,7358 | 42,1372 | INMET |

Fonte: ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico; INMET - Instituto Nacional de Meteorologia.

Para cada estação foi calculada a média da precipitação anual do período de 2003 a 2022 (19 anos) e os valores interpolados para toda a área de estudo empregando-se o interpolador IDW do QGIS (Figura 19).

Figura 19: Mapa de pluviometria.



Fonte: Autor, 2023.

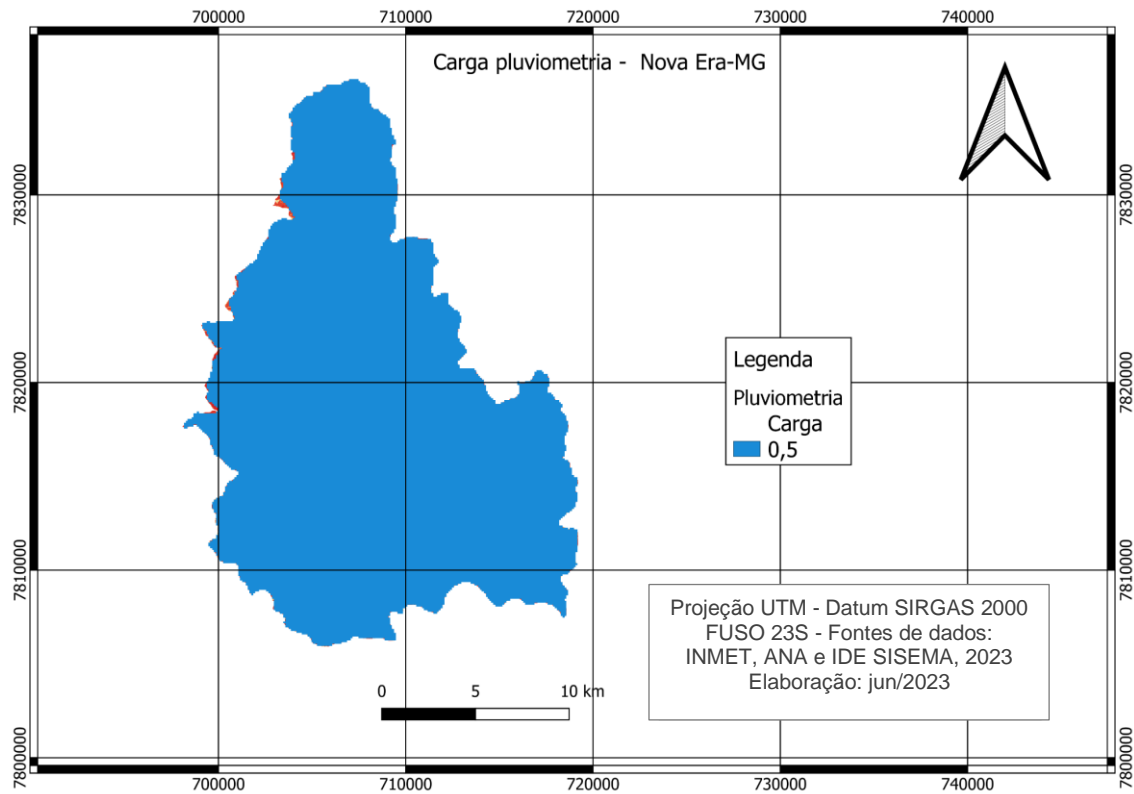
Obtido o mapa de precipitação, este foi reclassificado de acordo com as faixas apresentadas na Tabela 9 cuja carga foi definida a partir de revisão bibliográfica, tendo como autor de referência Ribeiro (2011).

Tabela 9: Carga para a pluviometria,

| Pluviometria(mm) | Cargas |
|-------------------|--------|
| 1200 - 1400 | 0,50 |

Como os valores de precipitação são muito próximos, portanto, não havendo variabilidade de chuva ao longo de toda extensão da área de estudo, optou-se por considerar apenas uma classe de carga, conforme Figura 20.

Figura 20: Mapa de cargas pluviométricas.

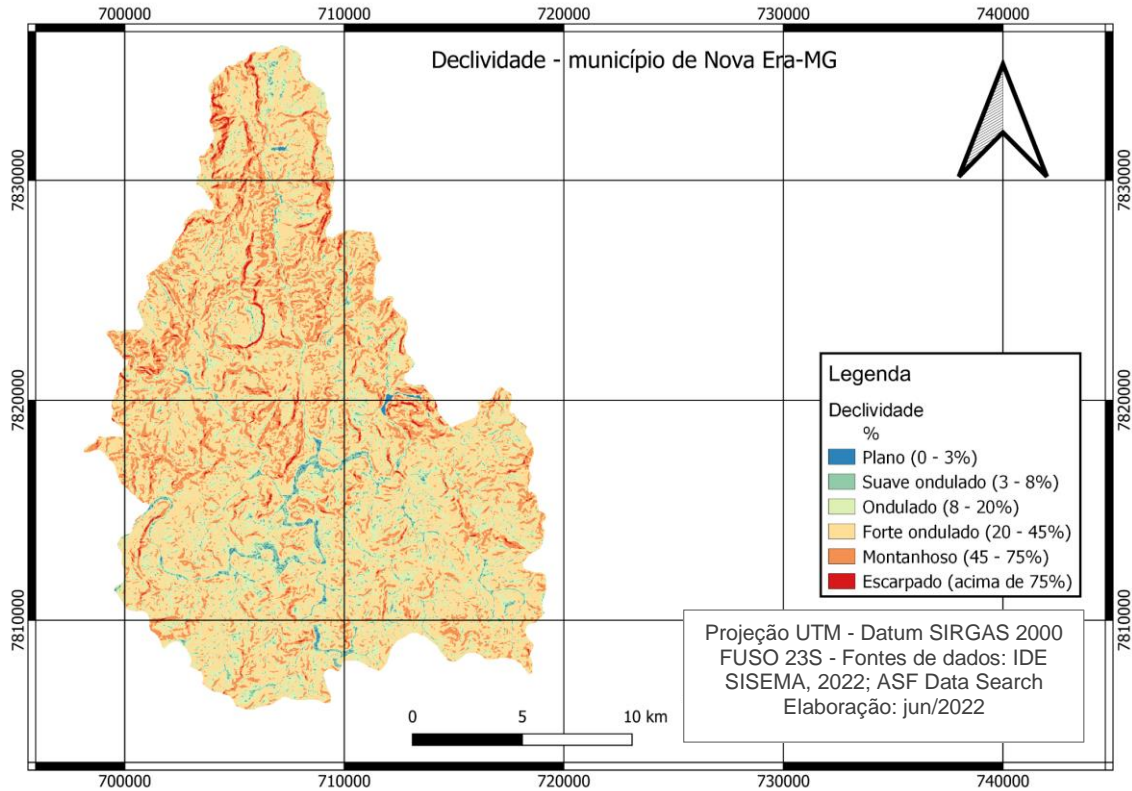


Fonte: Autor, 2023.

5.1.6 Mapa de declividade

A partir do MDE foi derivado o mapa de declividade em porcentagem para a área de estudo, como apresentado na Figura 21, e classificado segundo EMBRAPA (2018).

Figura 21: Mapa de declividade.



Fonte: Autor, 2023.

Assim, a área de estudo apresenta as seis classes de declividade, sendo em maior proporção a faixa que varia de Ondulado a Montanhoso, com predomínio da classe Forte Ondulado na região, como pode ser observado na Tabela 10.

Tabela 10: Quantificação das classes de declividade.

| Classes de declividade(%) | Área -km² | % |
|----------------------------------|-----------------------------|----------|
| Plano (0 - 3) | 2,27 | 1% |
| Suave Ondulado (3 - 8) | 14,45 | 4% |
| Ondulado (8 - 20) | 64,12 | 18% |
| Forte Ondulado (20 - 45) | 194,36 | 54% |
| Montanhoso (45 -75) | 76,57 | 21% |
| Escarpado (acima de 75) | 8,32 | 2% |

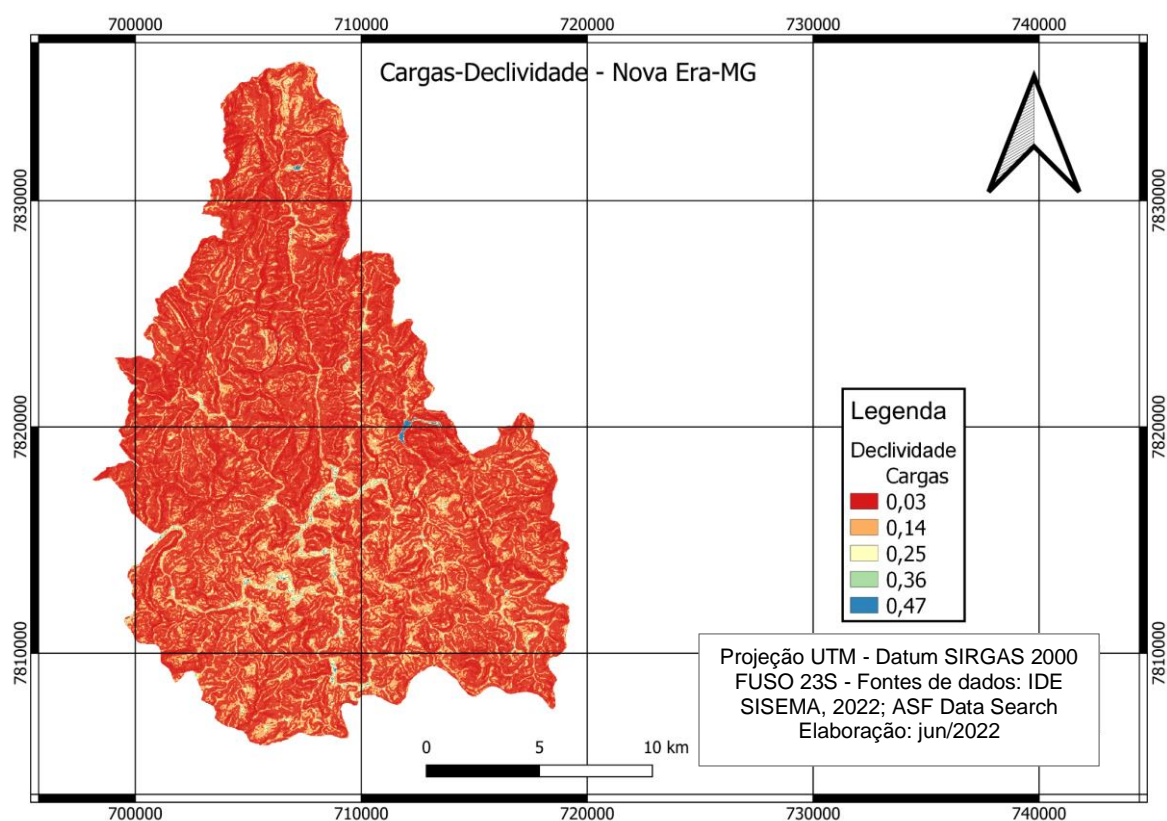
Este mapa foi reclassificado após revisão bibliográfica adotando-se como referência o trabalho de Pereira (2016) para a definição das cargas, conforme Tabela 11. Considerando-se que quanto maior a declividade menor será o tempo que a água tem para infiltrar.

Tabela 11: Cargas para Declividade.

| Declividade (em %) | Cargas |
|---------------------------|---------------|
| Plano (0 - 3) | 0,47 |
| Suave ondulado (3 - 8) | 0,25 |
| Ondulado (8 - 20) | 0,15 |
| Forte ondulado (20 - 45) | 0,06 |
| Montanhoso (45 -75) | 0,04 |
| Escarpado (acima de 75) | 0,03 |

A Figura 22 representa o mapa de cargas para as 6 classes de declividade do município.

Figura 22: Mapa de cargas – Declividade.



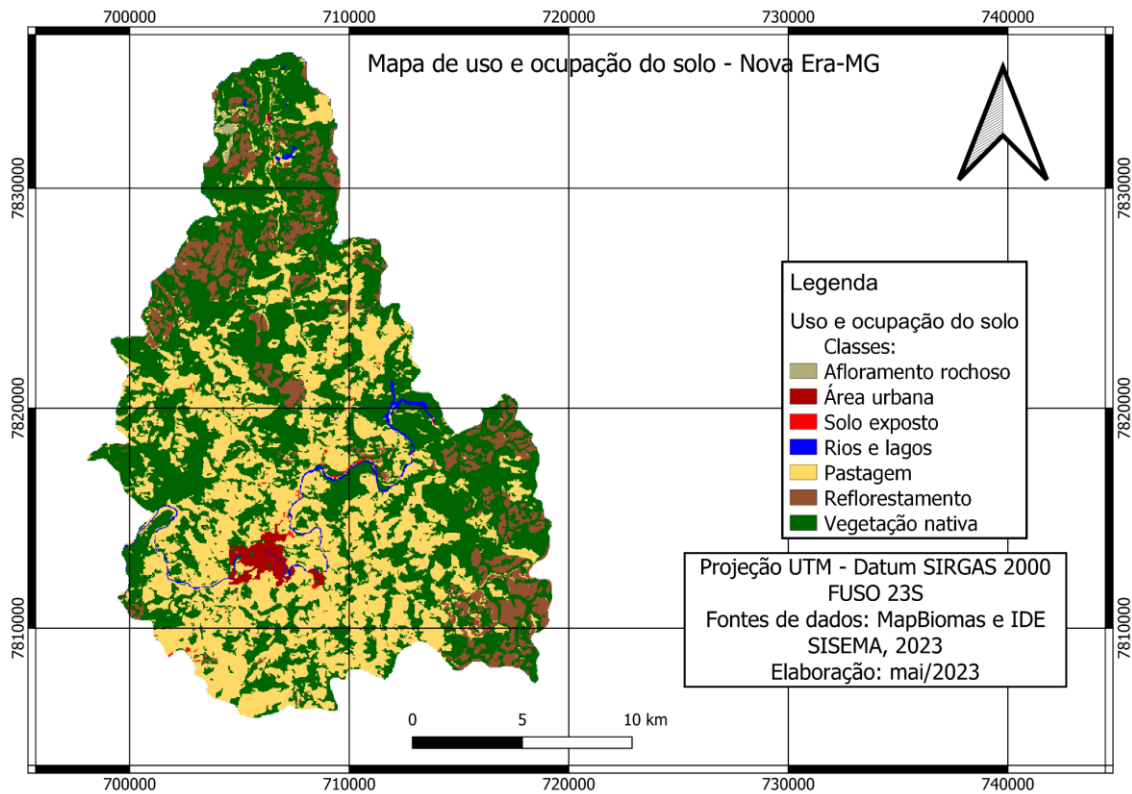
Fonte: Autor, 2023.

Percebe-se pela Figura 22, que considerando-se apenas o fator declividade o município não tem boa favorabilidade para abastecimento dos aquíferos.

5.1.7 Mapa de uso e ocupação do solo

Para o fator Uso e Ocupação do Solo, foi empregado o mapa de uso e ocupação do solo do ano de 2020, elaborado pelo MapBiomias (2022), recortado para o limite da bacia (Figura 23).

Figura 23: Mapa de uso e ocupação do solo.



Fonte: Autor, 2023.

Na área de estudo estão presentes 7 classes: vegetação nativa, reflorestamento, pastagem, área urbana, solo exposto, afloramento rochoso, rios e lagos. A Tabela 12 traz a quantificação de cada classe no território.

Tabela 12: Quantificação das classes de uso e ocupação do solo.

| Classe de uso e ocupação | Km² | % |
|---------------------------------|-----------------------|----------|
| Afloramento rochoso | 0,67 | 0,18 |
| Área urbana | 4,25 | 1,17 |
| Solo exposto | 0,72 | 0,20 |
| Rios e lagos | 2,83 | 0,78 |
| Pastagem | 130,63 | 36,10 |
| Reflorestamento | 34,92 | 9,65 |
| Vegetação nativa | 187,80 | 51,91 |
| Total | 361,81 | 100 |

De forma geral, o município possui sua porção central e sul com maior evidência de pastagens. A porção norte, oeste e sudeste evidencia maior concentração de cobertura vegetal arbórea principalmente nas porções limítrofes do território representadas no relevo pelos topos de morro.

A vegetação nativa representa 51,91 % do território e 9,65% está ocupado com reflorestamento, que neste caso o eucalipto é a cultura predominante, principalmente em locais onde se situam as maiores altitudes. O que representa, do ponto de vista da capacidade de absorção de água, um ponto favorável considerando a importância dos topos de morro e da vegetação no abastecimento dos aquíferos.

Segundo Azevedo *et al.*, (2022) a cobertura vegetal tende a aumentar a infiltração e diminuir o escoamento superficial, diminuindo a vazão de pico das bacias hidrográficas.

Contudo, as estradas que formam os carregadores nos talhões de plantio de eucalipto podem contribuir para a formação de erosão, degradação do solo e alteração na dinâmica hidrológica da bacia hidrográfica. As estradas interceptam o fluxo subsuperficial promovendo um menor tempo de resposta hidrológica na bacia hidrográfica (CUNHA; THOMAZ, 2017).

Avaliando a qualidade dos solos em áreas sob diferentes coberturas florestais e pastagens (CUNHA NETO *et al.*, 2018) constatou que o solo sob eucalipto foi o mais suscetível a escoamento superficial podendo provocar processos erosivos mais intensos. Neste ponto há algumas controvérsias na literatura, visto que segundo, Baumhardt *et al.*, (2022) o eucalipto contribui para aumento da capacidade de infiltração devido à sua massa e profundidade de raízes. Assim, considera-se neste trabalho que as áreas cobertas por eucalipto contribuem para a recarga dos aquíferos, seguindo-se o argumentado por Baumhardt *et al.*, (2022).

Em áreas de topo de morro cobertas com vegetação nativa o adensamento da concentração de raízes das árvores juntamente com a matéria orgânica dos restos vegetais favorecem a infiltração de água no solo (ALMEIDA JÚNIOR; CASTRO; SANTOS, 2020).

Geograficamente o município tem seus limites estabelecidos nos “divisores de água” o que faz com que toda sua extensão territorial seja praticamente uma bacia de captação pluvial. A condição dada pela capacidade de uso limitada pelo relevo acentuado, pode ser a causa da boa representatividade da classe vegetação nativa.

Assim, praticamente 62% do município está coberto por algum tipo de vegetação arbórea, quer seja nativa ou plantada. A mata nativa exerce maior influência no abastecimento dos aquíferos do que o cultivo do eucalipto, recebendo, portanto, melhor classificação quanto à capacidade de promover a infiltração de água.

Representando 36,1% do território, as pastagens contribuem para estabilização dos agregados do solo e melhoram o teor de carbono orgânico (CUNHA NETO *et al.*, 2018). A melhoria da qualidade física do solo está associada à melhoria da infiltração da água. Contudo, segundo Ferreira, Tavares

Filho e Ferreira (2010), é necessário conhecer o estado de conservação das pastagens analisando os diferentes sistemas de manejo e considerando os parâmetros de cobertura vegetal, erosão hídrica, matéria orgânica, estabilidade dos agregados, macrofauna do solo, a densidade, a porosidade e a retenção de água pelo solo.

A área urbana afeta o regime hidrológico, visto que a impermeabilização do solo contribui para o escoamento superficial e diminuição da infiltração da água de chuva.

Muitas vezes as áreas urbanizadas estão sobrepostas às áreas de recarga. Para Seraphim (2019) o planejamento urbano deve considerar os padrões de ocupação do solo associado ao regime hidrológico do local. Representando 1,17% da área municipal, sua parcela mais considerável está situada às margens do rio Piracicaba na porção central do município e sobre embasamento Cristalino.

Com topografia acentuada e áreas impermeáveis, a área urbana, juntamente com a classe de solos expostos (0,2% da área total) e afloramento rochoso (0,18%) pouco devem colaborar para o abastecimento dos aquíferos.

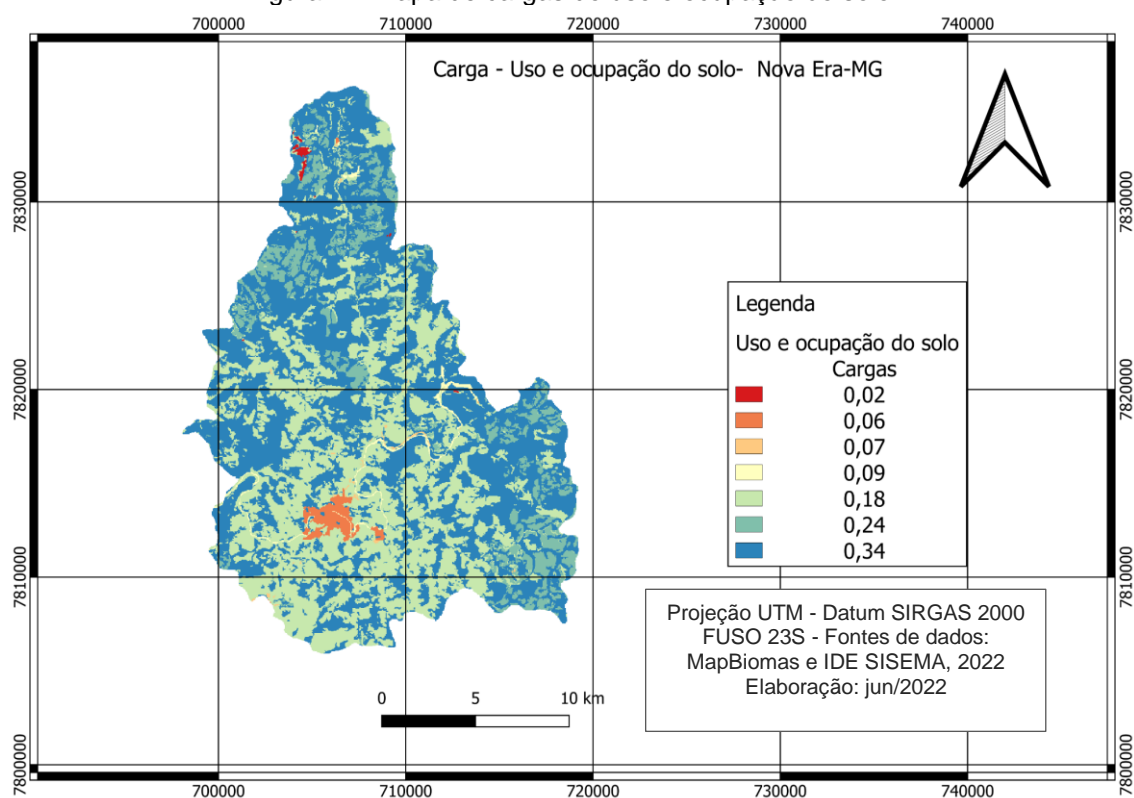
As parcelas representativas da classe rios e lagos (0,78%) representam pouco como contribuintes da recarga dos aquíferos. Mesmo que exista infiltração local devido à carga hidráulica, sua representatividade na área total é pequena.

Assim, considerando-se o exposto e baseado na revisão bibliográfica considerando como referência Pereira (2016). foram definidas as cargas para cada uso e ocupação do solo, conforme Tabela 13, e realizada a reclassificação do mapa de uso e ocupação do solo (Figura 24).

Tabela 13: Cargas para uso e ocupação do solo.

| Uso e ocupação do solo | Cargas |
|------------------------|--------|
| Vegetação nativa | 0.34 |
| Reflorestamento | 0,24 |
| Pastagem | 0,18 |
| Área urbana | 0,06 |
| Solo exposto | 0,07 |
| Afloramento de rocha | 0,02 |
| Rios e lagos | 0,09 |

Figura 24: Mapa de cargas do uso e ocupação do solo.



Fonte: Autor, 2023.

5.2 AHP

Para a geração do mapa de potencial de recarga, utilizou-se o método Analítico Hierárquico (AHP). Foram pareados cada critério, tendo como referência o trabalho desenvolvido por Goepel (2018) e Pereira (2016). Na determinação das cargas para as subclasses dos mapas temáticos utilizou-se como referência os trabalhos de Jacó (2019), Ribeiro (2011) e Reis (2018).

O Quadro 5 apresenta o resultado do julgamento segundo a análise hierárquica dos temas com a comparação pareada.

Quadro 5: Resultado do julgamento pela análise hierárquica dos temas.

| Critério | | mais importante (A ou B) | Escala (1-9) |
|-------------------|-------------------|--------------------------|--------------|
| A | B | | |
| Solos | Geologia | A | 2 |
| | Uso do solo | A | 3 |
| | Declividade | A | 4 |
| | Dens. Lineamentos | A | 6 |
| | Dens. Drenagem | A | 7 |
| | Pluviosidade | A | 9 |
| Geologia | Uso do solo | A | 2 |
| | Declividade | A | 3 |
| | Dens. Lineamentos | A | 5 |
| | Dens. Drenagem | A | 6 |
| | Pluviosidade | A | 7 |
| Uso do solo | Declividade | A | 2 |
| | Dens. Lineamentos | A | 4 |
| | Dens. Drenagem | A | 6 |
| | Pluviosidade | A | 3 |
| Declividade | Dens. Lineamentos | A | 3 |
| | Dens. Drenagem | A | 6 |
| | Pluviosidade | A | 5 |
| Dens. Lineamentos | Dens. Drenagem | A | 5 |
| | Pluviosidade | A | 3 |
| Dens. Drenag. | Pluviosidade | A | 4 |

Fonte: Adaptada de Goepel (2018)

Após a comparação foi calculado o vetor de pesos, conforme demonstrado na Tabela 14, onde cada critério (ou mapa temático) recebeu cargas em função do grau de importância e contribuição de suas classes para a recarga.

Foi obtida uma Razão de Consistência (RC) de 9,2%. Segundo Saaty (2000) a condição de consistência dos julgamentos dos critérios é atendida quando o $RC \leq 0,10$, portanto este trabalho atendeu.

Tabela 14: Pesos para os critérios-resultado do método AHP.

| Critérios | Pesos (%) |
|--------------------------|-----------|
| Solos | 34,9 |
| Geologia | 23,9 |
| Uso e ocupação do solo | 15,7 |
| Declividade | 12,1 |
| Densidade de lineamentos | 6,8 |
| Densidade de drenagem | 3,8 |
| Pluviosidade | 2,7 |

Fonte: Adaptada de Goepel (2018).

No processo de hierarquização o critério solo foi considerado como prioritário. Os Latossolos no geral apresentam boa estrutura que lhes confere uma boa porosidade, além de ser o local por onde se inicia o processo de recarga.

A Geologia ficou em segundo lugar em grau de sua importância, derivada das fraturas e capacidade de armazenamento das rochas de origem.

Como terceiro critério em importância ficou o uso e ocupação do solo reforçando, assim, o caráter de conservação da água no solo dada pela cobertura vegetal.

A declividade ficou em quarto lugar refletindo sua condição predominante de relevo forte ondulado.

A classificação da área de estudo como de moderada a alta densidade de lineamentos leva este critério ao quinto lugar na hierarquia representando a influência das interseções dos lineamentos na recarga.

A alta a moderada densidade de drenagem condiciona este critério ao sexto lugar já que quanto maior a densidade de drenagem, menor tempo para a água infiltrar no solo.

No último grau de importância ficou a pluviosidade devido à sua interface com os demais fatores.

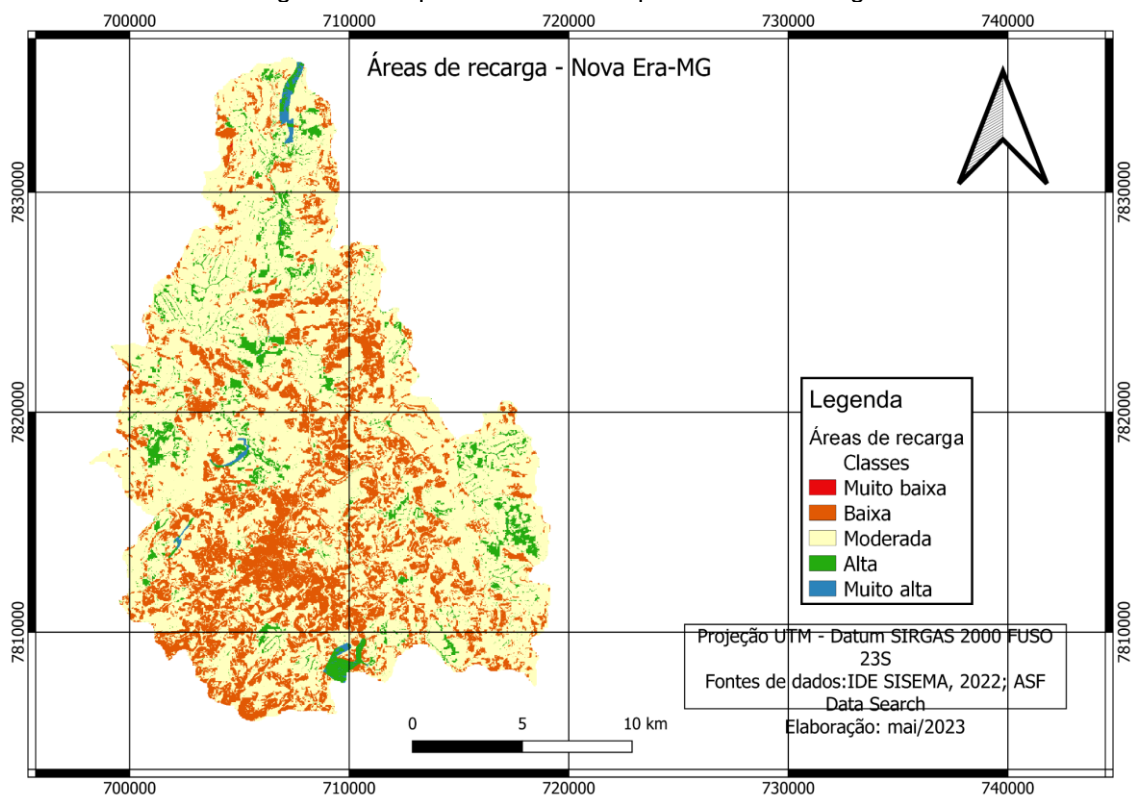
5.3 Mapa da potencialidade de recarga

Estabelecidas as cargas e definidos os pesos, por meio da ferramenta “Calculadora de Raster” do QGis 3.24, foi realizada a integração dos critérios empregando-se a equação abaixo, necessária à álgebra de mapas:

$$PR_{\text{ (Potencial de Recarga)}} = (34,9 * \text{solos}) + (23,9 * \text{geologia}) + (15,7 * \text{uso e ocup. do solo}) + (12,1 * \text{declividade}) + (6,8 * \text{densidade de lineamentos}) + (3,8 * \text{densidade de drenagem}) + (2,7 * \text{pluviometria})$$

Após a integração foi gerado como resultado o mapa de Potencial de Recarga, reclassificado para as classes Muito baixa, Baixa, Moderada, Alta e Muito Alta, apresentado na Figura 25.

Figura 25: Mapa das áreas com potencial de recarga.



Fonte: Autor, 2023.

Conforme pode ser observado na Tabela 15, a área de estudo apresenta uma predominância da classe Moderada, mais concentrada na região Norte onde também estão presentes as classes Alta e Muito alta fazendo desta região preferencial para a recarga dos aquíferos. A porção leste também se manifesta como promissora contendo boa parcela da classe Moderada e Alta.

Tabela 15: Quantificação das classes de recarga-Nova Era-MG.

| Área de recarga-Classes | Área -km² | % |
|--------------------------------|-----------------------------|----------|
| Muito baixa | 0,02 | 0,01% |
| Baixa | 89,28 | 25% |
| Moderada | 244,74 | 69% |
| Alta | 20,71 | 6% |
| Muito alta | 1,71 | 0,48% |
| Total | 356,46 | 100% |

De forma geral, há muita semelhança do mapa de áreas de recarga com o mapa de uso e ocupação do solo. Há coincidência das áreas vegetadas com espécies arbóreas e gramíneas das pastagens com as áreas mais propícias à recarga.

Coincide também os locais de maior interferência antrópica com aquelas áreas menos favoráveis à recarga.

Apesar de estar situado sobre arcabouço geológico não muito propício ao armazenamento de água subterrânea e uma declividade não muito favorável, o município possui solos bem estruturados, boa pluviosidade anual, uma moderada densidade de drenagem e uma boa densidade de lineamentos associados à um bom uso e ocupação dos solos dando, portanto, um caráter de bom produtor de água.

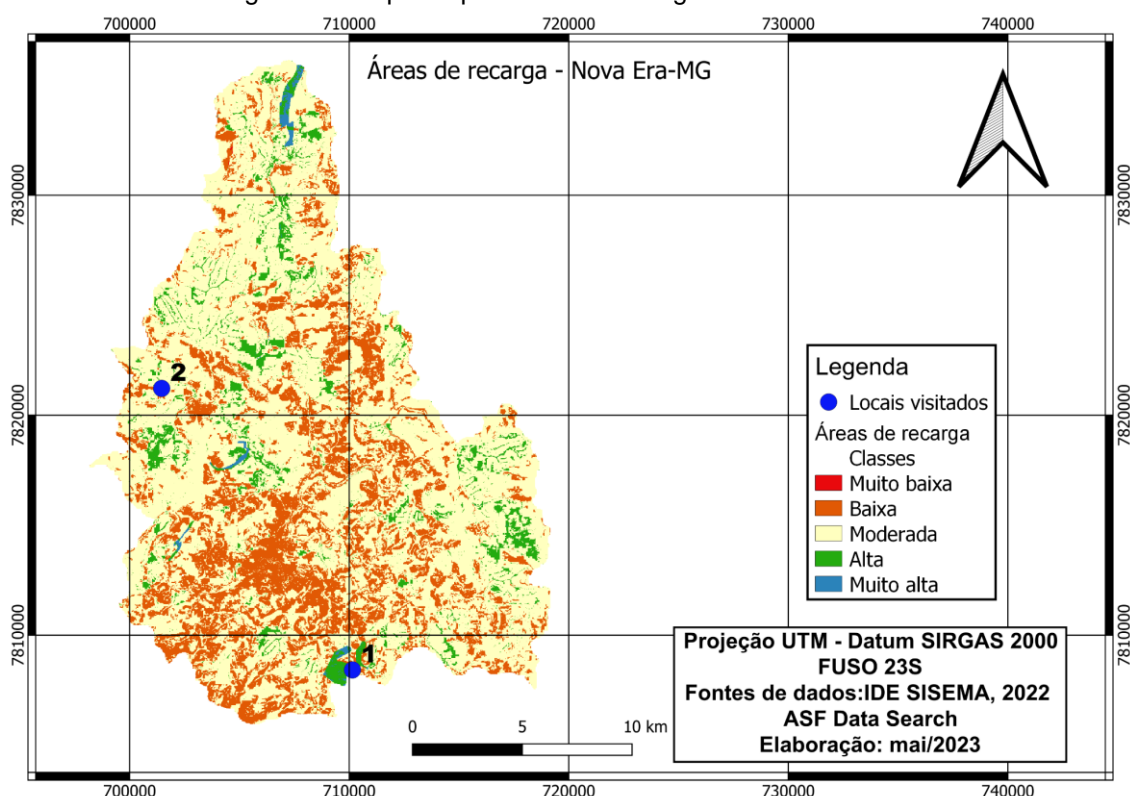
Além disso, existem pequenas porções classificadas como Muito Alta que se resumem a uma região no extremo sul, no centro oeste e outra no extremo norte.

Grande parte do município (52%) é de mata nativa e outros 9,7% são reflorestamento, ambos localizados predominantemente nos topos de morro. Isto

provavelmente colaborou muito para o predomínio da classificação Moderada para a recarga. Por outro lado, 25% do território foi classificado como baixo potencial. Mesmo possuindo 36,1% de área de pastagem, grande parte desta classe, provavelmente por estar localizada em áreas declivosas, não foi associada às boas condições de favorecimento da recarga.

Para o relacionamento do resultado final com a paisagem natural foram coletadas algumas fotografias nos locais visitados de números 1 e 2, conforme demonstrado na Figura 26.

Figura 26: Mapa do potencial de recarga e locais visitados.



Fonte: Autor, 2023.

A Figura 27, Figura 28 e Figura 29 a seguir são representativas do ponto 1 da Figura 26 e estão localizadas às margens da rodovia MG120 e próximas à divisa com o município de São Domingos do Prata, todas em área classificada como Alta a Muito Alta capacidade de recarga. Ao fundo da Figura 29, a área de pastagem em morro foi classificada como Baixa capacidade de recarga.

Figura 27: Visão parcial do ponto 1, às margens da MG120.



Figura 28: Visão parcial do ponto 1, em planície aluvial.



Figura 29: Ponto 1. Ao fundo pastagens com baixa capacidade de recarga.



A Figura 30 e Figura 31 a seguir, representativas do ponto 2 da Figura 26, são também exemplares típicos do domínio morfoclimático da região. Ilustram um tipo peculiar e comum da paisagem onde o relevo acidentado limita o uso agropecuário ou silvicultura favorecendo o uso paisagístico natural. Esta área foi classificada como Moderada.

Figura 30: Representação do domínio morfoclimático - ponto 2.



Figura 31: Semelhante representação do domínio morfoclimático - ponto 2.



Estes resultados, além de estarem colimados com os objetivos propostos, corroboram para a efetiva necessidade da adoção das boas práticas para o uso e conservação dos solos, uma vez que neste trabalho ficou evidenciado a importância do bom uso e conservação dos solos como fator preponderante para a produção de água.

Esta constatação também foi observada por Braun, Vibrans e Pinheiro (2008), que utilizando-se de metodologia semelhante, buscou avaliar a capacidade de armazenamento de água subterrânea. Em seu trabalho o autor constatou aumento da classe “Muito baixo” em consequência da dinâmica da modificação dos usos da terra em função da diminuição da proteção do solo e consequente alteração na dinâmica hidrológica.

A cobertura vegetal florestal exerce grande influência no favorecimento dos processos de infiltração e recarga dos aquíferos, principalmente em áreas de topo de morros (TEIXEIRA, 2015).

5.3.1 Captação de água subterrânea no município

A fim de se analisar o resultado encontrado frente à captação de água no município, também foram adquiridas as informações de captação disponíveis no banco de dados do IDE-SISEMA-MG.

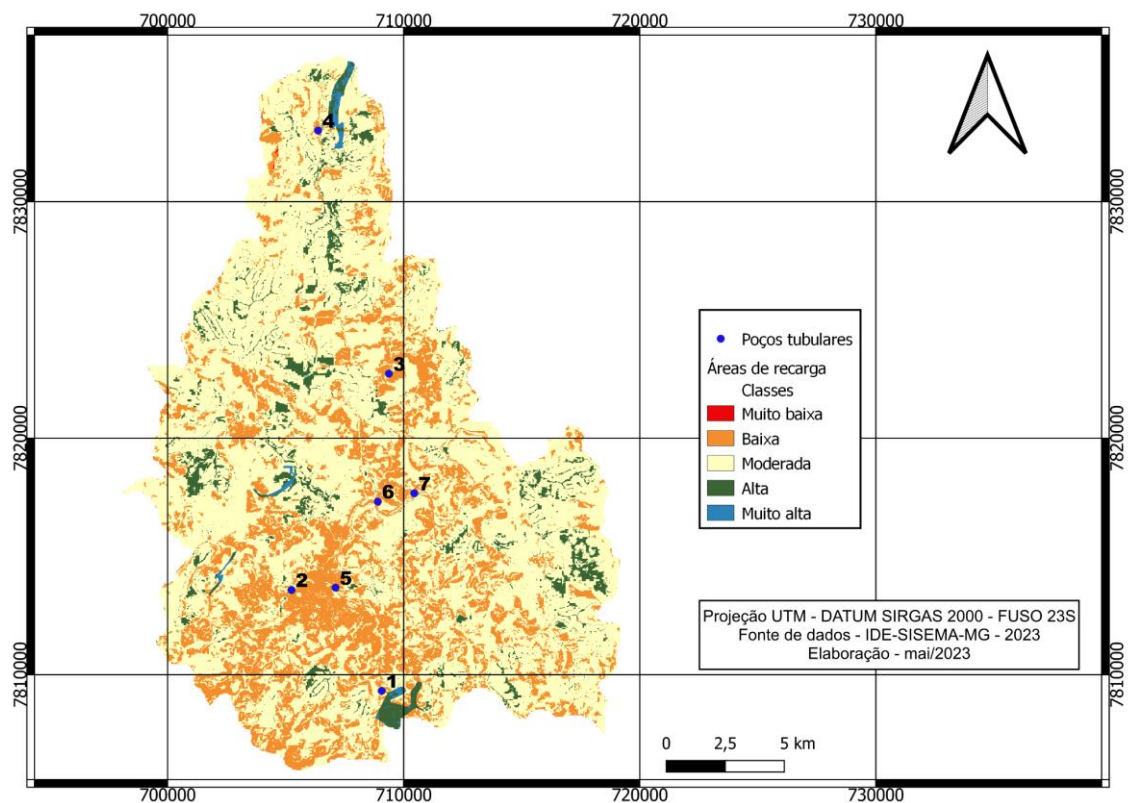
Existem 7 poços de captação subterrânea e de uso particular na área de estudo, conforme demonstrado na Figura 32 e Quadro 6 onde se verifica que os poços cadastrados fornecem pequena vazão, conforme já havia sido previsto pela análise hidrogeológica anteriormente realizada.

Contudo, somente o poço 2 apresentou alta vazão, mesmo estando localizado em área de transição entre baixa a moderada capacidade de recarga. Isto pode ser explicado pela alta complexidade e variabilidade das condições de circulação e armazenamento: característica hidrogeológica do aquífero fissural

de domínio Cristalino, da formação granito Bicas e litologia de gnaisses, granitóides, migmatitos e granulitos (CASTRO, 2021).

Os demais poços estão em locais classificados como de baixa a moderada recarga o que pode ser evidenciado pela caracterização hidrogeológica do Quadro 6

Figura 32: Mapa das áreas de recarga e dos poços de captação subterrânea com cadastro no IGAM.



Fonte: Autor, 2023.

Quadro 6: Caracterização hidrogeológica dos poços tubulares, na área de estudo.

| Identificação do poço | Vazão (m ³ /h) | Classe de recarga | Parâmetro hidrodinâmico * Q = vazão em m ³ /h |
|-----------------------|---------------------------|-------------------|--|
| 1 | 2 | Baixa | $1 \leq Q < 10$: Geralmente muito baixa, porém local mente baixa: Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos. |
| 2 | 162 | Baixa | $Q \geq 100$: Muito Alta: Fornecimentos de água de importância regional (abastecimento de cidades e grandes irrigações). Aquíferos que se destacam em âmbito nacional |
| 3 | 1,1 | Moderada | $1 \leq Q < 10$: Geralmente muito baixa, porém localmente baixa: Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos. |
| 4 | 10 | Baixa | $10 \leq Q < 25$: Geralmente baixa, porém localmente moderada: Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado |
| 5 | 0,6 | Baixa | $Q < 1,0$: Pouco Produtiva ou Não Aquífera: Fornecimentos insignificantes de água. Abastecimentos restritos ao uso de bombas manuais |
| 6 | 40,79 | Moderada | $25 \leq Q < 50$: Moderada: Fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades, irrigação em áreas restrita |
| 7 | 4,4 | Moderada | $1 \leq Q < 10$: Geralmente muito baixa, porém localmente baixa: Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos. |

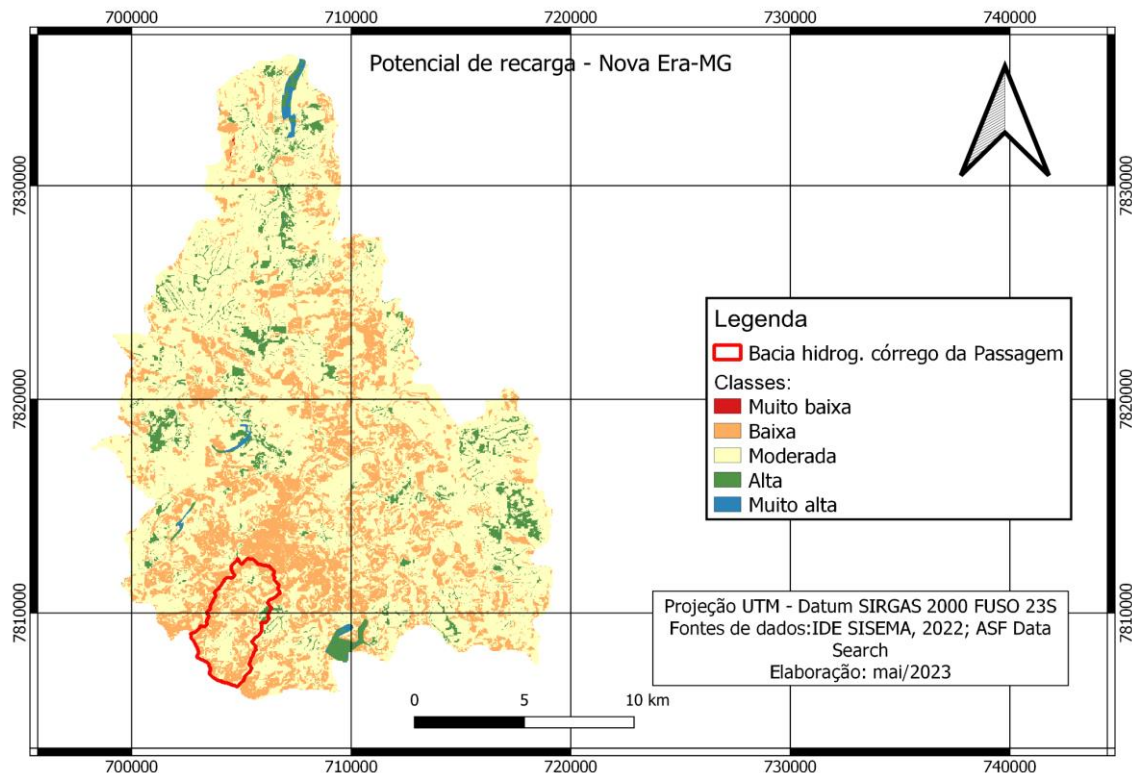
* Conforme Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo (DINIZ *et al.*, 2014).

Fontes: IDE-SISEMA, adaptado.

5.3.2 Bacia do córrego da Passagem

Como a bacia do córrego da Passagem é atualmente a principal fonte de água potável para o município, cabe aqui destacá-la em função de sua particularidade conforme descrito no início deste trabalho (Figura 33).

Figura 33: Mapa do potencial de recarga - com destaque para a bacia hidrog. do córrego da Passagem.



Fonte: Autor, 2023.

Com uma área de 13,49 Km², a bacia do córrego da Passagem possui quatro classes com potencial de recarga, porém, a classe que mais se destaca é a moderada (Tabela 16) seguida da classe Baixa, totalizando 97,6% da área total dentro da classificação de Moderada a Baixa, o que não se traduz em boas perspectivas quanto ao seu potencial de recarga.

Tabela 16: Classificação do potencial de recarga da bacia do córrego da Passagem.

| Potencial de recarga | Área(Ha) | % |
|----------------------|----------|-------|
| Baixa | 605,5 | 44,9 |
| Moderada | 710,8 | 52,7 |
| Alta | 32,3 | 2,4 |
| Muito alta | 0,1 | 0,01 |
| Total | 1349 | 100,0 |

A segunda classe de potencial de recarga muito expressiva nesta bacia é a Baixa, ocupando quase a metade de seu território. A presença desta classe está relacionada à declividade local e à formação hidrogeológica.

Esta bacia está situada em uma região do grupo geológico Mantiqueira (embasamento Cristalino), que segundo Fernandes *et al.* (1994) e Mourão (2007) *apud* Pereira (2016), apresenta rochas de granulometria média a predominantemente grossa, pouco eficientes em termos de recarga, comportando-se como aquífero fissural, sem porosidade primária em suas rochas.

Nesta região a ocorrência de água subterrânea está condicionada à presença de fraturas e fendas que lhe confere uma porosidade secundária. Os reservatórios são aleatórios, descontínuos e de pequena extensão (BOMFIM, 2010).

Essas características aliadas à declividade local, que varia de Forte Ondulado a Escarpado, denota a esta bacia o baixo potencial de recarga. Assim, nesta bacia medidas que possam contribuir com a retenção da água são as mais apropriadas para contribuir com o incremento da recarga dos aquíferos locais, bem como na manutenção do fluxo de base.

Dentre as medidas que poderiam ser adotadas nesta região cita-se a manutenção dos remanescentes florestais, a adoção de práticas conservacionistas nos locais de agricultura, a preservação das áreas de Preservação Permanente e a implantação do Pagamento por Serviços Ambientais (PSA).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo dos fenômenos naturais geralmente compreende vários fatores que interferem no processo e muitas vezes são difíceis de serem mensurados dada a alta complexidade. No âmbito dos estudos ambientais, os sistemas de informações geográficas permitem integrar os diversos fatores que interferem no processo estudado para obtenção de um modelo que procura se aproximar ao máximo da descrição do comportamento e integração dos diversos componentes de um sistema ambiental.

A utilização das técnicas de sistemas de informações geográficas neste trabalho, associadas ao Processo Analítico Hierárquico (AHP), além de permitir a geração de mapas temáticos que forneceram informações importantes sobre os diferentes aspectos da área de estudo, permitiram também a integração dos fatores que favorecem a recarga dos aquíferos. Tudo isto foi fator importante para a geração de um mapa único que se traduziu nas potencialidades de recarga da área de estudo.

Assim e de acordo com os objetivos propostos, conclui-se que em termos de recarga dos aquíferos e após a integração dos sete fatores que a influenciam, a área de estudo possui 69% de seu território classificado como moderado potencial de recarga.

Portanto, os resultados indicam e reforçam a necessidade e importância da cobertura do solo com espécies arbóreas nativas, principalmente em locais classificados como de relevo forte ondulado, principalmente, a conservação da mata nativa e plantio de novos exemplares.

Considerando a boa classificação da bacia do córrego da Passagem em termos do seu potencial de recarga, existe grande possibilidade de melhoria da sua função de fornecimento de água potável por meio de programas e projetos de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) ou outras ações que visem a melhoria da quantidade e qualidade da água.

Sendo assim, as políticas públicas locais de incentivo à produção de água poderão utilizar-se deste estudo para orientar as ações de preservação dos locais considerados prioritários para a recarga ou com potencial de melhoria.

As áreas classificadas como favoráveis responderão de forma mais eficaz às ações que objetivem melhorias mais imediatas na disponibilidade de água potável para abastecimento público. Destaca-se também a importância deste trabalho no âmbito da bacia hidrográfica do rio Piracicaba bem como no balizamento das ações promovidas pelo Comitê de Bacia Hidrográfica visando a garantia da quantidade e qualidade de água, da manutenção do fluxo de base dos afluentes e consequentemente na melhoria da vazão do rio Piracicaba. Estudos semelhantes poderão ser realizados em outros territórios da bacia.

Bibliografia

ALMEIDA JÚNIOR, M. C. D. de A.; CASTRO, P. A. L. de; SANTOS, G. O. Taxa de infiltração de água no solo em diferentes usos do solo. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 8, n. 2, p. 115–121, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v8n2.almeida%0A115>>. Acesso em: 20 nov. 2022.

ALVES SOUZA, C.; DUARTE SILVA, Q. Médio curso da bacia hidrográfica do rio Itapecuru, Maranhão: Características geológicas, geomorfológicas, pedológicas e densidade de drenagem. **Revista Ciência Geográfica**, v. 26, n. 01, p. 51–71, 2022. Disponível em: <<https://www.ppg.revistas.uema.br/index.php/cienciageografica/article/view/2873/1976>>. Acesso em: 20 mai. 2022.

ARAGÃO, A. K. O.; ALOUFA, M. A. I.; CAVALCANTE, J. DA S. I.; COSTA, D. F. DA S. Zoneamento ambiental como instrumento estratégico para a gestão municipal na microrregião do Vale do Açu (RN). **Contentus**, v. 23, n. 2, p. 95–112, 2014. Disponível em: <<https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia/article/view/19572>>. Acesso em: 23 fev. 2023.

ARCGIS. Função do Relevo Sombreado. **ArcGIS On line**. Disponível em: <<https://doc.arcgis.com/pt-br/arcgis-online/analyze/hillshade-function.htm#:~:text=O%20Relevo%20Sombreado%20%C3%A9%20uma,fornece%20valores%20de%20eleva%C3%A7%C3%A3o%20absolutos>>. Acesso em 18 jul. 2023.

ASF, **Alaska Satellite Facility**. Disponível em: <<https://asf.alaska.edu/datasets/sar-data-sets/alos-palsar/>> Acesso em: 30 maio 2022.

AZEVEDO, B. C. de; LUGON JUNIOR J.; SILVA, L. B. C. da; OLIVEIRA, V. de P. S. de. Avaliação dos impactos da alteração do uso da terra, com ênfase na cobertura florestal, sobre a disponibilidade hídrica: uma revisão sistemática. 2022, Salvador: In.: 6º Congresso Brasileiro de Reflorestamento Ambiental, 2022. p. 6. Disponível em: <<http://reflorestamentoambiental.com.br/trabalhos/azevedobruno111.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2023.

BANDEIRA, Íris C. N.; ABREU, F. de A. M. de. Principais áreas de recarga do sistema hidrogeológico livre. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], v. 1, 2009. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/21952>>. Acesso em: 24 jun. 2023.

BARROS, M. DA S.; MARINS, C. S.; SOUZA, D. de O. O uso do método de Análise Hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais - Um estudo de caso. 2009, Salvador: [s.n.], 2009. p. 11. Disponível em: <[http://www.ic.uff.br/~emitacc/AMD/Artigo 13.pdf](http://www.ic.uff.br/~emitacc/AMD/Artigo%2013.pdf)>. Acesso em: 21 jun. 2022.

BAUMHARDT, E.; CANTARELLI, E. B.; HORN, J. F. C; NORONHA, K. C. P. Eucalipto X campo nativo: O fluxo de “Água Azul” em meses secos e chuvosos no pampa gaúcho. 2022, Brasília: **Sbef**, 2022. p. 626–629.

BOMFIM, L. F. C. Mapa de domínios/subdomínios hidrogeológicos do Brasil em ambiente SIG: Concepção e metodologia. **Águas Subterrâneas**. [S. l.], 2010. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22886>>. Acesso em: 22 mar. 2023.

BRASIL. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sre/alocacao-de-agua/oficina-escassez-hidrica/legislacao-sobre-escassez-hidrica/uniao/lei-no-9433-1997-pnrh/view>>. Acesso em: 9 maio 2021.

BRASIL. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: informe anual**. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília. ANA. 2020.

BRAUN, P. D. K.; VIBRANS, A. C.; PINHEIRO, A. Desenvolvimento de um modelo de avaliação da capacidade de armazenamento de água na bacia do rio Itajaí – Sc. **Revista de estudos ambientais**, v. 10, n. 2, p. 32–44, 2008. Disponível em: <<https://monografias.ufop.br/handle/35400000/1059>>. Acesso em: 20 fev. 2023.

BRITO, A. P. de; TOMASELLA, J.; WAHNFRIED, I. D.; CANDIDO, L. A.; MONTEIRO, M.T.; FILGUEIRAS, S. J. F. Relação entre precipitação e recarga de águas subterrâneas na Amazônia Central. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 1, p. 39–49, 2020.

CALDERANO FILHO, B.; POLIVANO, H.; CARVALHO JUNIOR, W. de, CHAGAS, C. da S.; CALDERANO, S. B. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de regiões tropicais montanhosas com suporte de SIG. **Revista Geografia**, v. 35, n. 3, p. 269–288, 2018.

CAMPOS, D. O.. **Zoneamento Geohidroecológico: uma proposta de análise integrada da paisagem em bacias hidrográficas**. 2014. 181f. Tese Doutorado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente. Universidade Estadual de Santa Cruz. Disponível em: <<http://www.biblioteca.uesc.br/pergamum/biblioteca/index.php>>. Acesso em: 23 out. 2021.

CARVALHO, T. M. de; & Latrubesse, E. M. Aplicação de modelos digitais do terreno (MDT) em análises macrogeomorfológicas: o caso da bacia hidrográfica do Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 5(1), 85–93. 2004.

CASTRO, K. Q. **Caracterização e quantificação do Potencial Hídrico subterrâneo do baixo curso do rio Piracicaba (MG)**. Dissertação de Mestrado—Itabira: Universidade Federal de Itajubá, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/3180>>. Acesso em: 13 mai. 2023.

CLIMATE-DATA.ORG. **Dados climáticos para cidades mundiais**. Disponível em: <http://www.dei.isep.ipp.pt/~emt/infind/ii_1b.pdf>. Acesso em: 13 maio 2022

COELHO, G. . PONTES, L. M.; BATISTA, M. L.; MELLO C. R. de; SILVA, A. M. da. Relação entre o escoamento de base e os diferentes sistemas hidrogeológicos do Estado de Minas Gerais. **ABAS-Associação brasileira de águas subterrâneas**, v. 29, n. 3, p. 257–267, 2015.

COOPER, Miguel; SILVA, Á. P. da. Arquitetura e propriedades físicas do solo. **USP-Disciplinas**. São Paulo, 2015. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2749790/mod_resource/content/1/Apostila_LSN_310_%20F%C3%ADsica%20do%20Solo.pdf>. Acesso em: 02 maio 2023.

CORDEIRO, J.; ARANHA, P. R. A.; COSTA, R. D. da; MOURA, P. M.; BAPTISTA, M. B. Padrões de lineamentos e sua relação com a morfologia fluvial do Rio Doce (MG) e seus afluentes. **Geociências**, 40(1), 71–82. 2021. Disponível em: <<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/15340>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

COSTA, H. G. **Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão**. Niterói: H.G. Costa, 2002. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2004/pdf/arq0279.pdf>>. Acesso em: 16 mai. 2023.

COUTINHO, V. dos S.; BRICALLI, L. L., & LOPES, G. P. A. Aplicação da técnica de extração de lineamentos para identificação de locais favoráveis a prospecção e capturas de água subterrânea no norte do Espírito Santo (sudeste do Brasil). In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOGRAFIA FÍSICA. 1., 2017. Campinas. **Artigo**. Campinas: UNICAMP, 2017. p. 5655-5660. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2252>. Acesso em: 4 fev. 2023.

CPRM. **Sistema de Geociências do Serviço Geológico do Brasil**. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/nova_url/geosgb.htm. Acesso em 22 jun. 2022.

CUNHA, M. C. DA; THOMAZ, E. L. Fluxo subsuperficial interceptado por estrada rural: características e distribuição na paisagem. **Geografia - on line**, v. 37, n. 3,

p. 429–446, 2017. Disponível em: <https://web-b-ebshost-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/ehost/detail/detail?vid=13&sid=e9ffc2f6-498a-4337995e13335b7b1b1f%40sessionmgr120&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1l aG9zdC1saXZl#AN=127094425&db=a9h>. Acesso em: 3 mar. 2023.

CUNHA NETO; F. V. da.; PEREIRA, M. G.; LELES, P. S. dos S.; ABEL E. L. da S. Atributos químicos e físicos do solo em áreas sob diferentes coberturas florestais e pastagem em Além Paraíba-MG. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 13–24, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/dkdXvL6KgSdXxfBXQpR8FCx/?format=html>.

DAE. Departamento de Água e Esgoto. Menu meio ambiente. **Os aquíferos e os poços**. Disponível em: <https://www.daebauru.sp.gov.br/ambiente.php?item=RH4>. Acesso em: 18 jul. 2023.

DINIZ, J. A. O.; MONTEIRO, A. B.; SILVA, R. de C. da; PAULA, T. L. F. de. Manual de Cartografia hidrogeológica. Recife: Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 2014. Disponível em: <file:///O:/PhD/3. Second Paper/Papers/Manual de Cartografia Censal.pdf>. Acesso em 22 abr. 2023.

BRASIL. Sistema isolado Nova Era. [mapa]. Sem escala. In Atlas do abastecimento de água. ENGEORPS. 2018.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2022). **Satélites de monitoramento**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/alos>. Acesso em: 20 abr. 2022.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/busca-de-publicacoes/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acesso em: 2 abr. 2023.

EVANS, J.M. Wikimedia Commons. **Ciclo da água**. 2006. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ciclo_da_%C3%A1gua.jpg?uselang=pt. Acesso em: 17 jul. 2023.

FAVERSANI, G. **Geometria da falha de água quente e seu papel na zona externa da faixa Araçuaí ao longo do paralelo de Abre Campo, Minas Gerais**. 2019. 130 f. Monografia – Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

FÉRES, W. M. L.; FORTES, P. de T. F. de O. Lineamentos estruturais da porção sul da Serra do Caparaó, ES/MG. **XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento**

Remoto -SBSR. 2017. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr/trabalhos/lineamentos-estruturais-da-porcaosul-da-serra-do-caparao-esmg?lang=pt-br>. Acesso em: 12 jan. 2022.

FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.31, n. 4. p. 913–932. 2010.

FLORENZANO, Tereza G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. Oficina de Textos, São Paulo. 2002.

FRANCISCO, R. F.; BRAGA, A. C. DE O.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Sdr: Um novo método para avaliar a vulnerabilidade natural à contaminação de aquíferos livres granulares. **Revista Geociências**, v. 38, n. 1, p. 207–219, 2019.

FREITAS, M. A. de S. **A regulação dos recursos hídricos: Estado e Esfera Pública na Gestão de Recursos Hídricos: Análise do Modelo Atual Brasileiro, Críticas e Proposições**. Rio de Janeiro. 2009.

FROTA, V. de V. M. **Análise de lineamentos de de geoprocessamento como indicativo de fluxo de águas subterrâneas: região da rodovia Tamoios – litoral norte do estado de São Paulo**. 2019. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina. 2019.

FURTADO, R. S.; FERNANDES, A. J.; NEGRÃO A. P.; OSÓRIO, D. B.; HIRATA, R.; TEIXEIRA Z. A.; BRAGA L. R. C.; FILGUEIRA, J. G. Sensoriamento remoto, aerogeofísica, geologia estrutural e geoprocessamento aplicados à hidrogeologia. estudo de caso nos municípios de Boa Viagem e Mombaça. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2021. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29430>>. Acesso em: 2 jun. 2022.

GALVÃO, P. Influência do uso do solo na taxa de infiltração da água na bacia hidrográfica dos igarapés 54 e 7, Paragominas / PA. **Holos environment**, v. 20, p. 303–319, 2020.

GASPAR, M. T. P. **Hidrogeologia geral**. [s.l.]: DF [2019]. Disponível em <<https://progestao.ana.gov.br/destaque-superior/eventos/oficinas-de-intercambio-1/aguas-subterraneas-1/oficina-aguas-subterraneas-vitoria-es-2019/oficina-progestao-es-palestra-3-ana-cosub-hidrogeologia-geral.pdf>>. Acesso em: 18 jul. 2022.

GIACOMIN, G.; CARVALHO, M. B. de; SANTOS, A. de P. dos; MEDEIROS, N. das G.; Ferraz, A. S. Análise comparativa enter métodos interpoladores de modelos de superfícies. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 6, p. 1315–1329, 2014. Disponível em:

<<https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44716/0>>. Acesso em: 19 jul. 2023.

GIAMPÁ, C. E. Q.; GONÇALES, V. G. **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**. São Paulo. Oficina de textos, 2013.

GOEPEL, K. D. Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**, [S. l.], v. 10, n. 3, 2018. Disponível em: <https://ijahp.org/index.php/IJAHP/article/view/590>. Acesso em: 15 abril 2023.

GOMES, L. F. A. M. . **Teoria da decisão**. São Paulo: Cengage Learning, 2007.

GONÇALVES, G. R. **Qualidades cartográficas em modelação digital do terreno : a perspectiva do produtor e do utilizador**. 2002, Aveiro: [s.n.], 2002. p. 8. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Gil-Goncalves/publication/339939800_Qualidades_cartograficas_em_modelacao_digital_do_terreno_a_perspectiva_do_produto_r_e_do_utilizador/links/5e6e00b8a6fdccf994ca32ac/Qualidades-cartograficas-em-modelacao-digital-do-terreno-a-perspectiva-do-produto_r-e-do-utilizador.pdf>. Acesso em 2 jun 2023.

GONÇALVES, R. D., & Chang, H, K. (2017). Modelo hidrogeológico do sistema aquífero Urucuia na bacia do rio Grande (BA). **Geociências**. 36 (2) p. 205-220. 2017. Disponível em: <<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/11132>>. Acesso em 23 mar. 2022.

GONÇALVES, J. A. C.; PEREIRA, P. H. R.; ALMEIDA, M. S. L. Caracterização dos Sistemas Aquíferos do Distrito Ferrífero de Itabira, Minas Gerais. **Águas Subterrâneas**, v. 35, n. 1, p. 1–11, 2021. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/30014>. Acesso em 22 ab. 2023.

GONÇALVES, J. A. C.; PEREIRA, P.H.R.; VIEIRA, E. M. Sistemas aquíferos : hidrogeologia da porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero na região de Itabira (MG). **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2021. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29349>. Acesso em: 7 out. 2022.

GUARNIERI, L. B. **Geologia precambriana da regioao de Nova Era, extremo NE do Quadrilátero Ferrífero -MG**.2003. Dissertação de mestrado em Mineralogia e Petrologia. Universidade de São Paulo, 2003.

HORTA, F. M. **Definição de Áreas Potenciais para Captação de Água Subterrânea Através de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, Exemplo de Aplicação a Ituiutaba**. 2000. 25 f. Monografia. (Especialização)

Geoprocessamento, Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.csr.ufmg.br/geoprocessamento/publicacoes/machadohorta2000.pdf>>. Acesso em 23 maio 2022.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). *Cidades*. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/joao-monlevade/pesquisa/1/74454>>. Acesso em 22 jan. 2022.

IDE-SISEMA. **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos-MG**. Disponível em: <<https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>> Acesso em: 22 de março de 2022.

JACÓ, A. P. ***Zoneamento geoambiental da bacia hidrográfica do rio São João(MG) como subsídio à gestão dos recursos hídricos***. 2019. 150 f. Monografia (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/11416?show=full>. Acesso em: 22 mai. 2023.

LEORNADI, Ivan R. **Geoprocessamento e sensoriamento remoto para recursos hídricos**. [livro eletrônico]. Contentus. Curitiba. 2020.

LEPSCH, Igo F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MACHADO, C. B.; ARAGÃO, L. E. O. E C. DE. Influência da pluviosidade na área superficial do sistema de abastecimento de água Cantareira (2003-2014). **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 79, p. 1753–1764, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/327079470_INFLUENCIA_DA_PLUVIOSIDADE_NA_AREA_SUPERFICIAL_DO_SISTEMA_DE_ABASTECIMENTO_DE_AGUA_CANTAREIRA_2003-2014. Acesso em: 22 jul.2022.

MANCUZZO, N. F. F. **Hidrogeologia e hidroestratigrafia da sub-bacia 82 - nordeste de Santa Catarina, leste do Paraná e litoral sul de São Paulo**. Águas Subterrâneas, [S. l.], 2018. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29292>. Acesso em: 7 out. 2022.

MARENGO, J. A. **Sumário das mudanças de clima projetadas pelo INPE CCST para o Brasil até final do Século XXI, e dos seus impactos, para um cenário de altas emissões**. Disponível em: <<http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 16 ago. 2021.

MARTINS JÚNIOR, A. C. de O.; CUNHA, S. L. R. da; BORGES, R. S. Q.; Campos; R. B. F.; GAEDE, E. P. S. CUNHA, M. L. R. da;

MARTINS, P. C. da S. Análise da distribuição da cobertura vegetal de Áreas Verdes Públicas em Governador Valadares, Minas Gerais, Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 33, p. 1–13, 2021. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/sn/a/zjvjsSRks9pfkhPq9XMhNwz/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 4 fev. 2023.

MARTINS, S. V. **Recuperação de áreas degradadas: como recuperar áreas de preservação permanente, voçorocas, taludes rodoviários e áreas de mineração**. Aprenda Fácil. Viçosa-MG. 2013.

MATA, D. da; DEICHMANN, U. HENDERSON, J. Vernon; SOMIK, V. Lall; WANG, H. G. **Um exame dos padrões de crescimento das cidades brasileiras**. Texto para Discussão - IPEA. Brasília: [s.n.], 2006. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1780/1/TD_1155.pdf>. Acesso em 23 jun. 2022.

MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. Avaliação da recarga subterrânea de bacias urbanas no município de São Carlos, SP. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], n. 1, 2005. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23197>. Acesso em: 2 jun. 2023.

MELO, D. D. C. D.; CABRERA, M. C. M.; WENDLAND, E. Balanço hídrico e modelagem computacional visando estimar recarga subterrânea. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 1, p. 66, 2016.

MIZUKAWA, Alinne. **Comitê de bacia hidrográficas**. Curitiba: Contentus. 2020.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. Editora UFV. Viçosa, 2003.

MOURÃO, M. A. A.; LOUREIRO, C. de O.; ALKMIM, F. F. O aquífero Cauê e unidades hidrogeológicas associadas: principais características hidroquímicas, porção ocidental do Quadrilátero Ferrífero, MG. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23792>. Acesso em: 24 jun. 2023.

MUSA, K.; AKHIR, J.; ABDULLAH, I. Groundwater prediction potential zone in Langat Basin using the integration of remote sensing and GIS. **The 21st Asian Conference on Remote Sensing**, v. 2, p. 68–78, 2000. Disponível em: <<http://scholar.googlehttps://a-a-r-s.org/proceeding/ACRS2000/Papers/PS300-18.htm.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Groundwater+Prediction+Potential+Zone+in+Langat+Basin+using+the+Integration+of+Remote+Sensing+and+GIS#2>>. Acesso em: 12 fev. 2022.

NEVES, M. A.; MIRANDA, R. F.; TRIGO, M. da S.; OLIVEIRA, M. S. M. de; PESSOA, A. D.; MANCINI, L. H. Resumo Assinatura isotópica das águas pluviais e subterrâneas na bacia hidrográfica do rio Itapemerim, estado do Espírito Santo. **Águas Subterrâneas**, v. 7, n. 1, p. 37–72, 2015.

OLIVEIRA, A. S. de; SILVA, A. M. da; MELLO, C. R. de. Dinâmica da água em áreas de recarga de nascentes em dois ambientes na região Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, n. 1, p. 59–67, 2020.

OLIVEIRA, D. A. de. **Estudo hidrogeológico do aquífero no bairro Amaro Lanari , em Ipatinga / MG**. 2018. 68 f. Universidade Federal de Ouro Preto, 2018. Disponível em: <<https://monografias.ufop.br/handle/35400000/1059>>. Acesso em 23 jun. 2023.

OLIVEIRA, Lima C. OLIVEIRA, R. C. de. Proposta de zoneamento geoambiental para o município de Caraguatatuba - SP. **Geosul**, v. 33, n. 67, p. 140–161, 2018.

OLIVO, A. de M.; ISHIKI, H. M. Brasil frente à escassez de água. **Colloquium Humanarum**. [S. l.], v. 11, n. 3, p. 41–48, 2015. Disponível em: <https://revistas.unoeste.br/index.php/ch/article/view/1206>. Acesso em: 30 jun. 2022.

PADILHA, A. F.; GOBATTO, D. R.; BATISTELLA, D. Estimativa da aptidão agrícola de terras por álgebra de mapas. **I Congresso Nacional de Geografia Física e XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**. 2017, Campinas-SP: Instituto de Geociências, 2017. p. 5661–5668. Disponível em: <https://ocs.ige.unicamp.br/ojs/sbgfa/article/view/2253>. Acesso em: 22 mai. 2022.

PEREIRA, L.; BEZERRA, D. Gestão de águas subterrâneas no contexto metropolitano: viabilidade para implementação de novas áreas de recarga de aquíferos na ilha de São Luís/MA. **Direito Ambiental e Sociedade**, v. 8, n. 2, p. 149–179, 2018.

PEREIRA, P. H. R. **Avaliação do potencial hídrico subterrâneo do município de Itabira/MG utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG)**. 2016. 92 f. Monografia de conclusão de curso de graduação, Universidade Federal de Itajubá, Itabira. 2016.

PIRES, C. de A.; Miranda, A. W. **A Análise geométrica de lineamentos e suas relações com águas subterrâneas associadas ao aquífero Guaratiba - região de Campo Grande e Guaratiba**, RJ. 2017. 40 f. Trabalho de conclusão de curso. –Curso de Geologia, Departamento de Geociências. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/332302952_ANALISE_GEOMETRICA_DE_LINEAMENTOS_E_SUAS_RELACOES_COM_AGUAS_SUBTERRANEAS_ASSOCIADAS_AO_AQUIFERO_GUARATIBA>

_REGIAO_DE_CAMPO_GRANDE_E_GUARATIBA_RJ>. Acesso em 13 mai. 2023.

PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C.T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia básica**. São Paulo: Blucher. 2017.

PMSB. **Plano Municipal de Saneamento Básico** - Produto 5 – Programas, Projetos e Ações e Hierarquização das Áreas e/ou Programas de Intervenção prioritários para os serviços de Saneamento Básico para o município de Nova Era. ENGECORPS Engenharia S.A.. Instituto BioAtlântica-AGB-Doce. 2015.

POLETO, C. **Bacias hidrográficas e recursos hídricos**. Rio de Janeiro. Interciência, 2014. 272 p.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 07 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. Disponível em: https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit&scriptPath=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit%3Amapbiomas-user-toolkit-lulc.js Acesso em 7 mai 2022.

PRUSKI, F. F. **Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. UFV. Viçosa. 2009.

RAMOS, M. L. S.; PAIXÃO, M. M. DE O. M. **Disponibilidade hídrica de águas subterrâneas-produtividade de poços e reservas explotáveis dos principais sistemas aquíferos**. Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia do rio São Francisco. 2004. Disponível em: <[https://www.ana.gov.br/PRHBHSF/SPR/Plano de Recursos Hidricos - CBHSF/3- Material de Consulta/Outros documentos/Aguas Subterraneas - BHSF/Aguas Subterraneas Sao Francisco.pdf](https://www.ana.gov.br/PRHBHSF/SPR/Plano%20de%20Recursos%20Hidricos%20-%20CBHSF/3-Material%20de%20Consulta/Outros%20documentos/Aguas%20Subterraneas%20-%20BHSF/Aguas%20Subterraneas%20Sao%20Francisco.pdf)>. Acesso em 22 ab. 2023.

REIS, S. T. **Análise de favorabilidade para exploração de água suterrânea no semiárido brasileiro-Casa Nova, Bahia**. 2018. 31 f. Monografia de especialização em Geoprocessamento Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/22166>>. Acesso em: 2 maio 2023.

RIBEIRO, D. D. de M. **Modelagem da potencialidade hídrica e vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas da sub-bacia do Rio Siriri, Estado de Sergipe: um estudo com base em geotecnologias**. 2011. 133f f. Dissertação de mestrado, Departamento de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Feira de Santana, 2011. Disponível em: <<http://tede2.uefs.br:8080/handle/tede/1077>>. Acesso em 13 jun. 2022.

RODRIGUES, L. N.; CAMBRAIA NETO, A. J. C. Recarga e sua importância para as águas subterrâneas e para a sustentabilidade da agricultura na região do

Cerrado. **Embrapa notícias**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias?p_p_id=buscanoticia_WA.>. Acesso em: 22 jun. 2022.

ROMERO, V.; FORMIGA, K. T. M.; MARCUZZO, F. F. N. Estudo hidromorfológico de bacia hidrográfica urbana em Goiânia/Go. **Ciência e Natura**, v. 39, n. 2, p. 320, 2017.

RICHTER, B. D.. **Em busca da água: um guia para passar da escassez à sustentabilidade**. São Paulo. Oficina de Textos, 2015.

SAATY, T.L. Decision making for leaders. Pitts burg, USA: WS. Publications, 2000.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3–5, p. 161–176, 1987.

SANTOS, Danilo R. dos; REICHERT, José M. Curso Agricultura familiar e desenvolvimento sustentável-Gênese e propriedades do solo. **Repositório UFSM**. Santa Maria. RS.[s.d.]. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/16154/Curso_Agric-Famil-Sust_G%C3%AAAnese-Propriedade-Solopdf?sequence=1%3E. Acesso em: 02 de maio 2023.

SERAPHIM, A. P. A. C. C.; BEZERRA, M. DO C. DE L. Identificação de áreas de recarga de aquíferos e suas interfaces com áreas propícias à urbanização. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, n. 23, p. 68–83, 2019.

SILVA, J. L. C.; VIDAL, C. A. S.; BARROS, L. M.; FREITAS; F. R. V. Aspectos da degradação ambiental no Nordeste do Brasil. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 180, 2018. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/6206. Acesso em: 13 jun.2022.

SILVA, M. A. V. **Meteorologia e climatologia**. Recife. 2006.

SOUSA, F. A. de. Identificação das zonas de recarga e caracterização dos sistemas freáticos de Iporá. **Geoambiente on line**, Jataí. n. 33, p. 103–130, 2019.

STAEHR, S. U.; ZANDE, D. V. der; STAEHR, P. A.; MARKAGER, S. Suitability of multisensory satellites for long-term chlorophyll assessment in coastal waters: A case study in optically-complex waters of the temperate region. **Ecological Indicators**, v. 134, n. August 2021, p. 12, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X21011444>>. Acesso em 20 jun.2023.

TAVEIRA, B. D. de A. **Hidrogeografia e gestão de bacias**. Curitiba: Intersaberes, 2018.

TERAMOTO, E. H.; CHANG, H. K. Métodos WTF e simulação numérica de fluxo para estimativa de recarga – exemplo Aquífero Rio Claro em Paulínia/SP. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 2, p. 173–180, 2018.

TEIXEIRA, G. M. **Serviços ambientais hidrológicos das áreas de preservação permanente**. 2015. 1–23 f. Dissertação de mestrado, Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2015. Disponível em: <<https://tede.ufrrj.br/handle/jspui/3179>>. Acesso em: 30 mar. 2023

TINÓS, T. M., Riedel, P. S., & Zaine, J. E. (2014). Técnicas de visualização de modelos digitais de elevação para o reconhecimento de elementos de análise do relevo. **Geociências**, 33(2), 952–967.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2001.

VERIATO, M. K. L.; BARROS, H. M. M.; SOUZA, L. de P.; CHICÓ, L. R.; BAROSI, K. X. L. Resumo: Água: Escassez, crise e perspectivas para 2050. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 10, n. 2, p. 17, 2015. Disponível em: <<https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/3869>>. Acesso em: 9 maio 2021.

VIÉGAS CAMPOS, J. C.; GASTMANS, D.; SANTAROSA, L. V.; BETANCUR, S. B. Gestão integrada dos recursos hídricos na área de ocorrência do sistema aquífero Bauru. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2021. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29311>. Acesso em: 18 jul. 2022.

VIDALETTI, V. F.; MARINS, A. C. de; SECCO, D.; RIZZI, R. L.; CHANG, P. Impacto da cobertura do solo, declividade e precipitação na infiltração de água no solo. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 17, p. e193101724562, 2021.

WAHNFRIED, I.; HIRATA, R. Comparação de Métodos de Estimativa de Recarga de Aquíferos em Uma Planície Aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 2, p. 15–25, 2005.