



**Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas
Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos
PROFÁGUA**

Gislene da Conceição Marcelino

**IDENTIFICAÇÃO DE PROVÁVEIS ÁREAS DE RECARGA HÍDRICA NO
MUNICÍPIO DE JOÃO MONLEVADE – MG.**

**Itabira-MG
Julho/2023**

Gislene da Conceição Marcelino

IDENTIFICAÇÃO DE PROVÁVEIS ÁREAS DE RECARGA HÍDRICA NO MUNICÍPIO DE JOÃO MONLEVADE – MG

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira–MG, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre; Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos–ProfÁgua. Área de concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos. Linha de pesquisa do projeto: Metodologia para Implementação dos Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos.

Aprovada em: 25 de julho de 2023.

Eliane Maria Vieira

Prof.^a Dr.^a. Eliane Maria Vieira (Orientadora)
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

Augusto

Prof. Dr. José Augusto Costa Gonçalves (Coorientador)
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

Roberto

Prof. Dr. Roberto César de Almeida Monte-Mor
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

Documento assinado digitalmente



ROSANE CRISTINA DE ANDRADE

Data: 29/08/2023 21:34:18-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rosane Cristina de Andrade
Universidade do Estado do Rio de Janeiro– UERJ



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por iluminar meus caminhos e me garantir a força necessária para superar todas as dificuldades enfrentadas ao longo do curso.

À minha família, por todo amor, em especial, aos meus pais, Antônio e Lúcia, por serem minha base. Agradeço também à minha irmã Gislaíne por todo amor e cumplicidade de sempre, foi essencial nesses últimos meses.

Ao meu parceiro de vida Gildo Tiago, por todo amor, carinho, cuidado, apoio e compreensão.

Aos colegas de mestrado que mesmo de longe, conseguiram me auxiliar nas dificuldades, por todas as experiências compartilhadas, paciência e apoio durante o desenvolvimento deste mestrado. Em especial ao Alisson, Januária, Lúcia e Cristiano. Tenho orgulho de ter estudado e compartilhado momentos enriquecedores com pessoas tão especiais!

A todos os professores do ProfÁgua, em especial à minha orientadora, Eliane Maria Vieira por toda ajuda, apoio, disponibilidade e paciência, por acreditar no meu potencial e principalmente por não ter desistido de mim.

A todos que contribuíram de alguma forma para que fosse possível a execução deste trabalho de conclusão de curso. A vocês, minha gratidão!

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 uma pessoa não se dedica ao seu objetivo, ele simplesmente não acontece. Se ela não persiste, mesmo em meio aos obstáculos, acaba desistindo. Por isso é tão importante saber exatamente o que se deseja e acreditar no próprio potencial para chegar lá. É assim que se torna possível se manter fortalecido ao longo do processo.

RESUMO

MARCELINO, Gislene da Conceição. Identificação de prováveis áreas de recarga hídrica no município de João Monlevade – MG. 2023. 86 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 identificação de áreas de recarga não é tão simples de se obter pois, fatores como intensidade e duração das chuvas, evapotranspiração, escoamento superficial, uso e ocupação do solo, propriedades do aquífero e do solo, apresentam variações ao longo do tempo. Além disso, dada as incertezas do método empregado e as variações de importância de cada critério pelo decisor podem ocasionar resultados diferentes. Porém, é importante ressaltar que diante da necessidade de integração de vários fatores, o uso do sensoriamento remoto e a aplicação de técnicas de geoprocessamento a partir da utilização de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) tornam-se cada vez mais essenciais na tomada de decisões. As áreas de recarga hídrica subterrânea são responsáveis pela manutenção, qualidade e quantidade de água que chega nos aquíferos pelo processo de infiltração. Objetivou-se com o estudo, identificar prováveis áreas de recarga hídrica subterrânea no município de João Monlevade-MG aplicando o Processo Analítico Hierárquico (ou Analytic Hierarchy Process – AHP) proposto por Saaty na década de 70, um método de análise multicritério amplamente utilizado no apoio à tomada de decisão que envolve complexidade e subjetividade, numa escala de graduações que varia de 1 a 9. Foram estabelecidos sete critérios denominados fatores temáticos e para cada um desses fatores foi atribuído um peso, referente a sua contribuição no potencial de recarga hídrica subterrânea. Nos resultados encontrados, observou-se que o critério hidrogeologia resultou em 30,2% de importância, seguido de geologia 21,4%, classes de solo 18,1%, pluviometria 12,3%, declividade 8,0%, uso e ocupação do solo 6,5% e hipsometria 3,6%. Em seguida, os mapas temáticos foram integrados em ambiente SIG gerando o mapa de potencial hídrico subterrâneo do município dividido em três classes de potencialidade: baixa, moderada e alta. Como resultado, 28,38% do território apresentam um potencial baixo, 64,32% apresentam um potencial moderado e 7,30% apresentam um potencial alto para a recarga de águas subterrâneas. Os resultados obtidos podem ser utilizados como ferramenta para a gestão dos recursos hídricos, proteção das áreas com maiores potenciais de recarga hídrica subterrânea, principalmente as zonas de preservação do município.

Palavras – Chaves: Recarga hídrica. Gerenciamento de Recursos Hídricos. Análise Multicritério.



ABSTRACT

MARCELINO, Gislene da Conceição. Identification of probable water recharge areas in the municipality of João Monlevade - MG. 2023. 86 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.

The identification of recharge areas is not so simple to obtain, factors such as rainfall intensity and duration, evapotranspiration, surface runoff, soil use and occupation, aquifer and soil properties, present variations over time. In addition, given the uncertainties of the method used and the variations in the importance of each criterion by the decision maker, they may cause different results. However, it is important to point out that given the need to integrate several variables, the use of remote sensing and the application of geoprocessing techniques from the use of a Geographic Information System (GIS) become increasingly essential in decision making. The underground water recharge areas are responsible for the maintenance, quality and quantity of water that reaches the aquifers through the infiltration process. The objective of this study was to identify probable areas of underground water recharge in the municipality of João Monlevade-MG, applying the Analytic Hierarchy Process (or Analytic Hierarchy Process – AHP) proposed by Saaty in the 70s, a multicriteria analysis method widely used in the support for decision-making involving complexity and subjectivity, on a grading scale ranging from 1 to 9. Seven criteria called thematic factors were established and a weight was assigned to each of these factors, referring to their contribution to the potential for groundwater recharge. It is observed that the hydrogeology criterion resulted in 30.2% of importance, followed by geology 21.4%, soil classes 18.1%, rainfall 12.3%, slope 8.0%, land use and occupation 6.5% and hypsometry 3.6%. Then, the thematic maps were integrated into a GIS environment, generating the groundwater potential map of the municipality divided into three potential classes: low, moderate and high. As a result, 28.38% of the territory has a low potential, 64.32% has a moderate potential and 7.30% has a high potential for groundwater recharge. The results obtained can be used as a tool for the management of water resources, protection of areas with greater potential for underground water recharge, mainly the preservation zones of the municipality.

Keywords: Water recharge. Water Resources Management. Multicriteria.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação do fluxo de águas subterrâneas no ciclo hidrológico.....	17
Figura 2 - Representação esquemática dos principais aquíferos brasileiros, Brasil, 2005.	18
Figura 3 - Representação de uma matriz n x n	23
Figura 4 - Localização da área de estudo	27
Figura 5 - Evolução da expansão urbana de João Monlevade-MG.....	30
Figura 6 - Zonas de expansão urbana em João Monlevade-MG	32
Figura 7 - Fluxograma das etapas do estudo	33
Figura 8 - Uso e Ocupação do solo do município de João Monlevade-MG	40
Figura 9 - Cargas do Uso e Ocupação do Solo.....	42
Figura 10 - Mapa de declividade de João Monlevade-MG.	44
Figura 11 - Cargas de Declividade.	46
Figura 12 - Mapa de Classes de solo de João Monlevade – MG.....	48
Figura 13 - Cargas Classes de solos.	50
Figura 14 - Mapa de Hipsometria (relevo) de João Monlevade-MG.	52
Figura 15 - Cargas de Hipsometria.....	54
Figura 16 - Mapa de Geologia de João Monlevade-MG.....	56
Figura 17 - Cargas de Geologia.....	58
Figura 18 - Mapa Hidrogeológico de João Monlevade-MG.	62
Figura 19 - Cargas Hidrogeologia	64
Figura 20 - Mapa de Pluviometria.....	66
Figura 21 - Carga de Pluviometria.	67
Figura 22 - Mapa do Potencial de Recarga Hídrica de João Monlevade-MG.....	71
Figura 23 - Potencial baixo de recarga hídrica	73
Figura 24 - Potencial moderado de recarga hídrica.	74
Figura 25 - Potencial alto de recarga hídrica.....	75
Figura 26 - Potencial de recarga correlacionada às zonas de expansão urbana.	76
Figura 27- Áreas de recarga e Captações subterrâneas de João Monlevade-MG.	77



LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Unidades e regiões de Planejamento do município de João Monlevade, 2006.....	26
Quadro 2 - Classes de Relevo empregadas na elaboração do mapa de declividade.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escala fundamental de comparação paritária do método AHP	22
Tabela 2 - Índice randômico para matrizes quadradas de ordem n	24
Tabela 3 - Dados climatológicos de João Monlevade-MG, conforme Climate-data, 2022.	28
Tabela 4 - Reclassificação de tipologias de uso do solo.....	35
Tabela 5 - Quantitativo de área dos usos e ocupação do solo em João Monlevade- MG	41
Tabela 6 – Cargas de uso e ocupação do solo quanto ao potencial de recarga.	41
Tabela 7 - Cargas declividade quanto ao potencial de recarga.....	45
Tabela 8 – Cargas dos tipos de solo.	49
Tabela 9 - Cargas de Hipsometria.	53
Tabela 10 - Cargas dos aspectos geológicos.	57
Tabela 11 – Cargas dos aspectos hidrogeológicos.	63
Tabela 12 - Matriz de comparação pareada para os fatores temáticos.	68
Tabela 13 - Matriz normalizada para os fatores temáticos.	69
Tabela 14 - Quantificação das áreas de potencial de recarga hídrica.	70

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
3.1 Recursos Hídricos.....	14
3.2 Águas Subterrâneas	15
3.3 Recarga Hídrica	18
3.4 Geoprocessamento como Ferramenta de Gestão de Recursos Hídricos.....	19
3.5 Método de Análise Espacial Multicritério.....	20
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4.1 Área de estudo	25
4.2 Metodologia.....	32
4.3 Processamento de dados	34
4.3.1 Mapeamento do uso e ocupação do solo	34
4.3.2 Mapeamento da declividade	35
4.3.3 Mapeamento das classes de solos.....	36
4.3.4 Mapeamento de Hipsometria (Relevo).....	36
4.3.5 Mapeamento Geológico (litoestratigrafia).....	37
4.3.6 Mapeamento Hidrogeológico	37
4.3.7 Mapeamento Pluviometria.....	37
4.4 Mapeamento de Potencial de recarga hídrica.....	38
4.5 Construção da matriz de comparação e atribuição de pesos finais.....	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1 Mapeamento do uso e ocupação do solo	39

5.2 Mapa de declividade.....	43
5.3 Mapeamento de Classes de Solo	47
5.5 Mapa de Geologia.....	55
5.6 Mapa Hidrogeológico	59
5.7 Mapa de Pluviometria.....	65
5.8 Avaliação e ponderação dos mapas temáticos.....	68
6. CONCLUSÕES	78
CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
RECOMENDAÇÕES.....	80
REFERÊNCIAS	81

1. INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei Federal nº 9433, de 08 de janeiro de 1997, representa um grande avanço na gestão das águas no país sob a perspectiva constitucional de democracia e descentralização administrativa (BRASIL, 1997). Segundo Cavalcante (2019), essa lei estabelece como fundamentos: a água como bem de domínio público, limitado, dotado de valor econômico; com sua gestão propiciando o uso múltiplo, partilhado entre usuários, poder público e comunidade; com priorização da dessedentação humana e animal em casos de escassez, e adota a bacia hidrográfica como referencial para implantação da PNRH.

Para a gestão dos recursos hídricos há necessidade de organizar, utilizar e apresentar dados e informações provenientes de diversas fontes e disponibilizá-los de forma que auxilie na implementação dos instrumentos de gestão e no processo de tomada de decisão, que pressupõe a gestão descentralizada, participativa e integrada (SÃO PAULO, 2018). Um dos principais desafios para a gestão local é a criação de novas áreas para expansão urbana alinhadas às práticas de conservação do solo e da água; tal fato tem apontado para a necessidade de uma gestão integrada entre o desenvolvimento econômico e gerenciamento de recursos hídricos.

Para Oliveira (2020), a urbanização é um fenômeno que impacta o ciclo hidrológico e afeta não só os regimes de chuva, mas ocasiona alagamentos sobre as bacias, devido à alta impermeabilização do solo, aumento da contaminação dos mananciais, escassez hídrica, mudanças na capacidade de infiltração natural, alteração da camada superficial do solo, que impede a recarga natural e reflete no fluxo de base dos reservatórios superficiais durante os períodos de estiagem.

“O principal risco para a qualidade dos corpos hídricos subterrâneos é a poluição oriunda da falta de saneamento e resíduos industriais e urbanos nas áreas de recarga” (FOLLMANN; FOLETO, 2013 *apud* VIEIRA, 2018).

A atual escassez hídrica e a crescente ocupação do solo urbano, alinhados ao uso incontrolado dos recursos hídricos tem provocado diversos impactos sobre as áreas de recarga dos aquíferos. Como forma de aprofundar o entendimento da correlação entre os parâmetros urbanísticos e a infiltração natural, “o conhecimento do potencial de infiltração natural produzido por essas tipologias, associado ao conhecimento das condições do meio físico que regulam a dinâmica da recarga constituem-se em condição para a predição de padrões de ocupação que mitiguem a perda de recarga dos aquíferos” (SERAPHIM, 2018).

“Essas considerações levam a crer que a incorporação do aspecto ecológico, ao Planejamento e Desenho Urbano, é necessária para consubstanciar uma configuração de usos e funções mais apropriadas a uma região” (RIBAS, 1988 *apud* OLIVEIRA, 2020). Entender e analisar os impactos da urbanização relacionados com a quantidade e qualidade da água representam um desafio não só para as áreas de hidrologia e gestão de recursos hídricos, mas também para o Planejamento Urbano, demandando uma revisão das estratégias de gestão das políticas públicas.

Técnicas GIS juntamente com dados de sensoriamento remoto possibilitam obter e representar os dados geohidrológicos que determinam a disponibilidade de águas subterrâneas, tais tecnologias têm sido utilizadas por vários pesquisadores para demarcação de zonas de potencialidades de águas subterrâneas em suas áreas de interesse, como: Tedesco *et al.*, (2021) que realizaram a Avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas por meio dos métodos Análise Hierárquica de Processos - AHP; Castro e Gonçalves (2022), verificaram a Quantificação do potencial hídrico subterrâneo do baixo curso do rio Piracicaba (MG): Interação das águas subterrâneas e superficiais; Vargas *et al.*, (2022), delimitaram as zonas potenciais de recarga de três pequenas bacias hidrográficas urbanas destinadas ao abastecimento de água potável da cidade de Caxias do Sul – RS e Ghosh e Sahu (2023), delimitaram zonas potenciais de águas subterrâneas usando técnicas AHP e GIS: um estudo de caso na bacia do rio Barakar, Índia.

Existem várias técnicas de obtenção de informações sobre o potencial de recarga de águas subterrâneas. Uma delas refere-se aos métodos convencionais baseados em campo, como investigações hidrogeológicas, testes de perfuração de solo, levantamentos piezométricos e levantamentos geofísicos de resistividade. Porém, vários pesquisadores têm optado pela aplicação de sensoriamento remoto e dados geospaciais convencionais em um ambiente GIS, pois as informações podem ser obtidas com o mínimo de esforço, tempo e custo. Além disso, os métodos tradicionais não são apenas os mais caros, mas também mais demorados e trabalhosos.

Neste estudo, o Processo Analítico Hierárquico (AHP) foi utilizado para determinar o peso final de cada fator temático com base em sua importância relativa na contribuição da recarga hídrica subterrânea na cidade de João Monlevade-MG o que poderá possibilitar a aplicação desse produto na gestão do uso do solo. Além disso, tal pesquisa apresenta um aspecto inovador por utilizar a técnica para delimitar áreas prováveis de recarga hídrica subterrânea a nível de gestão municipal, podendo ser replicado em outras áreas de estudo.

O método AHP é amplamente utilizado em várias áreas, como gestão, engenharia, economia, planejamento estratégico e tomada de decisões complexas. Ele fornece uma estrutura sistemática para analisar e avaliar alternativas, considerando múltiplos critérios, ajudando os tomadores de decisão a chegarem em escolhas mais fundamentadas e racionais.

Nesse sentido, a presente pesquisa objetiva a identificação de zonas potenciais de recarga das águas subterrâneas usando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicando o método AHP. Até o momento, tal investigação não foi observada na literatura existente para a área estudada. Portanto, a identificação de áreas de potencialidade de recargas subterrâneas se insere no contexto de apoiar o poder público municipal na gestão dos recursos hídricos no município de João Monlevade-MG. Diante disso, as abordagens adotadas e o mapa de potencial das águas subterrâneas resultante serão considerados como uma nova contribuição para a presente área de estudo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Identificar áreas potenciais de recarga hídrica subterrânea usando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicando o método de Processo Analítico Hierárquico (AHP), no município de João Monlevade – MG.

2.2 Objetivos Específicos

Com o intuito de atingir o objetivo geral da pesquisa, são elencados os seguintes propósitos a serem atingidos:

- a) Definir os pesos para os fatores que contribuem para a recarga dos aquíferos na área de estudo;
- b) Identificar as áreas com maiores potenciais de recarga no município;
- c) Delimitar possíveis áreas de recarga hídrica em áreas de expansão urbana, conforme Plano Diretor do município de João Monlevade e elaborar um mapa destas áreas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Recursos Hídricos

A água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico e essencial para a vida de todos os seres vivos. Por ser um bem de domínio público, o governo federal e os governos estaduais e distrital são os responsáveis por regular o seu acesso e implementar uma série de instrumentos de gestão, promovendo o uso múltiplo e sustentável em benefício das atuais e futuras gerações (ANA, 2021).

A gestão dos recursos hídricos no país é normatizada pela Política Nacional de Recursos Hídricos – Lei Federal nº 9.433/1997, onde constam conceitos, fundamentos, diretrizes, instrumentos de gestão e a estrutura de governança ali instituída. Os objetivos da política são (BRASIL, 1997): (1) assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos; (2) a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável; e (3) a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais.

A gestão deve ocorrer seguindo os princípios da descentralização e da participação social, considerando a bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento, utilizando-se dos instrumentos de gestão propostos, visando aos usos múltiplos da água. Além disso, a gestão não deve dissociar aspectos de qualidade e quantidade da água e deve ser integrada com outras políticas setoriais, em especial com a de meio ambiente (ANA, 2021).

Os cinco instrumentos de gestão dos recursos hídricos previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos visam oferecer mecanismos e organizar a gestão por meio de ações de planejamento, regulação, fiscalização e divulgação de informações. Há um inter-relacionamento e em alguns casos, uma dependência entre eles, como por exemplo, a cobrança pelo uso requer a existência do plano de recursos hídricos da bacia para sua posterior implementação e, a concessão de outorga de direito de uso, que requer a observação da classe de enquadramento do corpo d'água antes de ser emitida. O cadastro de usuários e a fiscalização são ações para regularização dos usos que impactam especialmente na outorga e na cobrança. Por fim, tudo deve estar acessível em sistema de informações estruturado e atualizado.

A gestão das águas em Minas Gerais é regida pela Política Estadual de Recursos Hídricos (Lei Estadual nº 13.199/1999). Segundo o Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM (2021), essa Política visa assegurar o controle, pelos usuários atuais e futuros, do uso da água e de sua utilização em quantidade, qualidade e regime satisfatórios. Para apoiar e direcionar o trabalho do Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos existem instrumentos e ferramentas de gestão, como: o Plano Estadual de Recursos Hídricos; os Planos Diretores de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas; o Sistema Estadual de Informações sobre Recursos Hídricos (InfoHidro); o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo seus usos preponderantes; o cadastro de usos e usuários de recursos hídricos, o monitoramento da qualidade da água, a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; a cobrança pelo uso de recursos hídricos, entre outros (MINAS GERAIS, 2021).

Este trabalho se insere na linha de pesquisa Instrumentos da Política de Recursos Hídricos, especificamente em Metodologias para implementação desses instrumentos, pois para a gestão dos recursos hídricos há necessidade de organizar, utilizar e apresentar dados e informações provenientes de diversas fontes e disponibilizá-los de uma maneira que auxilie na implementação dos instrumentos de gestão e no processo de tomada de decisão.

Assim, nesta pesquisa o foco central foi estabelecer dados e informações de áreas de recarga hídrica subterrânea no município de João Monlevade-MG e disponibilizá-los ao poder público a fim de auxiliar no processo de tomada de decisão e subsidiar a implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos em âmbito municipal.

3.2 Águas Subterrâneas

Aquífero é uma formação geológica do subsolo, constituída por rochas permeáveis, que armazena água em seus poros ou fraturas. Outra definição refere-se à aquífero como sendo, somente, o material geológico capaz de servir de depósito e de transmissor da água aí armazenada. Logo uma litologia só será aquífera se, além de ter seus poros saturados (cheios) de água, permitir a fácil transmissão da água armazenada (ABAS, 2019).

Quanto à porosidade, os aquíferos são divididos em três tipos (ABAS, 2019):

a) Aquífero poroso ou sedimentar: Formado por rochas sedimentares, sedimentos inconsolidados ou solos arenosos, onde a circulação de água se dá nos poros formados entre os grãos de areia, silte e argila.

b) Aquífero fraturado ou fissural: Formado por rochas cristalinas, ígneas ou metamórficas, onde a circulação de água ocorre nas fraturas, fendas e falhas abertas devidos a movimentos tectônicos.

c) Aquífero cárstico: Formado em rochas calcáreas ou carbonáticas, onde a circulação da água ocorre nas fraturas e outras discontinuidades formadas por dissolução do carbonato pela água.

De modo geral, as rochas sedimentares, representadas pelo sistema de aquífero granular, favorecem os processos de recarga hídrica subterrânea devido à boa porosidade desses litotipos. Contrariamente, as rochas carbonáticas e cristalinas, representadas pelo sistema de aquífero cárstico e fissural respectivamente, rochas de baixa porosidade natural, reduzem drasticamente o potencial de recarga hídrica (MELO NETO *et al.*, 2013 *apud* LIMOEIRO, 2020).

A litologia do aquífero, ou seja, a sua constituição geológica (porosidade/permeabilidade intergranular ou de fissuras) é que irá determinar a velocidade da água em seu meio, a qualidade da água e a sua qualidade como reservatório. Essa litologia é decorrente da sua origem geológica, que pode ser fluvial, lacustre, eólica, glacial e aluvial (rochas sedimentares), vulcânica (rochas fraturadas) e metamórfica (rochas calcáreas), determinando os diferentes tipos de aquíferos (ABAS, 2019).

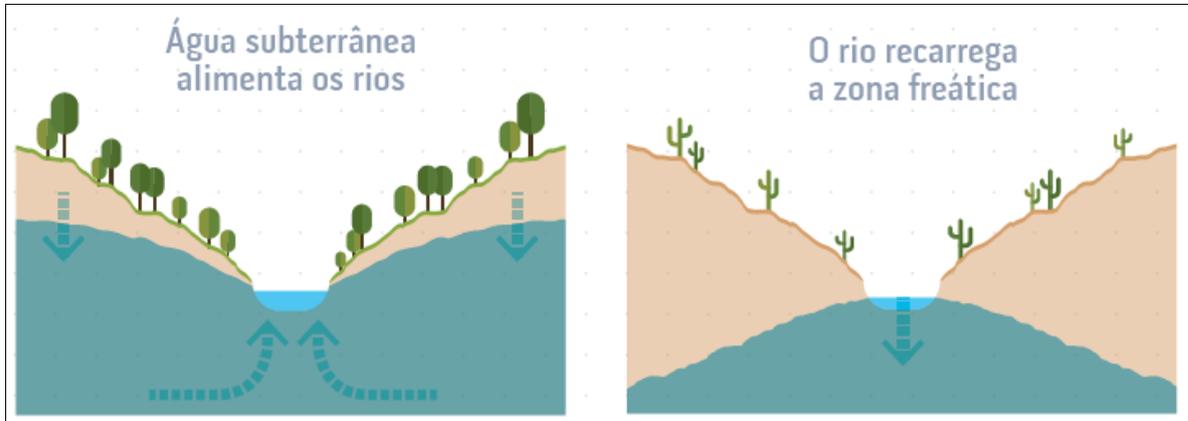
A disponibilidade de água superficial, apesar da relevante influência da regularização do fluxo de água dos rios pelos reservatórios, é garantida pela contribuição de água dos aquíferos (Figura 1), que representam o fluxo de base da maior parte dos rios em território nacional (ANA, 2021). Ademais, as extrações de águas subterrâneas podem reduzir esse fluxo e impactar as vazões dos rios, diante disso, para definir a disponibilidade hídrica subterrânea, é importante utilizar apenas uma parcela das reservas renováveis dos aquíferos (uma parcela da recarga) de modo que o restante seja destinado à manutenção das vazões dos rios (ANA, 2021).

Para Alvarenga e Gonçalves (2008), os recursos hídricos subterrâneos desempenham importantes funções no equilíbrio ambiental, visto que são responsáveis pela manutenção do fluxo das águas superficiais ao longo do ano hidrológico, garantindo a perenidade dos mananciais. Acrescentam ainda que os aquíferos desempenham também a função de produção de água para consumo humano, industrial ou irrigação em muitos países.

Estima-se que a disponibilidade de água subterrânea no Brasil seja em torno de 13.205 m³/s e, da mesma forma como ocorre com as águas superficiais, sua distribuição pelo

território nacional não é uniforme e as características hidrogeológicas e de produtividade dos aquíferos são variáveis, com regiões de escassez e outras com relativa abundância (ANA, 2021).

Figura 1- Representação do fluxo de águas subterrâneas no ciclo hidrológico

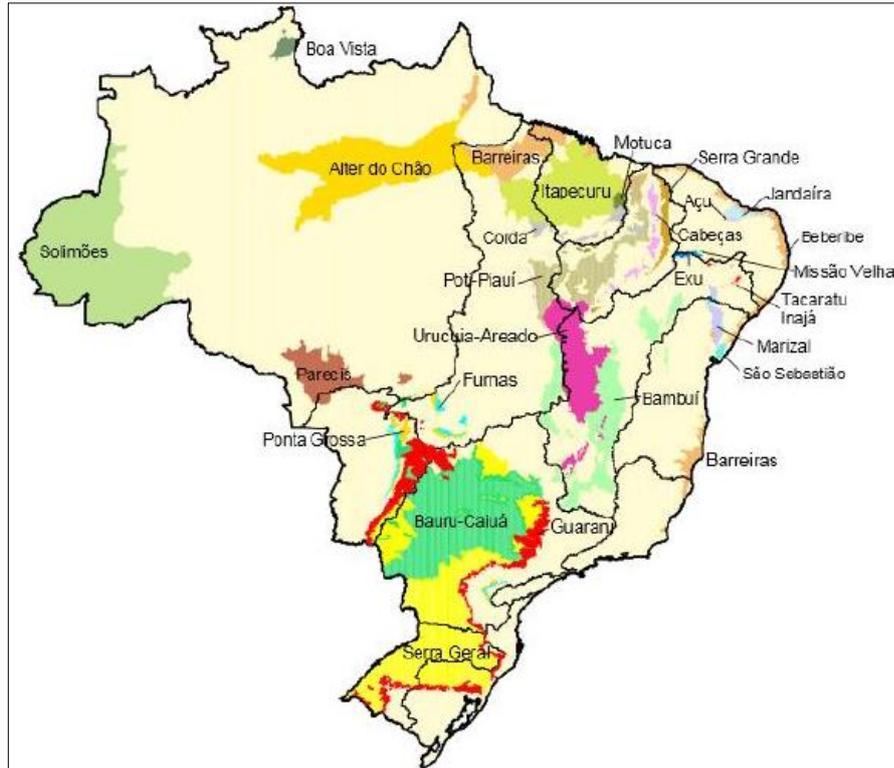


Fonte: ANA (2020).

O Brasil possui importantes sistemas aquíferos com boa distribuição nas regiões hidrográficas e com bom potencial hídrico. A maior parte destes aquíferos é do tipo poroso e localiza-se nas bacias sedimentares, que ocupam aproximadamente 48% do território nacional (FREITAS *et al.*, 2007).

Os principais sistemas aquíferos brasileiros totalizam uma reserva renovável de aproximadamente 20 mil m³/s, com cerca de 4.100 m³/s como valor de disponibilidade hídrica subterrânea (reserva explorável). Os sistemas aquíferos porosos que apresentam os maiores valores de reservas renováveis são, em ordem decrescente de valor: Solimões, Serra Geral, Bauru-Caiuá, Parecis, Alter do Chão, Urucuaia-Areado e Barreiras (Figura 2). Cada um desses sistemas tem reserva renovável acima de 1.000 m³/s e totalizam cerca de 86% das reservas renováveis (ANA, 2021).

Figura 2 - Representação esquemática dos principais aquíferos brasileiros, Brasil, 2005.



Fonte: ANA (2005).

Variações do nível da água subterrânea podem estar associadas às variações climáticas e ao uso e ocupação da terra, os quais podem refletir nas condições de recarga e extração de água dos poços. Para estimar o quanto da disponibilidade hídrica subterrânea já está sendo consumida, primeiramente é preciso conhecer os volumes extraídos pelos poços. Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021) em 2017 estimou-se a existência de 1,2 milhões de poços no Brasil e 2,6 milhões de poços em 2021. A retirada total para essa quantidade de poços foi estimada em 1.083,3 m³/s, o que corresponde a 8% das reservas exploráveis ou da disponibilidade hídrica subterrânea, entretanto, trata-se de informações médias, de maneira que localmente o cenário é bastante diferente (ANA, 2021).

3.3 Recarga Hídrica

A Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - ABAS (2019) dispõe que um aquífero apresenta uma reserva permanente de água e uma reserva ativa ou reguladora que são continuamente abastecidas através da infiltração da chuva e de outras fontes subterrâneas. As reservas reguladoras ou ativas correspondem ao escoamento de base dos rios. A área por onde

ocorre o abastecimento do aquífero é chamada zona de recarga, que pode ser direta ou indireta, já o escoamento de parte da água do aquífero ocorre na zona de descarga.

Bandeira e Abreu (2009), descreveram que a recarga dos aquíferos superficiais está intimamente ligada à retenção hídrica e tem relação direta com a incidência das chuvas. Nos períodos de deficiência hídrica, os aquíferos poderão ser abastecidos pelas drenagens influentes ocorrendo uma inversão no vetor de recarga, enquanto em períodos de excedente hídrico o fluxo subterrâneo apresenta sentido do vetor para as drenagens.

Para Sousa (2019), as zonas de recarga do lençol freático apresentam ligações diretas com a forma do relevo, ou seja, quanto mais plano for o relevo, maior a infiltração da água. Assim, os pontos mais favoráveis para a recarga são aqueles que apresentam uma altitude mais acentuada em relação ao fundo de vale desde que o topo se apresente plano, pois a altitude influencia na pressão hidrostática da água forçando-a para as partes mais baixas devido à gravidade. Além disso, a superfície plana favorece a infiltração em detrimento do escoamento superficial. Dessa forma, as zonas de recarga e a capacidade de recarga estão intimamente ligadas ao tipo de litologia, relevo, solo, cobertura vegetal, chuvas, evaporação, escoamento superficial e infiltração.

Santos e Manzione (2018), salientam que os mecanismos de recarga e descarga do aquífero são componentes do ciclo hidrológico importantes para o manejo do recurso hídrico subterrâneo e que a pesquisa e o conhecimento da recarga demonstram também a interação entre as águas subterrâneas e superficiais. Tais pesquisas são fundamentais, pois as atividades antrópicas podem levar à contaminação das áreas vulneráveis, além do aumento da exploração de água de forma insustentável.

A quantificação das recargas é fundamental para a implementação de políticas adequadas de gestão dos recursos hídricos e ao mesmo tempo, assume um papel de interação entre as técnicas hidrológicas de superfície e as técnicas típicas da hidrogeologia (SENHORINHO; TROIAN; KUHN, 2018).

3.4 Geoprocessamento como Ferramenta de Gestão de Recursos Hídricos

Geoprocessamento é o “conjunto de tecnologias voltadas a coleta e tratamento de informações espaciais para um objetivo específico. As atividades envolvendo o geoprocessamento são executadas por sistemas específicos mais comumente chamados de Sistemas de Informação Geográfica (SIG)” (INPE, 2006).

Ainda de acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2006), um sistema de geoprocessamento é destinado ao processamento de dados referenciados geograficamente (ou georreferenciados), desde a sua coleta até a geração de saídas na forma de mapas convencionais, relatórios, arquivos digitais, entre outros, devendo prever recursos para sua estocagem, gerenciamento, manipulação e análise.

Moraes e Lorandi (2016) afirma que diante da necessidade de integração de tantas variáveis, o uso de produtos oriundos do sensoriamento remoto e a aplicação de técnicas de geoprocessamento a partir da utilização de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) tornam-se cada vez mais essenciais. Becker (2002) *apud* Moraes e Lorandi (2016), ao discutir a aplicação do SIG nos estudos de ecologia e manejo de bacias, enfatiza ainda a possibilidade de se trabalhar com escalas espaciais e temporais mais abrangentes, bem como a integração de múltiplas escalas; necessária, muitas vezes, para a compreensão de processos ecológicos e antrópicos que ocorrem em escalas diferentes.

Para Sokoloski (2020), a utilização do SIG também tem grande importância no que tange ao monitoramento da vulnerabilidade socioambiental ao longo do tempo, visto que as variáveis e o crescimento das cidades são dinâmicos. Assim, a atualização constante desse mapeamento e o seu monitoramento permitem avaliar a efetividade das políticas públicas implementadas, bem como atualizar suas metas e objetivos.

O mapeamento das áreas de recarga é essencial para o entendimento, delimitação, caracterização, espacialização e planejamento ambiental dessas áreas. Para isso, a aplicação de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e técnicas de geoprocessamento aliados ao método de análise multicritérios têm sido validada por diversos pesquisadores, pois permitem a avaliação integrada de grande número de critérios.

3.5 Método de Análise Espacial Multicritério

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), ou Processo Hierárquico Analítico em português, foi desenvolvido por Thomas L. Saaty em meados da década de 1970 (SAATY, 1977). Trata-se de um método de análise multicritério amplamente utilizado no apoio à tomada de decisão que envolve complexidade e subjetividade. O princípio do método é decompor fatores que afetam os problemas complexos e categorizar esses fatores em diferentes níveis em uma estrutura hierárquica, auxiliando a tomada de decisão e permitindo a integração entre critérios qualitativos e quantitativos.

O AHP é baseado na estruturação hierárquica do problema, em que as decisões são divididas em níveis e subníveis, formando uma estrutura em árvore. A hierarquia é composta por três elementos principais: objetivo, critérios e alternativas. O objetivo representa o problema geral que está sendo abordado, os critérios são os fatores relevantes para a tomada de decisão e as alternativas são as opções disponíveis para escolha.

Para Tedesco, Oliveira e Trojan (2021), o método AHP direciona os especialistas a evidenciar a importância relativa de cada critério na hierarquia estabelecida, traduzindo os julgamentos em números, que são referidos como pesos. Na sequência, são agrupados e calculados por meio da média geométrica normalizada gerando os pesos dos critérios para designar a importância de cada um deles.

Os critérios podem ser considerados como eixos que direcionam a avaliação do decisor permitindo a realização de comparações entre as alternativas e constituem a representação do objetivo (TEDESCO; OLIVEIRA; TROJAN, 2021). Esses critérios de avaliação podem ser classificados em atributos diretos ou indiretos e a escolha para análise de prováveis áreas de recarga hídrica pode ser obtida por meio das análises de parâmetros como de uso e ocupação do solo, hidrografia, declividade, relevo, tipo de solo, hidrogeologia, sendo selecionados os parâmetros específicos com base na sua relevância.

Assim, conforme exposto, são diversos os estudos que empregam a análise hierárquica de processos com subsídio à gestão dos recursos naturais relacionados a potenciais áreas de recarga hídrica subterrânea. Tais estudos explanaram como a recarga hídrica subterrânea está diretamente relacionada a alguns parâmetros como a geomorfologia, declividade do terreno, hipsometria, sistema aquífero, classe e uso do solo, e como estes influenciam na classificação da área de recarga hídrica, tendo como principal fonte a precipitação pluviométrica.

O método AHP utiliza uma escala de comparação relativa para avaliar a importância relativa dos critérios e alternativas em relação ao objetivo. Essa escala de comparação geralmente varia de 1 a 9, em que 1 indica igual importância e 9 indica uma importância extremamente maior, conforme a Tabela 1. Os julgamentos são realizados por meio de comparações em pares, em que os elementos são comparados dois a dois. Com base nas comparações realizadas, é construída uma matriz de comparação.

Tabela 1 - Escala fundamental de comparação paritária do método AHP

ESCALA NUMÉRICA	ESCALA VERBAL	EXPLICAÇÃO
1	Mesma importância	As alternativas i e j contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada de um sobre o outro	A alternativa i tem importância moderada sobre a alternativa j
5	Importância essencial ou forte	A alternativa i tem importância grande sobre a alternativa j
7	Importância muito forte	A alternativa i tem importância muito grande sobre a alternativa j
9	Importância extrema	A alternativa i tem importância absoluta sobre a alternativa j
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se tem dúvidas entre as importâncias ímpares acima

Fonte: SAATY (1977).

O método AHP ajuda a eliminar a complexidade no processo de tomada de decisão, dividindo em várias hierarquias e construindo uma matriz de comparação pareada. Os pesos finais para cada critério são calculados com base em sua importância relativa na contribuição do potencial de recarga. Para isso, em um primeiro momento, os critérios relevantes são comparados entre si, e a ponderação final é atribuída seguindo um processo hierárquico (BERA *et al.* 2020 *apud* GHOSH; SAHU, 2023).

O método AHP divide o problema geral em avaliações de menor importância, enquanto mantém, ao mesmo tempo, a participação desses problemas menores na decisão global. Ou seja, ao encarar um problema complexo, é mais fácil dividi-lo em outros menores, pois quando solucionados individualmente e depois somados, estes representam a decisão do problema inicial buscada (PUC-RIO, 2007).

A escala recomendada por Saaty (1977), mostrada na Tabela 1, vai de 1 a 9, com 1 significando a indiferença de importância de um critério em relação ao outro, e 9 significando a extrema importância de um critério sobre outro, com estágios intermediários de importância entre esses níveis 1 e 9. Além disso, desconsiderando as comparações entre os próprios critérios, que representam 1 na escala, apenas metade das comparações precisa ser feita, porque a outra metade constitui-se das comparações recíprocas na matriz de comparações, que são os valores recíprocos já comparados. A seguir, será explanado como funciona o método AHP fundamentado em PUC-Rio (2007).

O julgamento reflete as respostas de duas perguntas: qual dos dois elementos é mais importante com respeito a um critério de nível superior, e com que intensidade, usando a

escala de 1-9, da Tabela 1. É importante notar que o elemento mais importante da comparação é sempre usado como um valor inteiro da escala, e o menos importante, como o inverso dessa unidade. Se o elemento linha é menos importante do que o elemento-coluna da matriz, entramos com o valor recíproco na posição correspondente da matriz. Devido à relação de reciprocidade e à necessidade de consistência entre duas atividades ou critérios, os recíprocos dos valores acima de zero são inseridos na matriz criada quando uma comparação entre duas atividades já foi realizada. O processo é robusto, porque diferenças sutis em uma hierarquia na prática não se tornam decisivas.

Deve-se fazer os julgamentos para completar a matriz de comparação, para isso, são necessários $n(n - 1) / 2$ julgamentos para uma matriz $n \times n$, sendo n o número de linhas e colunas. O analista ou grupo participante julga se A domina o elemento B. Se afirmativo, inserir o número na célula da linha de A com a coluna de B. A posição coluna A com linha B terá o valor recíproco. Assim prossegue-se o preenchimento da matriz, conforme Figura 3.

Figura 3 - Representação de uma matriz $n \times n$

Matriz A				
Iluminação	A	B	C	D
A	1	5	6	7
B	1/5	1	4	6
C	1/6	1/4	1	4
D	1/7	1/6	1/4	1

Fonte: Adaptado de PUC-Rio (2007).

As posições da diagonal são sempre 1, afinal, um elemento é igualmente importante para ele mesmo. Para preencher os outros elementos da matriz fora da diagonal, fazem-se os julgamentos e determina-se a intensidade de importância de acordo com a Tabela 1, que apresenta a escala de comparações empregadas no método. Para as comparações inversas, isto é, na parte inferior esquerda da matriz, colocam-se os valores recíprocos dos da parte superior direita.

Em seguida, é calculado o vetor de prioridades para cada nível da hierarquia por meio do cálculo dos autovalores e autovetores da matriz de comparação. Esses vetores de prioridades refletem as ponderações relativas dos elementos na hierarquia. Com base nesses resultados, é possível determinar a alternativa ou critério mais preferido.

O índice de consistência (IC) é calculado com base na equação 1.

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

O autovetor dá a ordem de prioridade e o autovalor é a medida de consistência do julgamento. O método da análise hierárquica busca o autovalor máximo, λ_{\max} , que pode ser calculado pela multiplicação da matriz de julgamentos A pelo vetor coluna de prioridades computado w , seguido da divisão desse novo vetor encontrado, Aw , pelo primeiro vetor w , chegando-se ao valor de λ_{\max} .

Cabe lembrar que $Aw = \lambda_{\max} w$ e, que no método da análise hierárquica, $Aw = \lambda_{\max} w$. Para o cálculo de λ_{\max} , utiliza-se a equação 2:

$$\lambda_{\max} = \text{média do vetor } \frac{Aw}{w} \quad (2)$$

Caso o índice de consistência for menor do que 0,1, então há consistência para prosseguir com os cálculos do AHP. Se for maior do que 0,1 recomenda-se que os julgamentos sejam refeitos até que a consistência aumente.

Saaty sugere o uso da Razão de Consistência, que considera o IC e o Índice Randômico (IR), que varia com o tamanho n da amostra, conforme equação 3.

$$\text{Razão de Consistência} = \frac{IC}{\text{Índice Randômico (IR) para } n} \quad (3)$$

A tabela com os índices randômicos (IR) de matrizes de ordem 1 a 8 calculados em laboratório, está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Índice randômico para matrizes quadradas de ordem n

RI - Índice Randômico Apropriado

n	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41

Fonte: Adaptado de SAATY (1977).

Com a teoria explicada, observa-se que o método AHP atende a esses critérios de processo de tomada de decisão, quebra um problema em subproblemas e depois agrega as soluções dos subproblemas em uma solução geral. Facilita a tomada de decisão ao organizar

percepções, sentimentos, julgamentos e memórias em uma estrutura que exhibe as forças influentes na decisão e que gera um resultado numérico e conclusivo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

João Monlevade localiza-se no Centro Leste de Minas Gerais, sob as coordenadas geográficas Latitude 19° 50' 10" S e Longitude 43 ° 07 ' 39 "W, distante cerca de 110 km da capital Belo Horizonte (Figura 4). Seu território é de 99,16 km² e sua população no último censo em 2022 foi de 80.187 habitantes, sendo 99% considerada urbana (IBGE, 2022). João Monlevade se situa a 21 km a Sudeste de Itabira e é vizinho dos municípios de Bela Vista de Minas, Itabira e São Gonçalo do Rio Abaixo e pertence à bacia hidrográfica do rio Doce e à sub-bacia do rio Piracicaba.

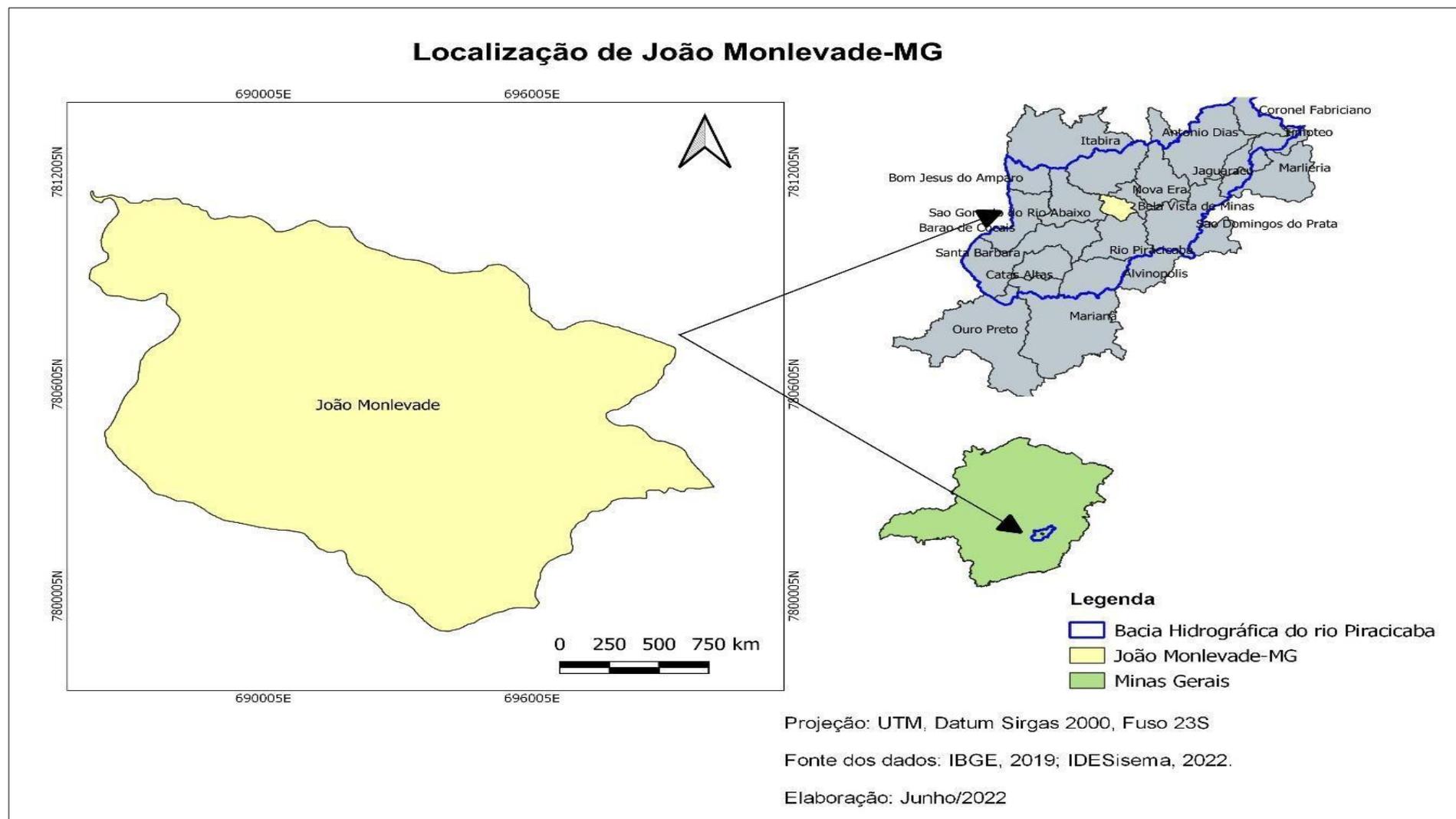
Possui 64 bairros que estão distribuídos nas sub-bacias dos córregos Carneirinhos, Jacuí e Santa Bárbara (Quadro 1). Estas sub-bacias possuem corpos d'águas de menores dimensões como o córrego Areão, Loanda, Metalúrgico e Tietê. O córrego Carneirinhos, situado no bairro de mesmo nome, está localizado na região centro comercial da cidade. Possui aproximadamente nove km de extensão e cerca de seis km são canalizados em galeria bicelular. O córrego nasce no bairro Encosta das Vertentes e deságua no rio Piracicaba, no bairro Capela Branca. Tem como cobertura as avenidas Gentil Bicalho e Wilson Alvarenga, uma das principais vias de acesso aos bairros da cidade, e, ao seu lado direito, a Av. Getúlio Vargas que é a mais antiga da cidade (FRANCO *et al.*, 2016).

Quadro 1- Unidades e regiões de Planejamento do município de João Monlevade, 2006.

REGIÕES	BAIRROS
Monlevade Centro Industrial	Baú, Areia Preta, Vila Tanque, Pedreira/Forninho, Jacuí, Tieté, Santa Cruz, Amazonas, Usina/Beira Rio, Egito.
Loanda	Metalúrgico, Laranjeiras, Belmonte, Loanda, José de Alencar.
Carneirinhos	Satélite, Lucília, São Geraldo, São Benedito, São João, José Elói, Mangabeiras, Rosário, Vale do Sol, Carneirinhos, Lourdes, Alvorada, Novo Horizonte, República, Aclimação, Nova Esperança, JK, São Jorge, Castelo, Nossa Senhora Conceição, Nossa Senhora Aparecida.
Santa Bárbara	Santa Bárbara, Ipiranga, Industrial, Recanto Paraíso, Pinheiro, Cidade Nova, Boa Vista, Chácara Coqueiros, Ponte Funda, Nova Cachoeirinha, Nova Aclimação, Paineiras, Vale da Serra.
Cruzeiro Celeste	Cruzeiro Celeste, Vera Cruz, ABM, Palmares, Promorar, Ernestina Graciana, São José, Sion, Campos Elíseos, Chácara Vale Verde, Tanquinho I e II, Petrópolis, Teresópolis, Santo Hipólito, Novo Cruzeiro, Santa Cecília, Monte Sagrado, Primeiro de Maio, Nova Monlevade, Corumbiara de Vanessa, Estrela Dalva.

Fonte: PMJM (2006).

Figura 4 - Localização da área de estudo



Fonte: Autora (2022).

Segundo Climate-data (2022), o clima de João Monlevade é quente e temperado e há muito mais pluviosidade no verão que no inverno. De acordo com a Köppen e Geiger a classificação do clima é Cwa - Clima mesotérmico, chuvas de verão e verões quentes. A temperatura média anual em João Monlevade é 20.4 °C e tem uma pluviosidade média anual de 1299 mm, distribuídas entre os meses mais chuvosos, que vão de outubro a março, conforme apresentado na Tabela 3. O mês de julho é o mês mais seco com média de 11 mm de precipitação e o mês de dezembro é o mês com maior precipitação, apresentando uma média de 275 mm. O mês mais quente do ano é fevereiro com uma temperatura média de 22.6 °C e a temperatura mais baixa de todo o ano é em julho, apresentando a média de 17.3 °C.

Tabela 3 - Dados climatológicos de João Monlevade-MG, conforme Climate-data, 2022.

	Temperatura média (°C)	Chuva (mm)	Umidade (%)	Dias Chuvosos (d)
Jan	22,4	213	76	13
Fev	22,6	131	73	10
Mar	22,0	154	78	12
Abr	20,8	71	77	9
Mai	18,6	36	74	5
Jun	17,7	14	73	3
Jul	17,3	11	70	2
Ago	18,3	16	63	3
Set	20,0	52	63	6
Out	21,4	94	66	9
Nov	21,2	232	77	14
Dez	21,9	275	80	16

Fonte: Adaptado de CLIMATE-DATA (2022).

A cidade experimentou um crescimento significativo ao longo dos anos, especialmente devido à sua localização estratégica na região central do estado. A expansão urbana de João Monlevade tem sido impulsionada por vários fatores. Um dos principais é o desenvolvimento industrial na região. A cidade abriga importantes empresas, incluindo usinas siderúrgicas e mineradoras, o que atraiu muitos trabalhadores e suas famílias para a área. Esse crescimento industrial gerou um aumento na demanda por moradias e serviços na cidade, o que impulsionou a chegada de várias construtoras e loteadoras.

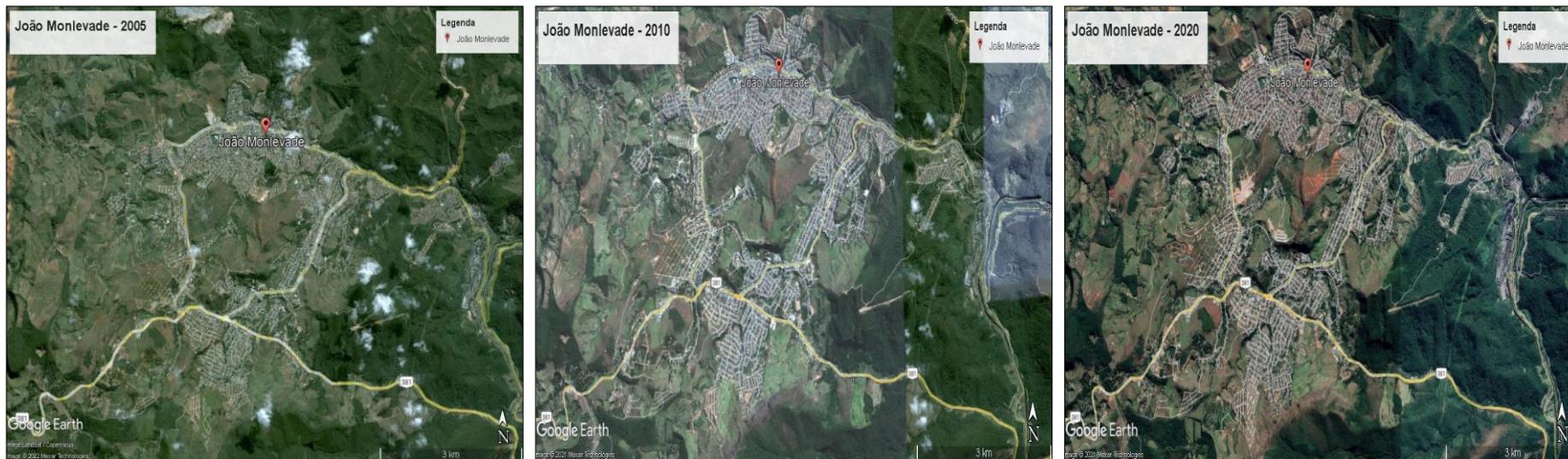
Com o crescimento da população, João Monlevade teve que se adaptar para atender às necessidades dos moradores. Foram construídos novos bairros residenciais, com a expansão de infraestruturas como: redes de água, esgoto, energia elétrica e transporte público.

No entanto, é importante ressaltar que o planejamento urbano é fundamental para garantir um crescimento ordenado e sustentável. O município deve considerar o equilíbrio

entre o desenvolvimento urbano e a preservação ambiental, bem como a oferta de serviços públicos adequados à crescente demanda da população.

A cidade se expandiu, com uma população de 73.610 habitantes em 2010, ocupando uma área de 99,158 km² para 80.187 habitantes no ano de 2022 (Figura 5). Apresenta uma densidade demográfica de 742,35 hab/km², pertencente à mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte (IBGE, 2022).

Figura 5 - Evolução da expansão urbana de João Monlevade-MG



Fonte: Adaptado de *Google Earth*, 2005, 2010 e 2020.

Próximo à área urbana há a presença da Reserva Particular do Patrimônio Natural - RPPN Monlevade com 518,70 ha de Mata Atlântica com transição de Cerrado, instituída pela Portaria nº 17 de 19/02/1993, cuja propriedade é CIA Siderúrgica Belgo Mineira, atual ArcelorMittal Monlevade (BRASIL, 2023).

O município de João Monlevade possui Plano Diretor instituído pela Lei Municipal nº 1686/2006 de 10 de outubro de 2006, sendo o principal instrumento de política urbana, orientando os agentes públicos e privados, abrangendo a totalidade do território do município e tem por finalidade propiciar o desenvolvimento das funções sociais da propriedade urbana e rural, o uso socialmente equilibrado do território do município e assegurar o bem estar dos munícipes.

Conforme art. 48 do Plano Diretor, o macrozoneamento do município divide o território de João Monlevade em conformidade com as vocações das áreas correspondentes e com os objetivos e estratégias descritas neste Plano Diretor. E o art. 49 cita as zonas da Macrozona Urbana, sendo:

- I – Zona de Uso Diversificado (ZUD);
- II – Zona Industrial e de Serviços Especiais (ZIS);
- III – Zona de Recuperação Ambiental (ZRA);
- IV – Zona de Preservação (ZP);
- V – Zona de Expansão Urbana (ZEU).

Por fim, o art 58 descreve que a Zona de Expansão Urbana (ZEU) é integrada por áreas não parceladas e apropriadas para assentamentos humanos, subdividindo-se, conforme o mapa constante do Anexo I, em:

I – Zona de Expansão Urbana 1 (ZEU 1) – áreas sujeitas ao enquadramento como ZUD 1;

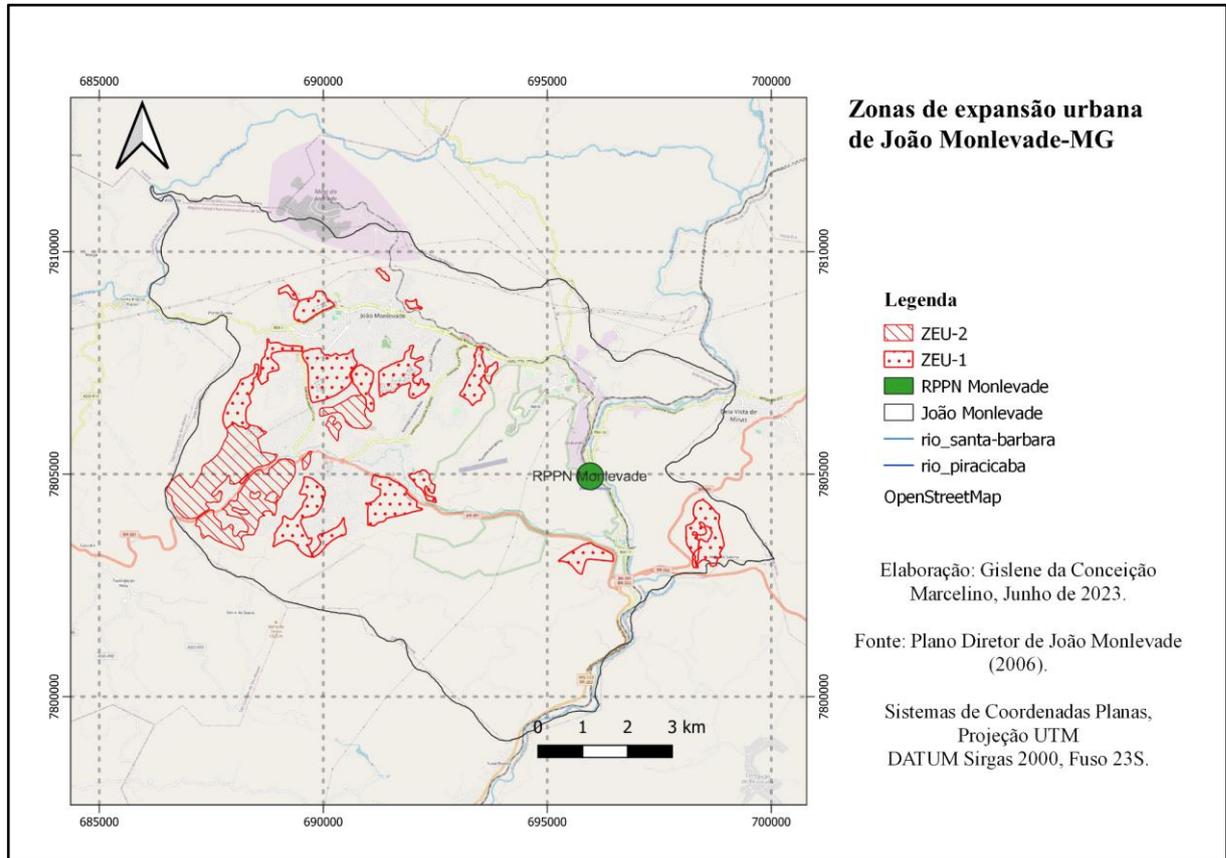
II – Zona de Expansão Urbana 2 (ZEU 2) – áreas sujeitas ao enquadramento como ZUD 2;

Parágrafo único. As áreas inseridas na Zona de Expansão Urbana que não sejam sujeitas a parcelamento, podem ser convertidas em Zona de Recuperação Ambiental ou Zona de Preservação.

Observando-se as zonas estabelecidas, percebe-se que as regiões de expansão urbana se concentram nas regiões Tanquinho I, Tanquinho II, Primeiro de Maio, Novo Cruzeiro, ABM, Vera Cruz, Teresópolis, Cidade Nova, Campo Alegre, Boa Vista, Nova Esperança,

Campos Elíseos, Loanda, Baú, São João e Serra do Egito, ou seja, nas regiões afastadas do centro, conforme Figura 6.

Figura 6 - Zonas de expansão urbana em João Monlevade-MG



Fonte: Autora (2023).

4.2 Metodologia

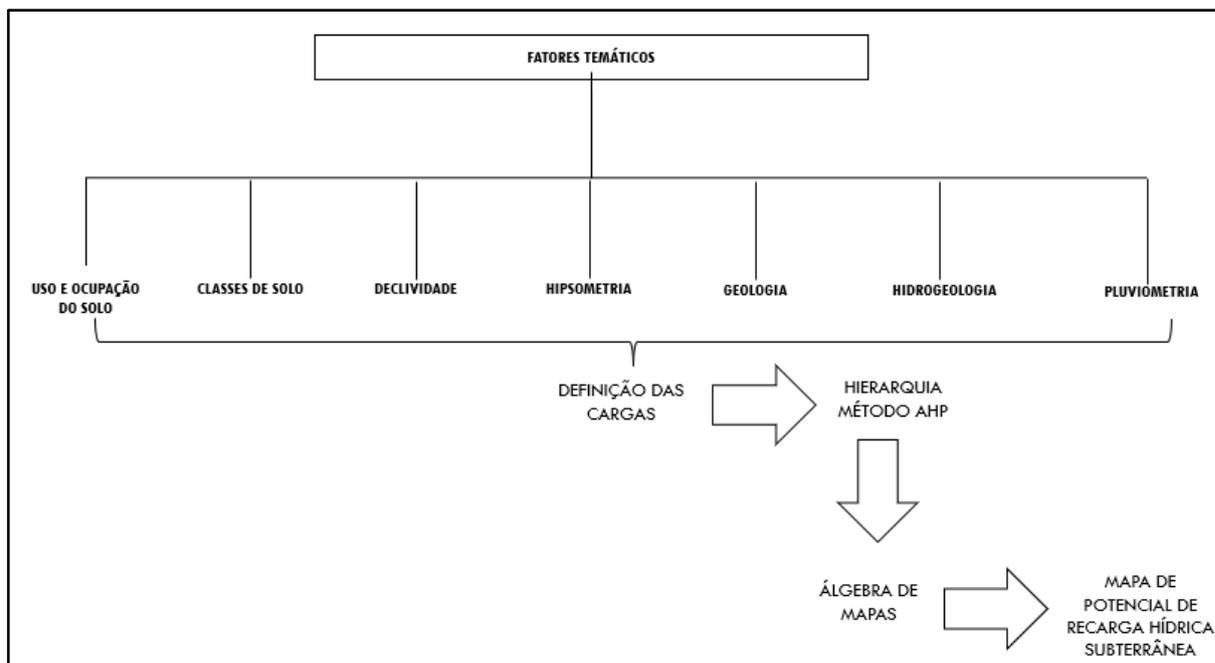
Esta etapa do trabalho consistiu na coleta de dados geospaciais, em formato vetorial e raster. A partir deles, foram elaborados os fatores temáticos utilizando classes específicas.

As áreas potenciais para recarga hídrica subterrânea na microbacia hidrográficas de João Monlevade, foram definidas a partir do cruzamento das classes entre os fatores temáticos, conforme metodologia adotada por Goepel (2018) e Limoeiro (2020). O peso de cada fator e classe foi determinado utilizando o método Processo Analítico Hierárquico (ou *Analytic Hierarchy Process* – AHP) proposto por Saaty (1977).

Neste estudo, foram levantados dados relativos como ocupação territorial, crescimento populacional, expansão da área urbana, caracterização quanto à aspectos de solo, relevo, vegetação, clima, geomorfologia, hidrologia, hidrogeologia, áreas de preservação permanente

e disponibilidade hídrica. Estes dados permitirão compreender todas as variáveis que definem e suas influências na recarga hídrica. As etapas propostas dessa pesquisa estão demonstradas no fluxograma a seguir (Figura 7):

Figura 7 - Fluxograma das etapas do estudo



Fonte: Autora (2022).

4.3 Processamento de dados

Para etapa de processamento, os dados adquiridos foram processados em plataforma SIG por meio do software livre QGIS, versão 3.10. Os passos utilizados para elaboração dos mapas temáticos estão descritos nos tópicos a seguir.

4.3.1 Mapeamento do uso e ocupação do solo

Utilizou-se o mapa a partir dos mosaicos da Coleção 6 do MapBiomias (1985 a 2020) que resultam nos mapas de cobertura e uso da terra para cada ano. Dentro da lógica proposta pelo MapBiomias os mapas são atualizados e a metodologia de classificação é dinâmica e processual, com a finalidade de aperfeiçoar a classificação de cada tipologia.

Para a geração do mapa de uso e ocupação do solo, procedeu-se com o download direto da Coleção 6 de Cobertura e Uso do Solo em formato GeoTiff do ano de 2020 fazendo o recorte para o município de João Monlevade-MG. Os dados foram processados e manipulados em um sistema de informação geográfica (SIG) por meio do programa Quantum Gis - QGis versão 3.10.

Após o download, procedeu-se com a reprojeção do raster para o sistema de coordenadas SIRGAS 2000, fuso 23 S e em seguida com a classificação conforme estilo do MapBiomias que apresenta o mapa já classificado, porém optou-se pela reclassificação em cinco categorias, conforme apresentado na Tabela 4.

Na tipologia de Floresta foram agrupadas: Formação Florestal; Formação Savânica; Mangue e Restinga Arborizada.

Na tipologia Formação Natural não Florestal foram agrupadas: Campo Alagado e Área Pantanosa; Formação Campestre; Apicum; Afloramento Rochoso e Outras Formações não Florestais.

Na tipologia Agropecuária foram agrupadas: Pastagem; Agricultura; Lavoura Temporária; Outras Lavouras Temporárias; Lavoura Perene; Outras Lavouras Perenes; Silvicultura e Mosaico de Agricultura e Pastagem.

Na tipologia Área não vegetada foram agrupadas: Praia, Duna e Areal; Área Urbanizada; Mineração e Outras Áreas não Vegetadas.

Na tipologia Corpo d'água foram agrupadas: Rio, Lago e Oceano e Aquicultura.

Tabela 4 - Reclassificação de tipologias de uso do solo

ID	Tipologia	Cor atribuída
1,3,4,5 e 49	Floresta	Verde escuro
10, 11,12, 13, 29 e 32	Formação Natural não Florestal	Verde claro
9, 14, 15, 18, 19, 20,21, 36, 39, 40,41, 46, 47 e 48	Agropecuária	Amarelo
22,23,24,25 e 30	Área não vegetada	Rosa
26, 31 e 33	Corpo d'água	Azul

Fonte: Adaptado de MAPBIOMAS (2020).

Após a reclassificação das tipologias do mapa, a tabela de dados foi extraída por meio da ferramenta de análise de dados raster, *reporta camada raster de valor único*, na barra de ferramentas do menu processar.

4.3.2 Mapeamento da declividade

Para o mapa de declividade foram empregados os dados altimétricos do Modelo Digital de Elevação (MDE), com uso da imagem do satélite *ALOS PALSAR*, com resolução espacial de 12,5 metros, da plataforma *Alaska Satellite Facility (EarthData)*. Utilizou-se a imagem do dia 16 de março de 2011, sendo a mais recente para a área de estudo, visto que o satélite em questão operou no período de 2006 a 2011. O limite da área de estudo foi recortado por meio do software *QGis 3.10*.

Para a elaboração desse mapa de declividade foi utilizado o menu *Raster*, e a partir das opções *Análise* e *Declividade*, foi calculada a porcentagem da declividade. O mapa de declividade gerado foi estratificado em classes, por meio da ferramenta *r.reclass* da ferramenta *Raster* no *Grass*, empregando-se as classes da Embrapa conforme o Quadro 2.

Quadro 2 - Classes de Relevô empregadas na elaboração do mapa de declividade

Classe	Declividade	Descrição da classe de relevô
Plano	(0 - 3%)	Superfície de topografia lisa ou horizontal, onde os desnivelamentos são muito pequenos.
Suave ondulado	(3 - 8%)	Superfície de topografia ligeiramente movimentada, constituída por conjunto de pequenas colinas ou outeiros, ou sucessão de pequenos vales pouco encaixados (rasos).
Ondulado	(8 - 20%)	Superfície de topografia relativamente movimentada, constituída por conjunto de medianas colinas e outeiros, ou por interflúvios de pendentes curtas, formadas por vales encaixados, configurando em todos os casos, pendentes ou encostas com declives maiores.
Forte Ondulado	(20 - 45%)	Superfície de topografia movimentada, com desniveis fortes, formadas por conjunto de outeiros ou morros, ou por superfície entrecortada por vales profundos, configurando encostas ou pendentes.
Montanhoso	(45 - 75%)	Superfície de topografia vigorosa, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos, montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes e declives fortes ou muito fortes.
Escarpado	(> 75%)	Áreas com predomínio de formas abruptas, compreendendo superfícies muito íngremes tais como: aparados, itaimbés, frentes de cuestras, falésias e vertentes de declives muito fortes.

Fonte: EMBRAPA (2018).

4.3.3 Mapeamento das classes de solos

Para identificação das classes de solo presentes na área de estudo foi utilizado o Novo Mapa de Solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Solos, na escala de 1:5.000.000, cujo plano de informação representa a distribuição geográfica dos solos do Brasil, de acordo com Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (CPRM, 2006), classificado até o terceiro nível categórico (SANTOS *et al.*, 2011). O limite da área de estudo foi recortado por meio do software QGis 3.10 e utilizou-se o estilo de cores com legenda padrão do mapa de solos do Brasil 1:5.000.000, arquivo compatível com o Sistema de Informação Geográfica (SIG) QGIS, padrão de cores baseado no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) e publicado em 2011.

4.3.4 Mapeamento de Hipsometria (Relevô)

Para a elaboração do mapa hipsométrico da área de estudo foram empregados os dados altimétricos do Modelo Digital de Elevação (MDE), com uso da imagem do satélite *ALOS PALSAR*, com resolução espacial de 12,5 metros, da plataforma Alaska Satellite Facility (*EarthData*). O limite da área de estudo foi recortado por meio do software *QGis 3.10*.

Também foi empregada a técnica de sombreamento com o fator de exagero igual a 3 e opacidade de 10% para melhor visualização das feições do relevo.

4.3.5 Mapeamento Geológico (litoestratigrafia)

A unidade litoestratigráfica é o elemento básico do mapa geológico e representa uma área na superfície da Terra onde ocorre um conjunto de rochas de mesma idade, formadas no mesmo evento. Para a construção do mapa geológico, foram utilizados dados da Bases de Dados do Sistema GeoSGB, o sistema de geociências do Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Na camada downloads as Cartas Geológicas do Brasil ao Milionésimo – GIS Brasil, Folha de Belo Horizonte, cujo código SE.23, na escala 1:1.000.000 do ano de 1999. O limite da área de estudo foi recortado por meio do software QGis 3.10 e utilizou-se o estilo de cores padrão do Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

4.3.6 Mapeamento Hidrogeológico

Para a construção do mapa hidrogeológico, foram utilizados dados da Bases de Dados do Sistema GeoSGB, o sistema de geociências do Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Na camada downloads, Levantamentos Hidrogeológicos, Cartas Hidrogeológicas do Brasil ao Milionésimo – Carta Hidrogeológica da Folha de Belo Horizonte, cujo código SE.23, na escala 1:1.000.000. O limite da área de estudo foi recortado por meio do software QGis 3.10 e utilizou-se o estilo de cores padrão do Serviço Hidrogeológico do Brasil – CPRM.

4.3.7 Mapeamento Pluviometria

Mapas de precipitação são produtos cartográficos que representam a intensidade de chuvas em determinada região. Para a construção do mapa pluviométrico, foram utilizados dados da Normais Climatológicas do Brasil, período 1991-2020, disponível no Portal do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. As normais publicadas são médias históricas compreendidas no período de 01 de janeiro de 1991 a 31 de dezembro de 2020, correspondentes a 271 estações meteorológicas de superfície do INMET, em operação naquele período (INMET, 2022). Como a planilha apresenta dados de diversas cidades do Brasil, foi feito o filtro para todos os municípios do estado de Minas Gerais e em seguida procedeu-se com a inserção do arquivo em formato .csv no QGis.

No processamento de dados, realizou-se o recorte para a área de estudo, que possui dados apenas de uma estação pluviométrica. Após, procedeu-se com a reclassificação do *raster* utilizando a função *r.reclass*.

4.4 Mapeamento de Potencial de recarga hídrica

A integração dos resultados da análise multicritério utilizando o método AHP, para a geração do mapa que representa o potencial de recarga hídrica de João Monlevade-MG, os fatores temáticos de uso e ocupação do solo, classes de solo, geologia, hidrogeologia e pluviometria foram convertidos para o formato raster pela ferramenta converter vetor para raster (rasterizar) do menu Raster - converter, com exceção dos temas de declividade e hipsometria que já se encontravam no formato raster que foram reclassificados, por meio da ferramenta reclassificar por tabela no menu Ferramentas, empregando as cargas definidas na revisão bibliográfica.

Posteriormente, foi utilizada a ferramenta Calculadora raster para elaboração do mapa final, foi utilizada a Álgebra de Mapas conforme adoção de cargas calculadas no método AHP e assim reclassificado em classes de potencial de recarga hídrica.

4.5 Construção da matriz de comparação e atribuição de pesos finais

Cada fator temático foi subdividido em classes e para cada classe foi atribuído um peso, referente a sua contribuição na recarga hídrica subterrânea, utilizando o método AHP. Primeiramente, organiza-se as classes em ordem hierárquica e após, comparação das classes duas a duas (análises paritárias) em uma matriz quadrada ($n \times n$), onde n é a quantidade de classes a serem comparadas.

A comparação é feita pelo próprio decisor a partir da importância relativa de uma classe sobre a outra. Após o preenchimento da matriz, calculou-se o autovetor das classes utilizando a média geométrica de cada linha.

Em seguida, a normalização de cada autovetor para uma escala de 100%, dividindo cada autovetor pela soma total destes, encontrando a importância de cada classe em porcentagem.

Por fim, calculou-se a coerência dos julgamentos a partir do índice de consistência (IC) e da razão de consistência (RC) desenvolvidos por Saaty (1977).

O valor aceitável para a razão de consistência é 0,1 ou 10%, valores inferiores a 0,1, refletem que não houve inconsistência nos pesos atribuídos aos julgamentos, e valores superiores indicam que os julgamentos realizados precisam ser reavaliados.

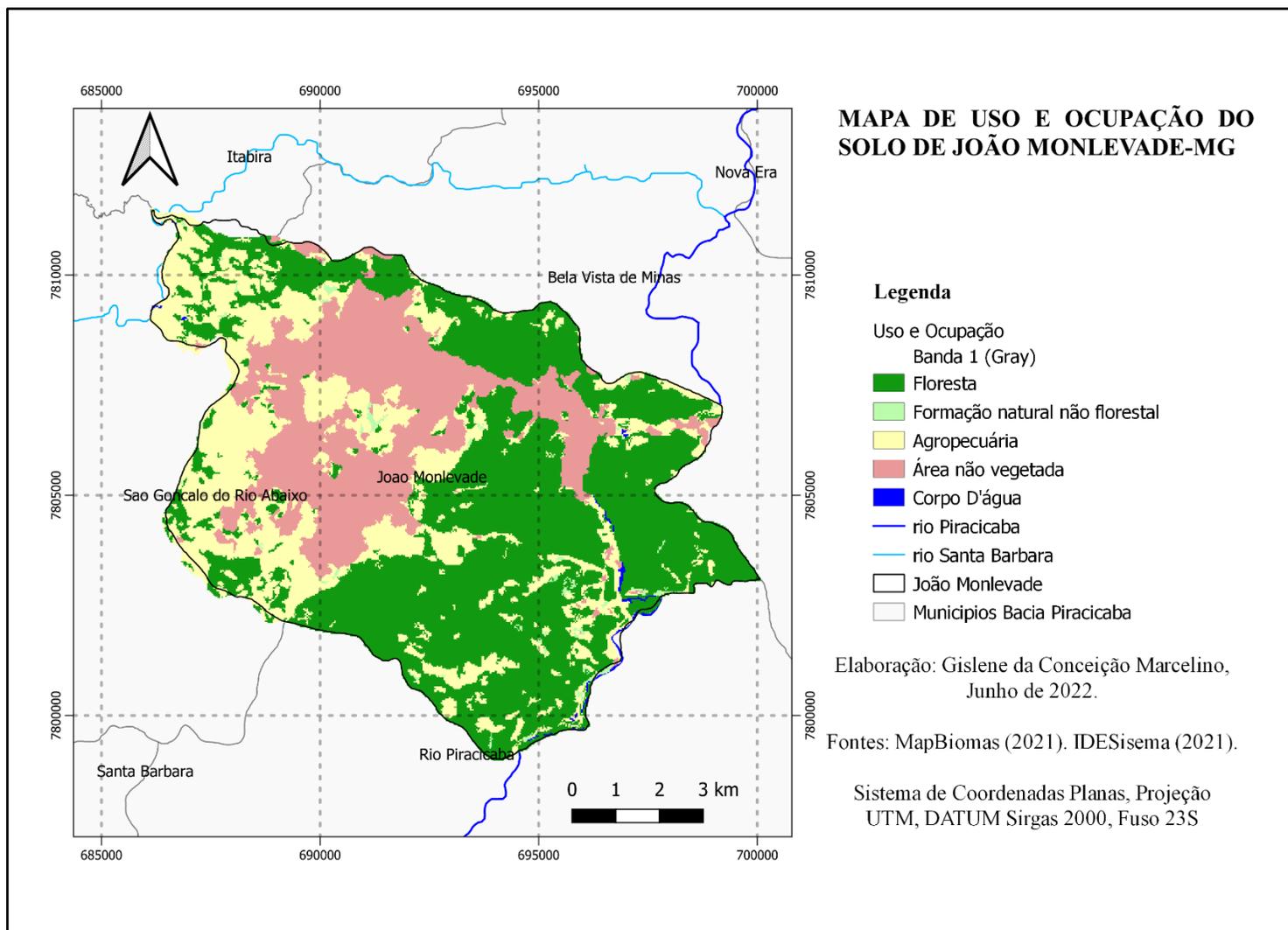
Vale ressaltar que a atribuição de cargas foi empregada tanto nos subcritérios (classes) e nos critérios (fatores) individualmente. O grau de importância, ou a carga atribuída no julgamento de cada fator temático, foi baseada em referências bibliográficas. Todos os cálculos para obtenção dos índices normalizados foram realizados através do software Microsoft Excel.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Mapeamento do uso e ocupação do solo

Para o uso e ocupação do solo foram determinadas cinco classes distintas, sendo nomeadas como: Floresta, Formação natural não florestal, Agropecuária, Área não vegetada e Corpo d'água. A Figura 8 apresenta o mapeamento do uso e ocupação do solo do município de João Monlevade-MG referente ao ano de 2020.

Figura 8 - Uso e Ocupação do solo do município de João Monlevade-MG



Fonte: Autora (2022).

Pode-se constatar um percentual significativo de Florestas, com 51,05%, ou seja, metade do território municipal. Isso ocorre devido ao zoneamento correspondente às Zonas de Preservação Ambiental, segundo o Plano Diretor do município de João Monlevade-MG, onde a ocupação urbana é proibida. A quantificação detalhada dos tipos de uso e ocupação encontradas podem ser visualizadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Quantitativo de área dos usos e ocupação do solo em João Monlevade- MG

TIPOLOGIA	ÁREA (KM²)	%
Floresta	51,08	51,05%
Formação Natural não Florestal	0,73	0,73%
Agropecuária	25,18	25,17%
Área não vegetada	22,83	22,82%
Corpo d'água	0,22	0,22%

Fonte: Autora (2022).

Com base nas características de cada classe de uso e ocupação em favorecer a infiltração da água, tomou-se uma ordem de hierarquização partindo da classe mais favorável a menos favorável na recarga dos aquíferos. Assim, foi considerada a seguinte ordem hierárquica: Floresta, Formação Natural não florestal, Agropecuária, Corpo d'água e Área não vegetada, conforme a Tabela 6, tendo como referência os trabalhos realizados por Limoeiro (2020) e Pereira (2020).

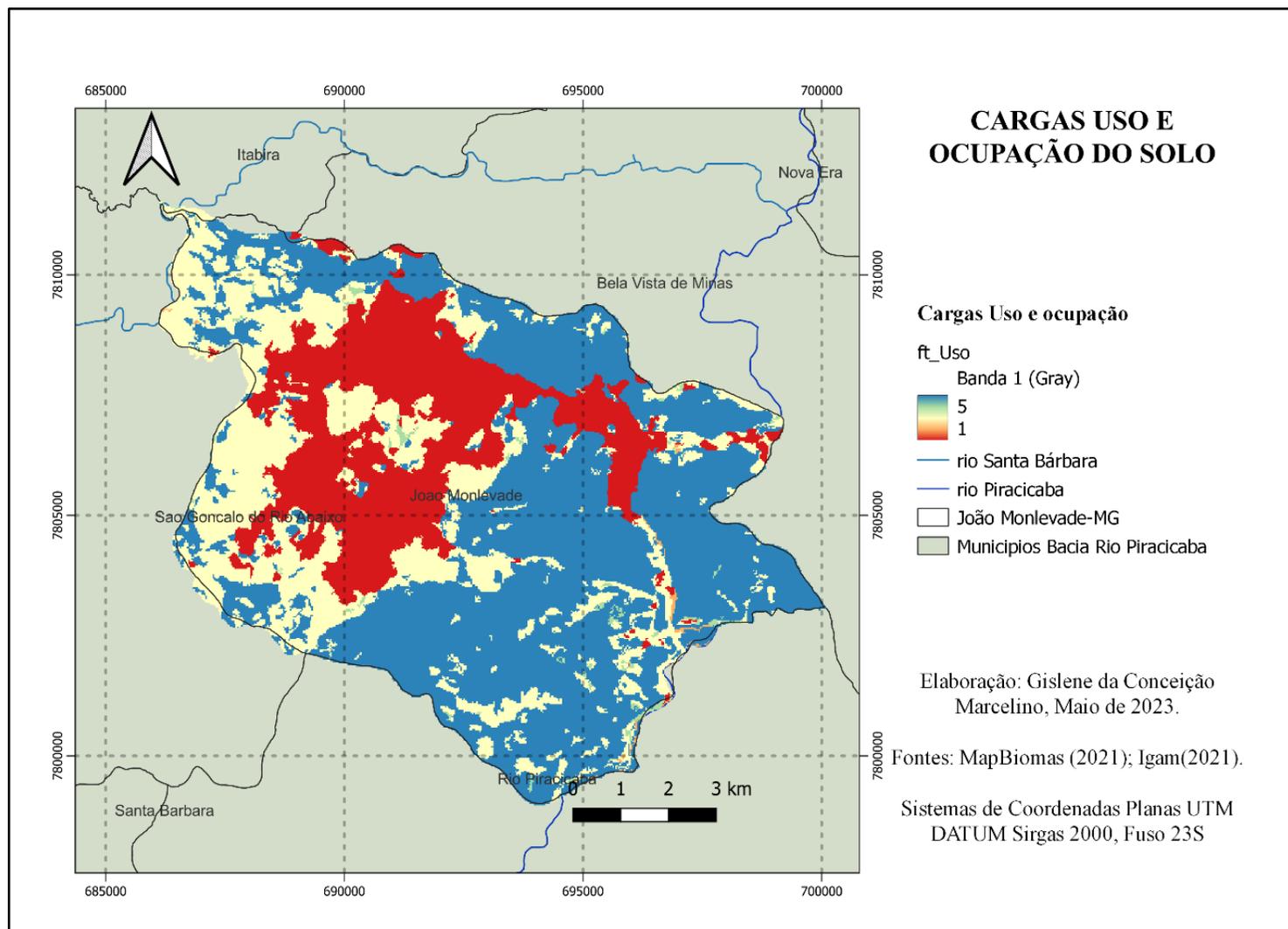
Tabela 6 – Cargas de uso e ocupação do solo quanto ao potencial de recarga.

TIPOLOGIA	POTENCIAL DE RECARGA	CARGA
Floresta	Muito alto	5
Formação Natural não Florestal	Alto	4
Agropecuária	Moderado	3
Área não vegetada	Muito baixo	1
Corpo d'água	*	2

Fonte: Adaptado de PEREIRA (2020); LIMOEIRO (2020).

A Figura 9 representa o mapeamento das cargas de uso e ocupação do solo.

Figura 9 - Cargas do Uso e Ocupação do Solo



Fonte: Autora (2023).

5.2 Mapa de declividade

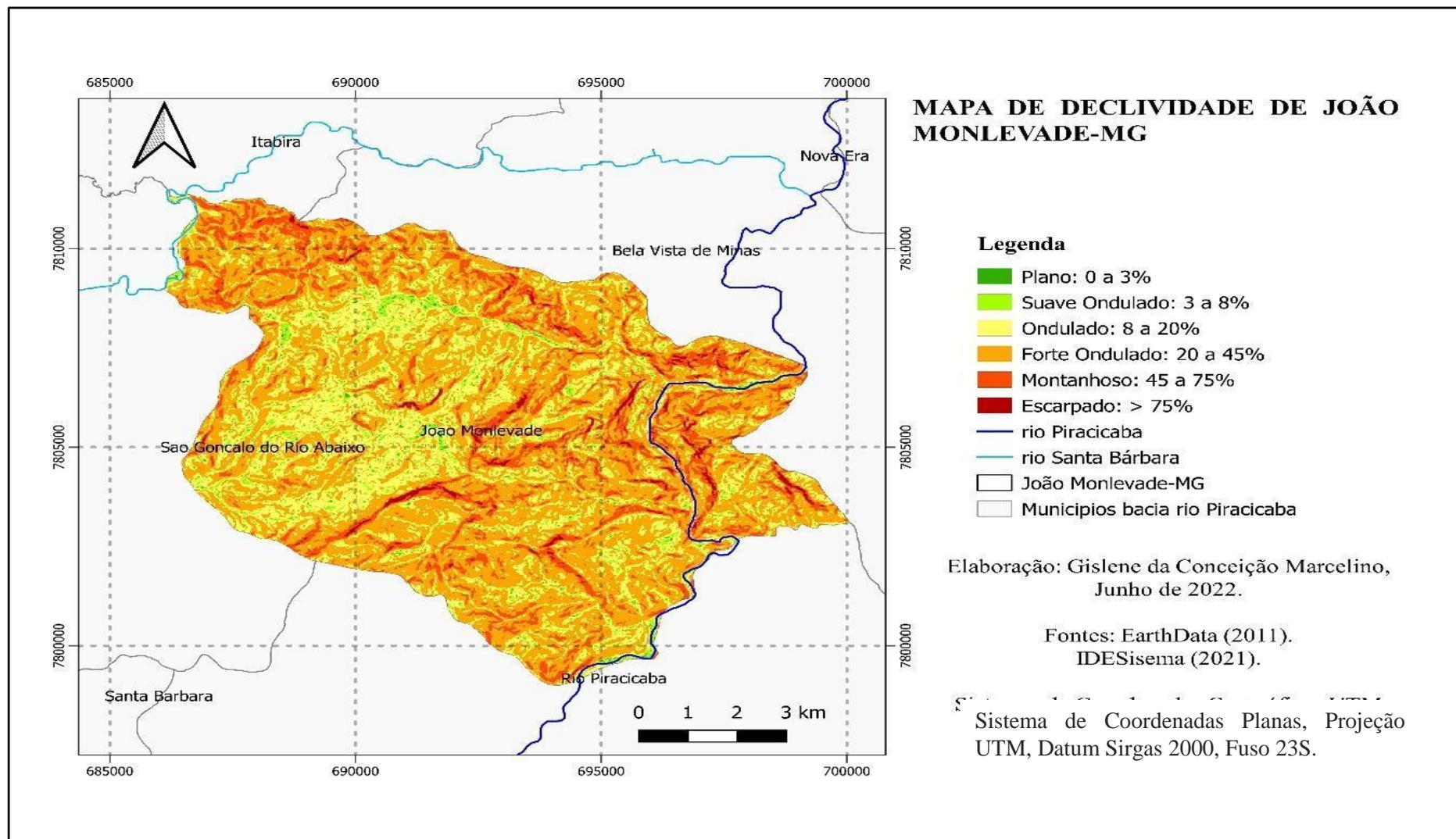
A declividade de João Monlevade-MG está representada na Figura 10, o relevo nas áreas planas a onduladas com a cor esverdeada, estão próximas aos cursos d'água e planícies em toda sua extensão. Já o relevo Ondulado a Montanhoso possui cores do amarelo ao alaranjado indicando as áreas íngremes e topos de morros.

As maiores taxas de recarga ocorrem nas regiões planas, bem arborizadas, e nos aquíferos livres. Nas regiões de relevo acidentado, sem cobertura vegetal, sujeitas a práticas de uso e ocupação que favorecem as enxurradas, a recarga ocorre mais lentamente e de maneira limitada (REBOUÇAS *et al.*, 2002 *apud* ABAS, 2021).

Um estudo realizado por Silva *et al.* (2019) intitulado como: Influência da expansão urbana aliada às características morfométricas nas ocorrências de inundações: estudo de caso no município de João Monlevade-MG, concluiu que a partir da análise das informações geradas pelo mapa de declividade, verificou-se que 9,6% do terreno da bacia é considerado plano; 2,78% suave-ondulado; 21,68% como ondulado; 42,41% forte ondulado; 18,92% montanhoso e 4,61% terreno escarpado.

Os mesmos autores acrescentaram ainda que a declividade média aproximada da bacia é de 32%, há predominância de terrenos enquadrados como forte ondulados, pois mais de 40% da área encontra-se nessa categoria e praticamente 82% da bacia possui declividade entre 8 e 75% (ondulado a montanhoso). Além disso, menos de 10% da área pode ser considerada como plana, que se localizam próximas aos cursos d'água, o que quer dizer que a declividade da bacia favorece o aumento da velocidade do escoamento superficial, dificultando o processo de infiltração da água no solo.

Figura 10 - Mapa de declividade de João Monlevade-MG.



Fonte: Autora (2022).

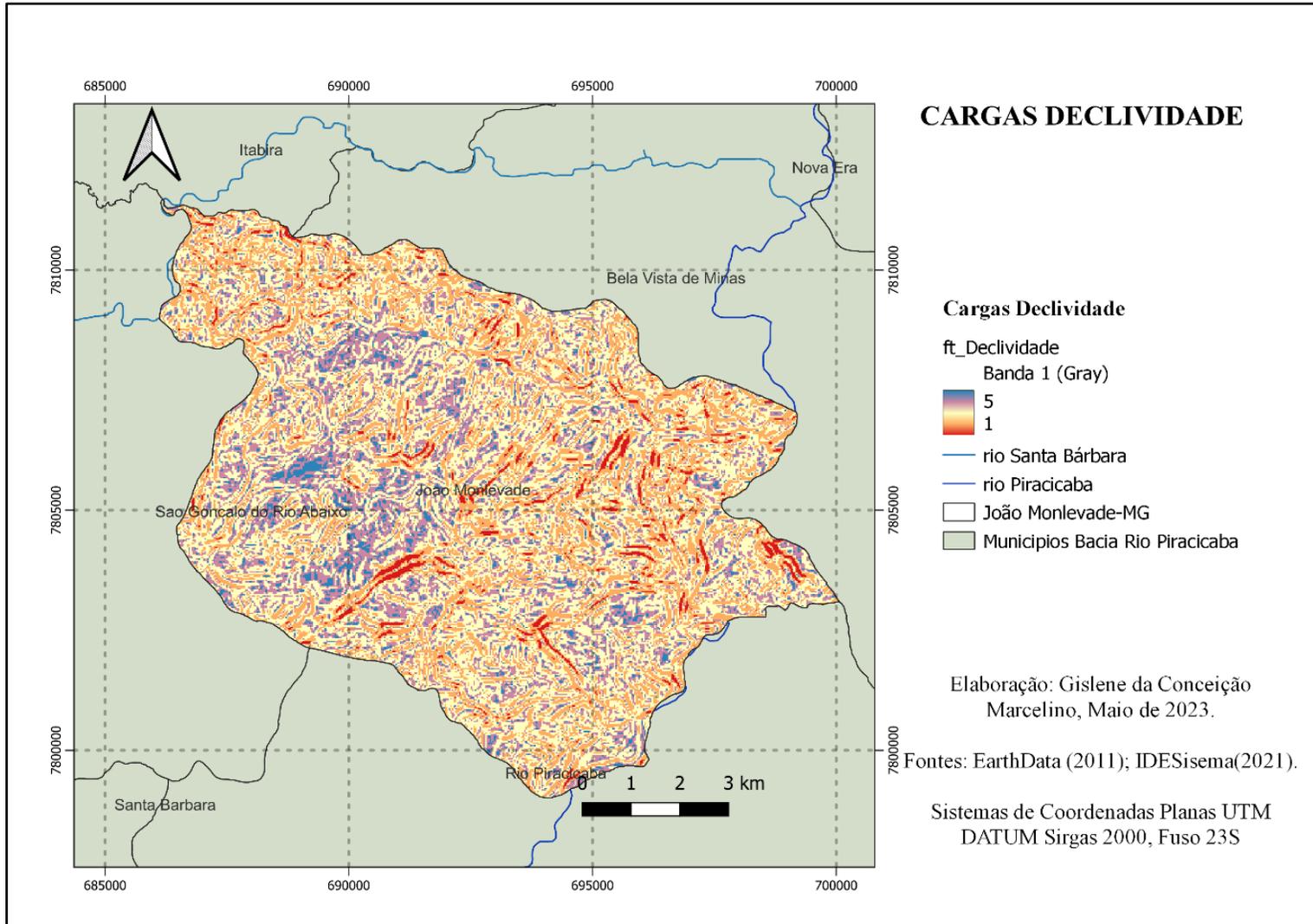
Ao potencial de recarga de aquíferos quanto à declividade foi atribuído valores de acordo com a altitude relativa e declividade, conforme Tabela 7, tendo em vista a influência dessas características na taxa máxima de entrada da água no solo e no fluxo vertical e lateral das águas subterrâneas. Utilizando a hierarquização de Pereira (2020), relevos mais planos foram considerados favoráveis a proporcionar a recarga de aquíferos, por outro lado, maiores declividades foram consideradas desfavoráveis, conforme Figura 11.

Tabela 7 - Cargas declividade quanto ao potencial de recarga.

TIPOLOGIA	POTENCIAL DE RECARGA	CARGA
Plano	Muito alto	5
Suave Ondulado	Alto	4
Ondulado	Moderado	3
Forte Ondulado	Baixo	2
Montanhoso	Muito baixo	1

Fonte: Adaptado de PEREIRA (2020).

Figura 11 - Cargas de Declividade.



Fonte: Autora (2023).

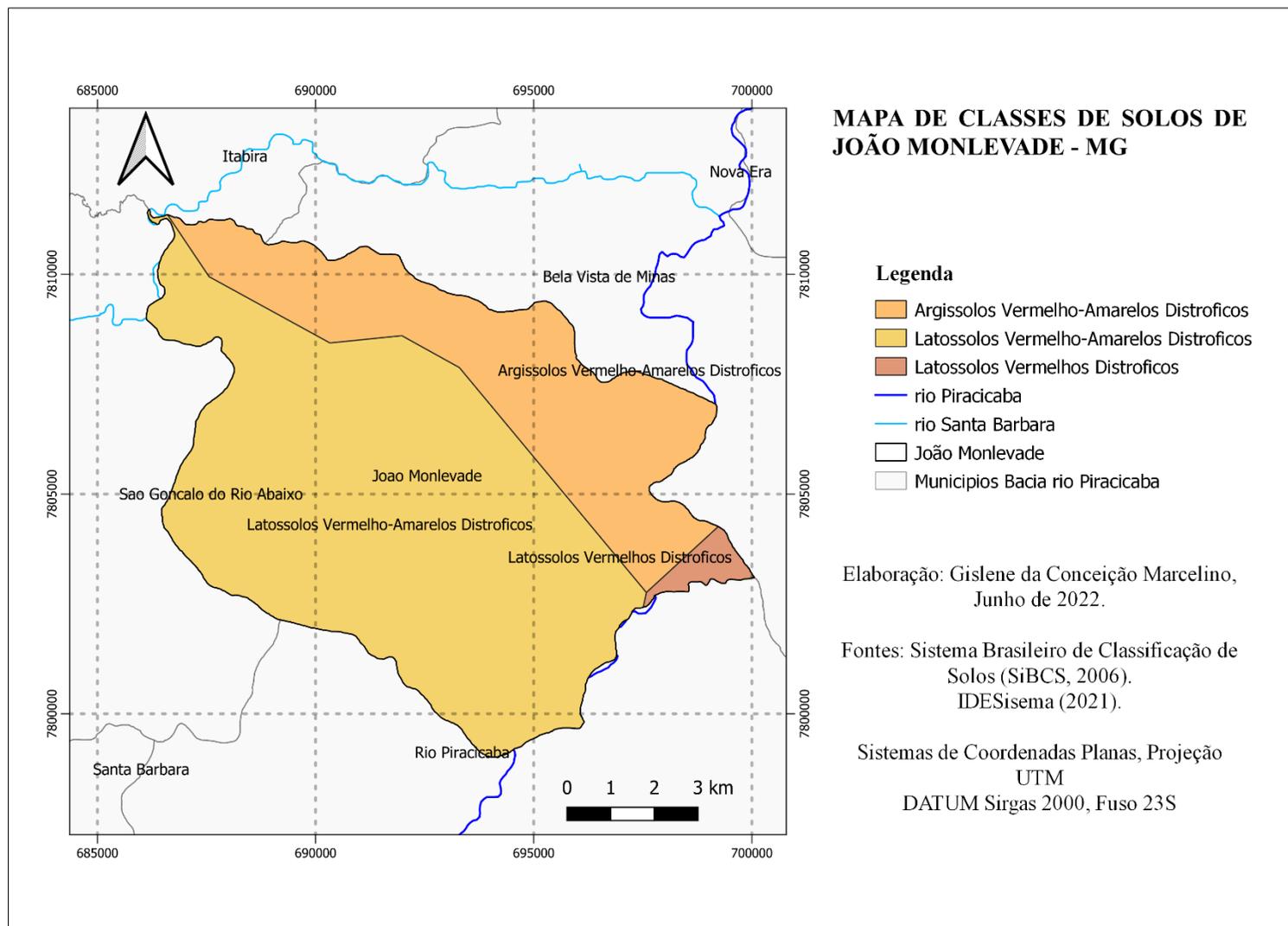
5.3 Mapeamento de Classes de Solo

As classes de solo do município de João Monlevade-MG estão representadas na Figura 12, formando um total de 3 tipos de solo: Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho e Argissolo Vermelho-Amarelo.

Os Latossolos Vermelho-Amarelo e Latossolo Vermelho estão presentes nas regiões planas ou suave onduladas, constituindo-se de solos profundos e bem drenados. Já os Argissolos Vermelho-Amarelos são solos caracterizados como profundos a pouco profundos e de bem a moderadamente drenados (AMARAL *et al.*, 2004 *apud* PEREIRA, 2016). Encontram-se em colinas e topos arredondados apresentando baixa condutividade hidráulica em horizontes inferiores devido a presença de argila (ENGEORPS, 2015 *apud* PEREIRA, 2016).

Os solos mais porosos e permeáveis, em geral com maior teor de areia, possuem altas taxas de infiltração. Enquanto solos mais finos e de menor porosidade, em geral com maior teor de argila, possuem menores taxas de infiltração. Além disso, a espessura do solo também importa, uma vez que tem a capacidade de reter temporariamente uma maior quantidade de água precipitada que posteriormente é liberada para o aquífero subjacente. Os Latossolos Vermelho e Vermelho-amarelo possuem, de forma geral, os maiores valores de condutividade hidráulica vertical, apresentando as melhores condições para recarga natural e artificial, sendo muito importantes para a produção hídrica (SERAPHIM e BEZERRA, 2019).

Figura 12 - Mapa de Classes de solo de João Monlevade – MG.



Fonte: Autora (2022).

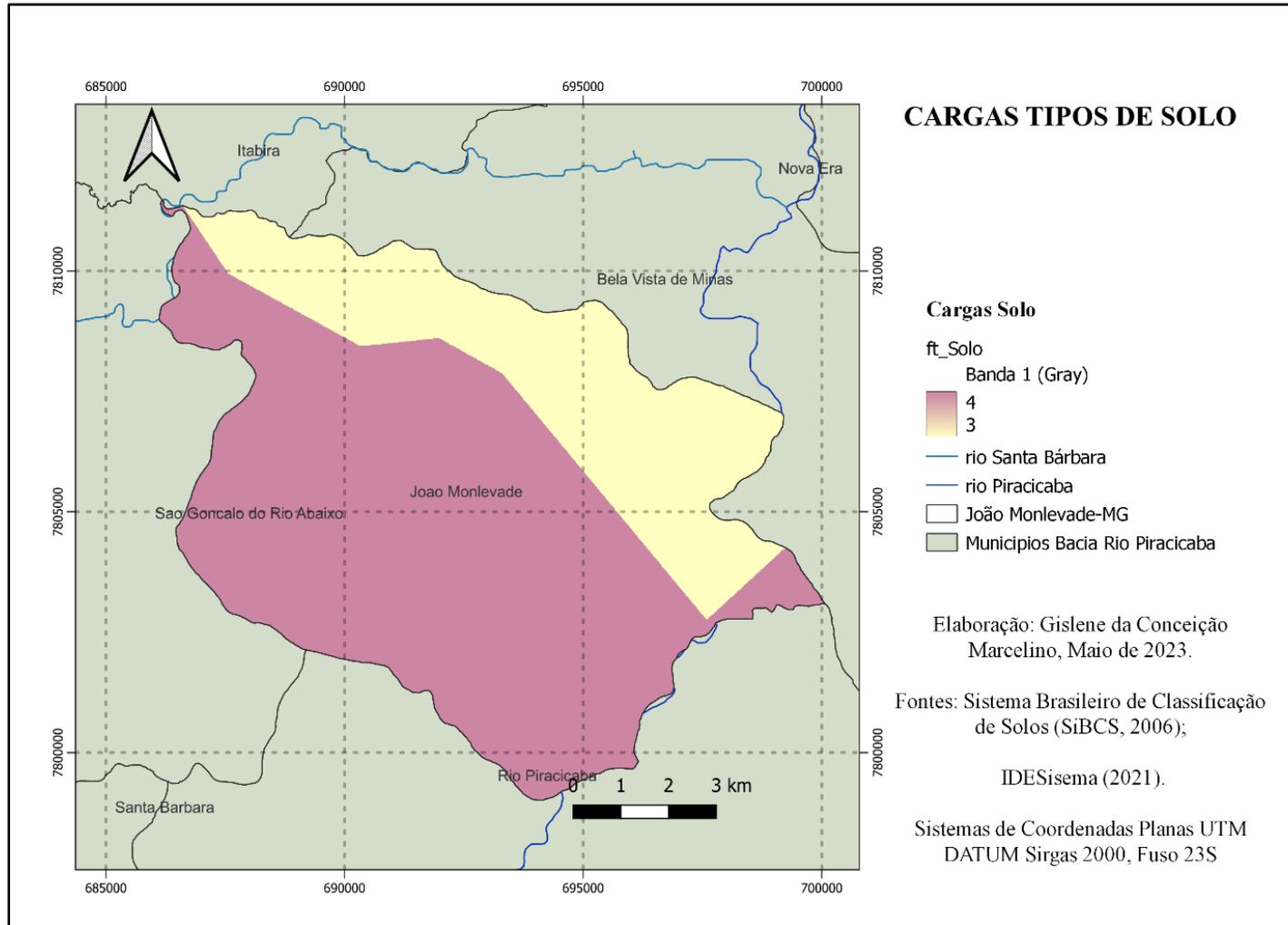
Para os tipos de solos foram atribuídos valores representativos do potencial de recarga com base em suas características hidrológicas, principalmente a condutividade hidráulica e espessura, tendo em vista a influência desses fatores na infiltração e na capacidade de armazenamento. Seguindo a caracterização acima, solos mais evoluídos, mais porosos e mais estruturados foram considerados mais favoráveis a infiltração, utilizando a hierarquização de Pereira (2020): Latossolos Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho, Argissolos Vermelho-Amarelo, conforme Tabela 8 e Figura 13.

Tabela 8 – Cargas dos tipos de solo.

TIPOLOGIA	POTENCIAL DE RECARGA	CARGA
Latossolo Vermelho-Amarelo	Alto	4
Latossolo Vermelho	Alto	4
Argissolo Vermelho-Amarelo	Moderado	3

Fonte: Adaptado de PEREIRA (2020).

Figura 13 - Cargas Classes de solos.



Fonte: Autora (2023).

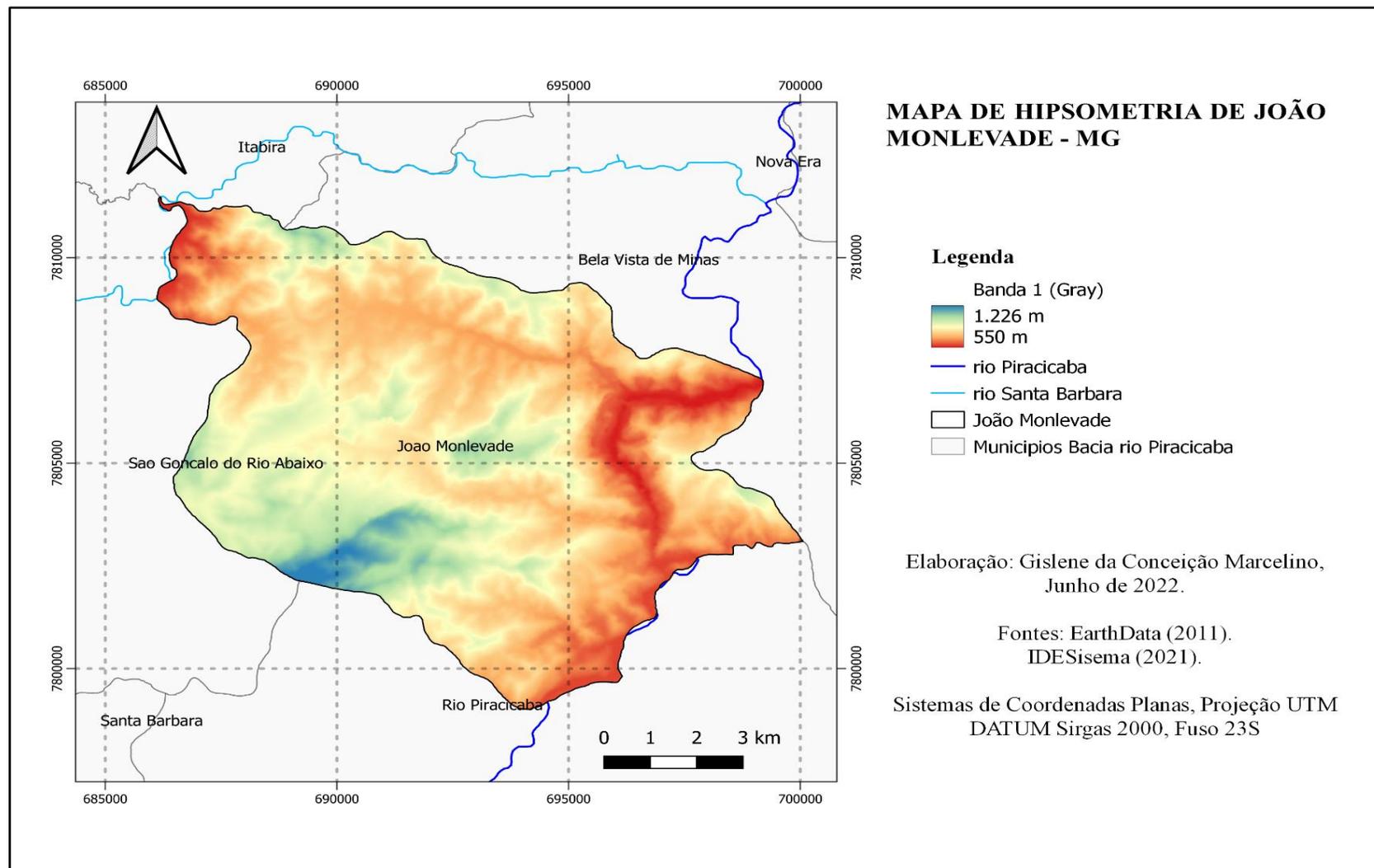
5.4 Mapa de Relevo

A recarga hídrica subterrânea não ocorre de forma homogênea no espaço, e os topos representam zonas preferenciais para o processo de infiltração, os quais tendem a alimentar as zonas mais profundas dos aquíferos (FELIPPE e MAGALHÃES JÚNIOR, 2009 *apud* LIMOEIRO, 2020). Então, pode-se inferir que as áreas de recarga hídrica subterrânea, estão associadas a regiões topograficamente elevadas.

A geomorfologia influencia a recarga por meio da: (1) altitude relativa e (2) declividade. O padrão do fluxo de movimento da água entre as áreas de recarga e descarga ocorre a partir da força da gravidade e pressão, normalmente de áreas mais elevadas para áreas menos elevadas, formando bacias hidrográficas subterrâneas, que acompanham o relevo do terreno (SIMMERS, 1987; *apud* SERAPHIM e BEZERRA 2019). Diante disso, os altos regionais são responsáveis por recargas dos aquíferos mais profundos, enquanto áreas baixas regionais, por recargas locais, que são logo descarregadas nos corpos hídricos superficiais (SILVEIRA; USUNOFF, 2009 *apud* SERAPHIM e BEZERRA 2019).

O mapa hipsométrico de João Monlevade-MG está representado na Figura 14.

Figura 14 - Mapa de Hipsometria (relevo) de João Monlevade-MG.



Fonte: Autora (2022).

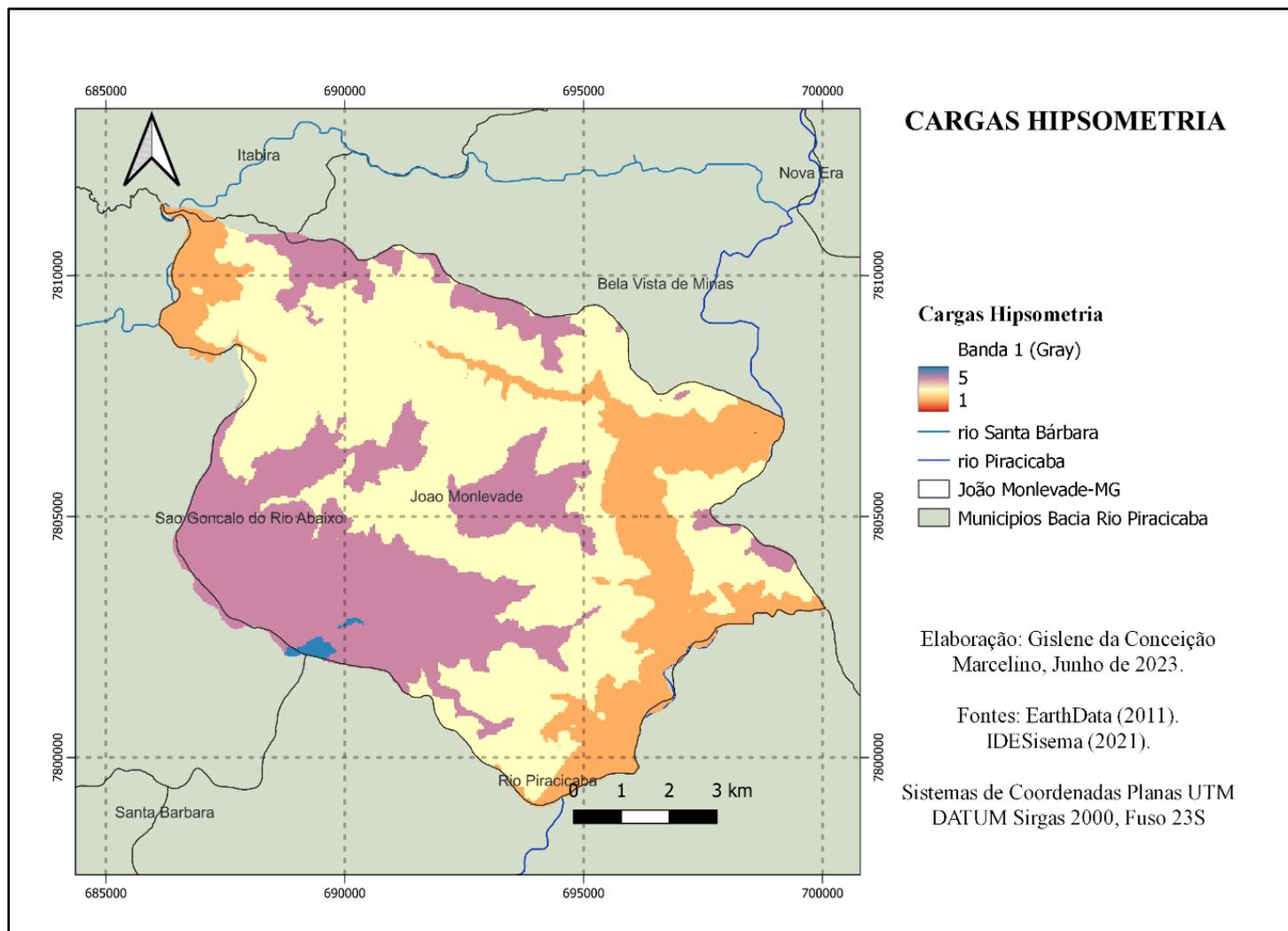
Em relação à altimetria, os topos representam zonas preferenciais para o processo de infiltração, assim utilizando a hierarquização de Limoeiro (2020), as cargas atribuídas estão descritas conforme a Tabela 9 e Figura 15.

Tabela 9 - Cargas de Hipsometria.

TIPOLOGIA	POTENCIAL DE RECARGA	CARGA
550 m	Baixo	2
719 m	Moderado	3
888 m	Alto	4
1057 m	Muito Alto	5
1226 m	Muito Alto	5

Fonte: Adaptado de LIMOEIRO (2020).

Figura 15 - Cargas de Hipsometria.



Fonte: Autora (2023).

5.5 Mapa de Geologia

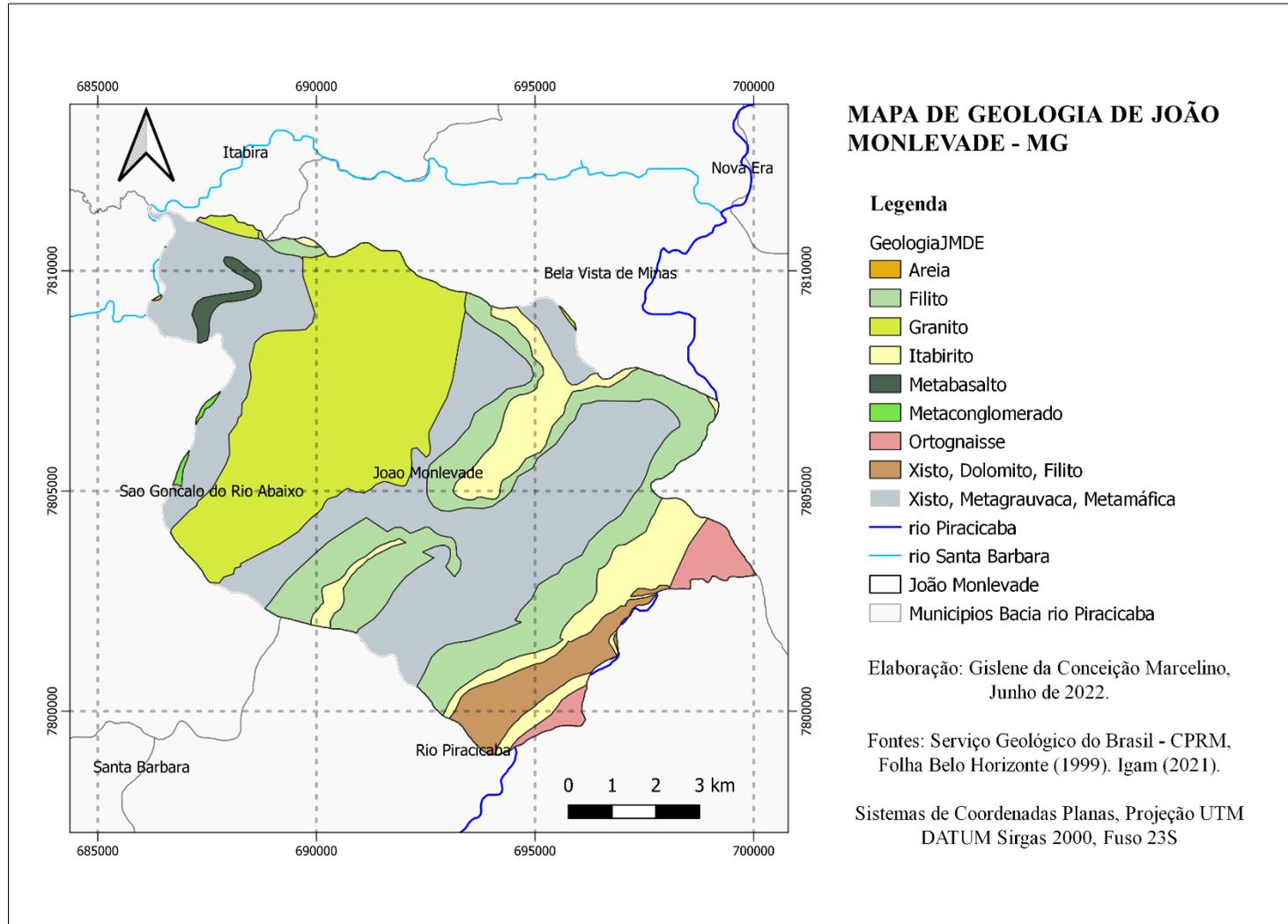
A formação geológica não apenas controla a percolação da água superficial, mas também determina predominantemente a capacidade de suporte de água e o movimento para o estrato subsuperficial (DAS *et al.* 2018 *apud* GOSH; SAHU, 2023).

Para Pereira (2020), entre os aspectos geológicos que favorecem o processo de infiltração das águas subterrâneas, evidenciam-se as características como porosidade, permeabilidade e condutividade hidráulica das rochas.

As litologias também apresentam potenciais diferentes para a produção de água em aquíferos fraturados e embora não seja consensual na literatura, normalmente considera-se que os gnaisses apresentam maior potencial hídrico, seguidos dos granitos e, depois, xistos (SINGHAL & GUPTA, 2010; FERNANDES *et al.*, 2016 *apud* BACELLAR *et al.*, 2020).

Foram encontradas 9 classes de formações geológicas para o município de João Monlevade, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Mapa de Geologia de João Monlevade-MG.



Fonte: Autora (2022).

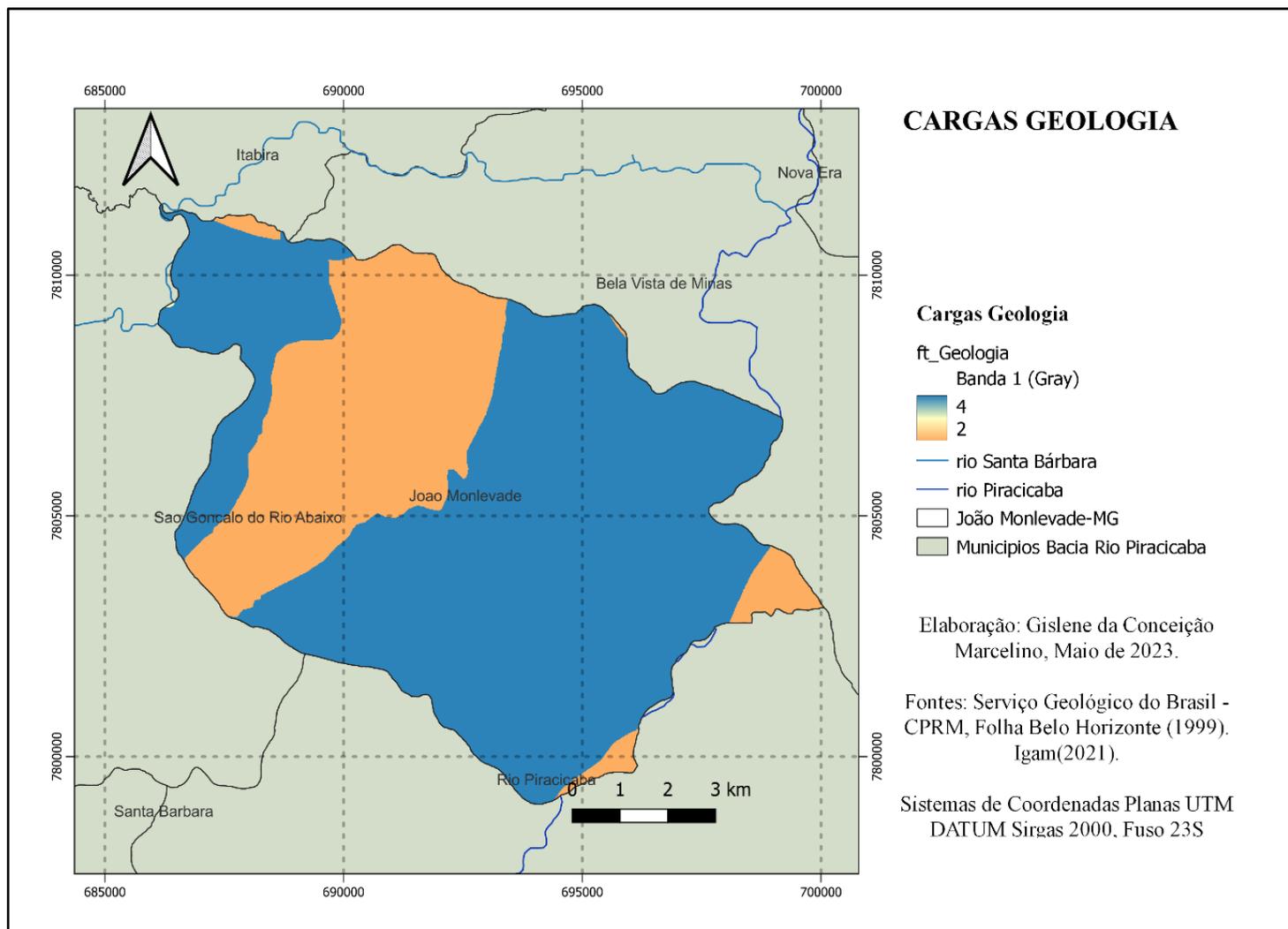
Fundamentado por Castro e Gonçalves, 2022 em um estudo de Quantificação do potencial hídrico subterrâneo do baixo curso do Rio Piracicaba (MG): Interação das águas subterrâneas e superficiais, foram atribuídos valores representativos do potencial de recarga com base em suas características geológicas, conforme a Tabela 10 e Figura 17.

Tabela 10 - Cargas dos aspectos geológicos.

TIPOLOGIA	POTENCIAL DE RECARGA	CARGA
Areia	Moderado	3
Filito	Alto	4
Granito	Baixo	2
Itabirito	Alto	4
Metabasalto	Alto	4
Metaconglomerado	Alto	4
Ortognaisse	Baixo	2
Xisto, Dolomito, Filito	Alto	4
Xisto, Metagrauvaca, Metamáfica	Alto	4

Fonte: Adaptado de CASTRO; GONÇALVES (2022).

Figura 17 - Cargas de Geologia.



Fonte: Autora (2023).

5.6 Mapa Hidrogeológico

Em relação aos domínios hidrogeológicos encontrados, João Monlevade apresenta em quase em sua totalidade inserida no domínio hidrogeológico metassedimentos-metavulcânicas, sendo o restante composto pelos domínios cristalino, vulcânicas e poroso/fissural.

Para Freitas *et al.* (2007), os melhores aquíferos estão localizados nos terrenos sedimentares, que ocupam 48% da área do Brasil. A presença de bacias sedimentares aliada a condições climáticas favoráveis denota grande potencial para a água subterrânea.

Os mesmos autores (2007) ainda consideram que, além dos principais sistemas aquíferos brasileiros, a contribuição dos terrenos cristalinos e outras unidades sedimentares, que totalizam cerca de 5,8 milhões de km², as reservas renováveis do país atingem 42.289,2 m³/s (1.333,6 km³/ano). O que corresponde a 24% do escoamento dos rios em território nacional e 49% da vazão de estiagem. A disponibilidade hídrica subterrânea total (reserva explotável) é considerada como 20% deste valor, 8.457,8 m³/s.

O domínio metassedimento/vulcânica apresenta litotipos relacionados ao aquífero fissural. Assim, a porosidade primária em rochas como xistos, filitos, metarenitos, metassiltitos e entre outras é quase nula, logo as características das condições hídricas subterrâneas são proporcionadas pela porosidade secundária da mesma forma como no cristalino. Porém, deve-se destacar apesar das similaridades o comportamento geológico é diferente entre os domínios, logo espera-se que maior potencialidade hidrogeológica neste domínio que no cristalino (BRASIL, 2009; BONFIM, 2010 *apud* PEREIRA, 2016).

No domínio cristalino, as rochas são constituídas basicamente de granitóides, gnaisses, granulitos, migmatitos, básicas e ultrabásicas, não havendo, portanto, uma porosidade primária, sendo a ocorrência de água subterrâneas proporcionada por uma porosidade secundária representada por fraturas e fendas. De maneira geral, os reservatórios neste domínio são aleatórios, descontínuos e com pequena extensão, além das vazões produzidas por poços serem pequenas e as águas serem salinas (BRASIL, 2009; BONFIM, 2010; PEREIRA, 2016).

De modo geral, as rochas sedimentares, representadas pelo sistema de aquífero granular, favorecem os processos de recarga hídrica subterrânea devido à boa porosidade desses litotipos. Contrariamente, as rochas carbonáticas e cristalinas, representadas pelo sistema de aquífero cárstico e fissural respectivamente, rochas de baixa porosidade natural,

reduzem drasticamente o potencial de recarga hídrica (MELO NETO *et al.*, 2013 *apud* LIMOEIRO, 2020).

Por fim, o domínio poroso/fissural apresenta uma potencialidade hidrogeológica entre baixa e média devido a sua porosidade primária baixa/média e porosidade secundária acentuada, atribuídas a litologias arenosas com pelitos e carbonatos no geral subordinados com características de litificação avançada, forte compactado e fraturamento acentuado (BONFIM, 2010 *apud* PEREIRA, 2016).

O mapa hidrogeológico de João Monlevade-MG está representado na Figura 18. O Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil, feito em escala 1:2.500.000 de 2007 *apud* Pechta e Vasconcelos (2018) em um estudo de indicadores para o uso de águas subterrâneas no Brasil, propõe 7 Domínios Hidrogeológicos, a saber:

1. Formações Cenozóicas (aquífero poroso): apresentam porosidade primária, com elevada permeabilidade nos terrenos arenosos. Podem ser produzidas vazões significativas nos poços tubulares perfurados dessas unidades de acordo com a espessura e da proporção de areia e argila dessas unidades. É comum que os poços localizados neste domínio, captem água dos aquíferos subjacentes.

2. Bacias Sedimentares (aquífero poroso): os poços desse domínio têm alto potencial hídrico, e suas unidades possuem os maiores reservatórios de água subterrânea, devido à alta porosidade/permeabilidade de grande parte de suas litologias, permitindo a exploração de vazões significativas.

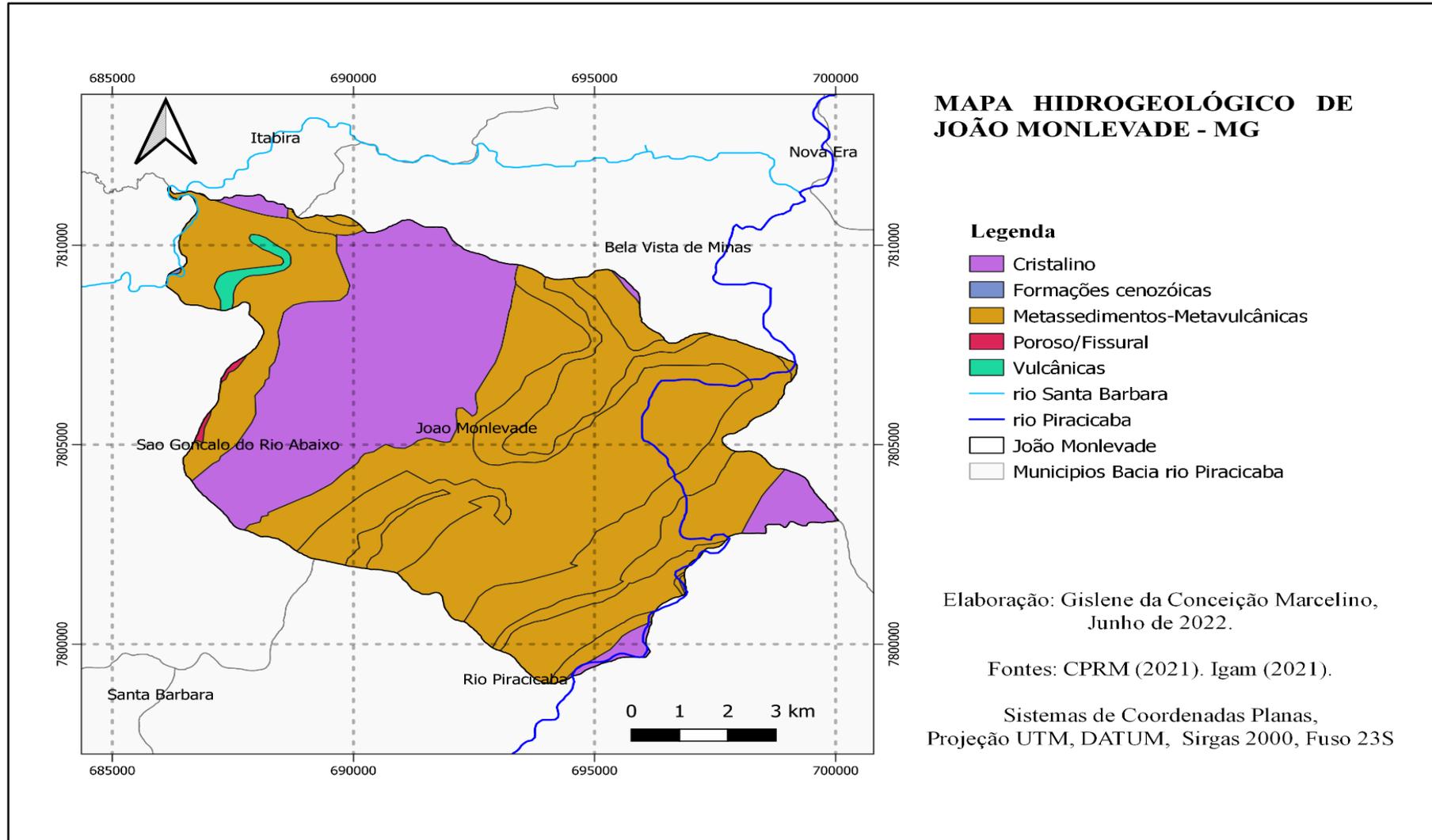
3. Poroso/Fissural (aquífero misto): apresenta tanto comportamento de aquífero granular (com porosidade primária baixa/média) quanto comportamento fissural acentuado (porosidade secundária de fendas e fraturas), conferindo-lhe baixo a médio potencial hidrogeológico.

4. Metassedimentos/Metavulcânicas (aquífero fissural): ocorrência de água subterrânea é condicionada principalmente por uma porosidade secundária com reservatórios aleatórios, descontínuos e de pequena extensão, implicando em vazões pequenas nos poços, com água geralmente salinizada. No entanto, deve ser esperada uma maior potencialidade hidrogeológica do que o esperado para o Cristalino.

5. Vulcânicas (aquífero fissural): de comportamento tipicamente fissural (porosidade secundária de fendas e fraturas), com alguma porosidade primária relacionada a estruturas vesiculares. Espera-se, portanto, um potencial hidrogeológico mais elevado do que o ocorrente no domínio anterior.

6. Cristalino (aquífero fissural): ocorrência de água subterrânea é condicionada predominantemente por uma porosidade secundária (fraturas e fendas), ocasionando reservatórios aleatórios, descontínuos e de pequena extensão, produzindo baixas vazões em poços e, geralmente, com água salinizada. Dentre os aquíferos fissurais, tende a ser o domínio de menor potencial hidrogeológico.

Figura 18 - Mapa Hidrogeológico de João Monlevade-MG.



Fonte: Autora (2022).

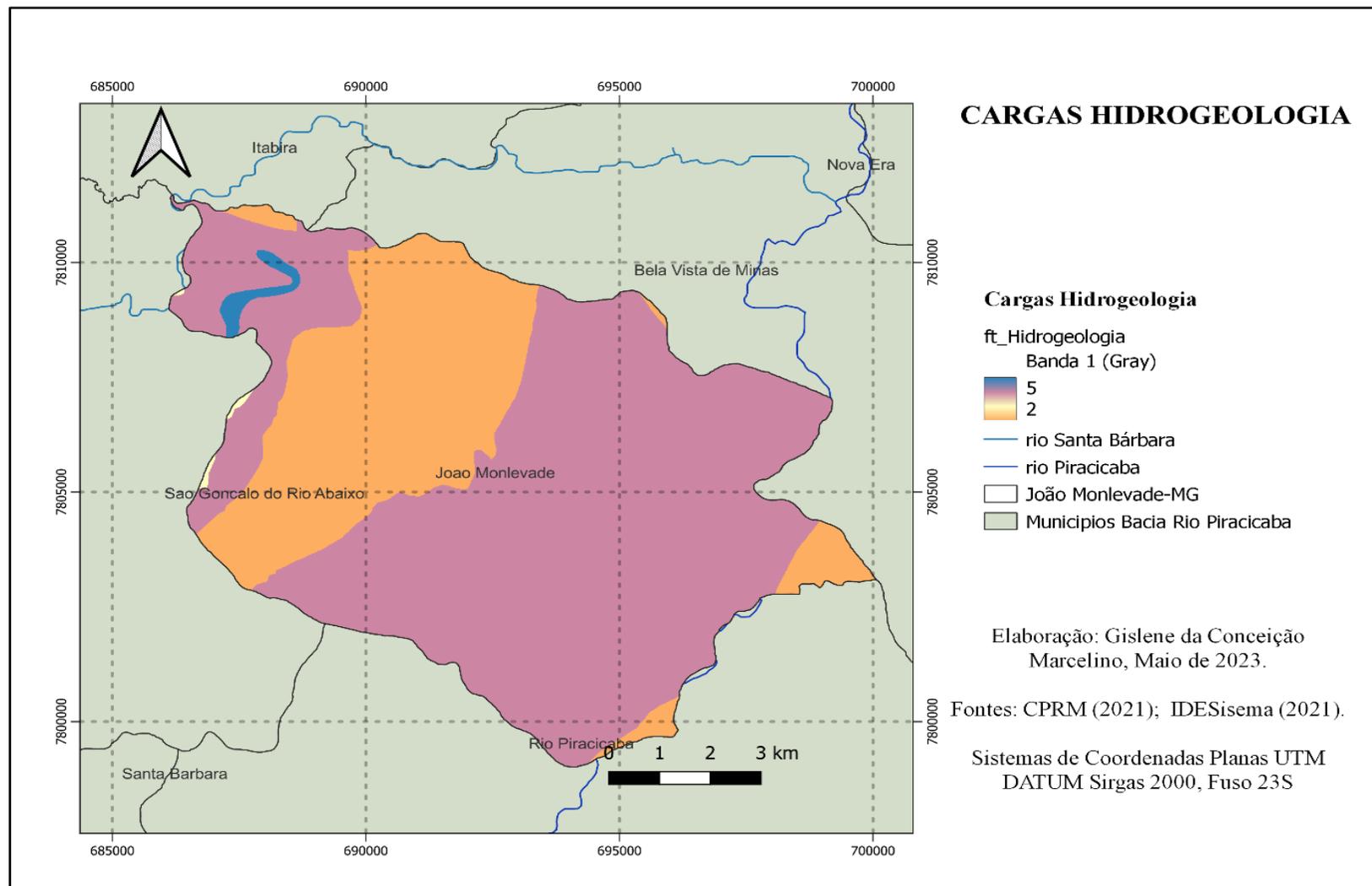
Neste sentido, foram atribuídos valores representativos do potencial de recarga com base em suas características, tendo em vista a influência desses fatores, conforme Tabela 11 e Figura 19.

Tabela 11 – Cargas dos aspectos hidrogeológicos.

TIPOLOGIA	POTENCIAL DE RECARGA	CARGA
Cristalino	Baixo	2
Formações cenozóicas	Moderado	3
Metassedimentos-metavulcânicas	Alto	4
Poroso-Fissural	Moderado	3
Vulcânicas	Muito Alto	5

Fonte: Adaptado de PECHTA; VASCONCELOS (2018).

Figura 19 - Cargas Hidrogeologia



Fonte: Autora (2023).

5.7 Mapa de Pluviometria

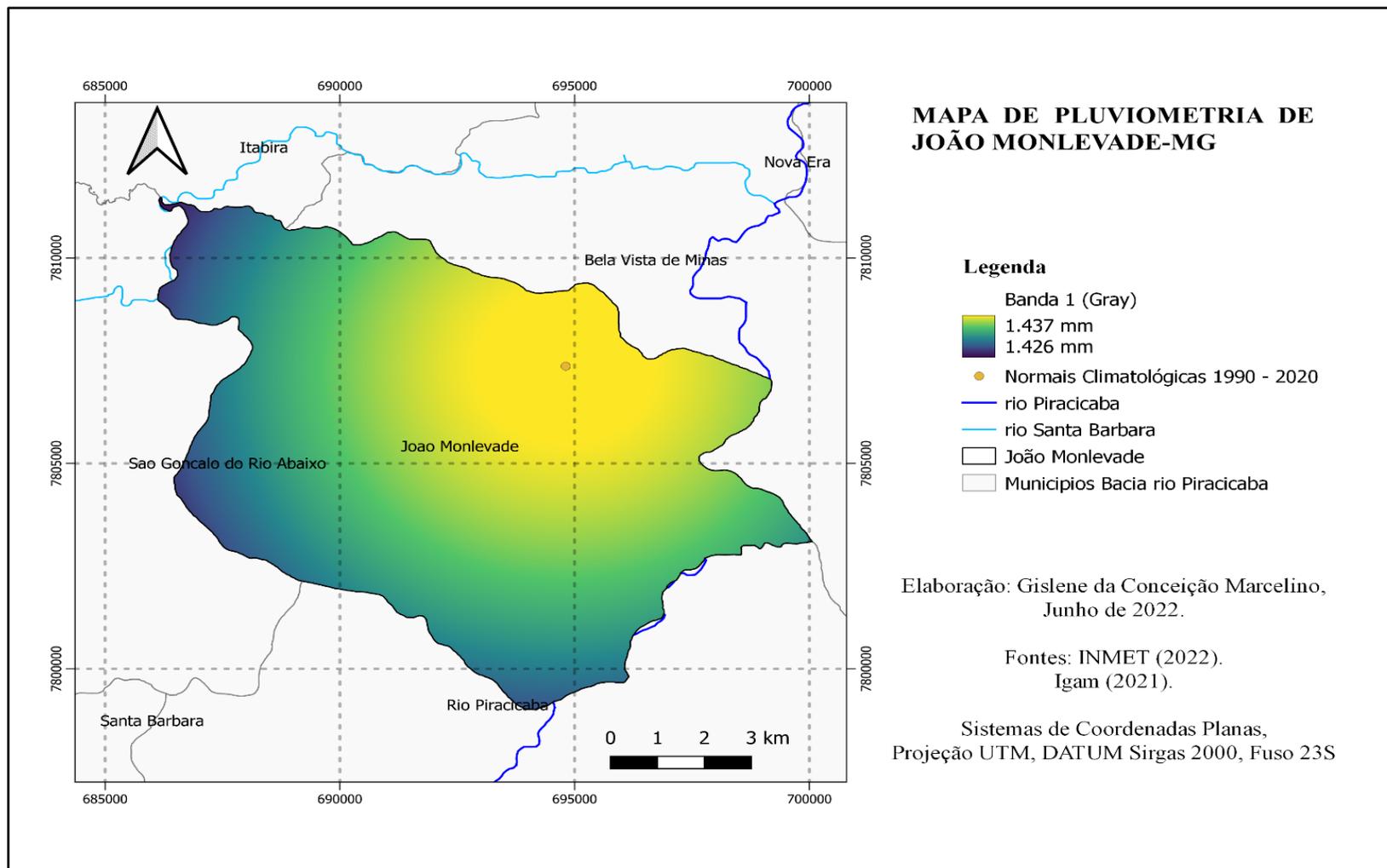
A fim de melhorar a compreensão da dinâmica climática de João Monlevade-MG, obteve-se os resultados da interpolação dos dados pluviométricos dos municípios mineiros, posterior recorte para a área de estudo, conforme representado na Figura 20.

Em condições naturais, o total da água precipitada que infiltra no solo em direção aos aquíferos, livres ou confinados, depende principalmente dos seguintes fatores: topografia; altura, intensidade e duração da chuva; capacidade de campo, umidade antecedente e propriedades hidráulicas do solo (BEAR, 2007; MOTA, 1981; SIMMERS, 1987 apud SERAPHIM e BEZERRA 2019). Esses fatores supracitados estão relacionados com o clima; a geomorfologia; e a pedologia.

Acrescenta ainda que chuvas menos intensas, regularmente distribuídas ao longo do tempo, promovem uma infiltração maior, pois a velocidade de infiltração pode acompanhar a altura de precipitação gerada, enquanto chuvas torrenciais favorecem o escoamento superficial direto. A duração das chuvas também é relevante, já que a taxa de infiltração da água no solo decresce quando o solo se encontra saturado (SERAPHIM e BEZERRA, 2019).

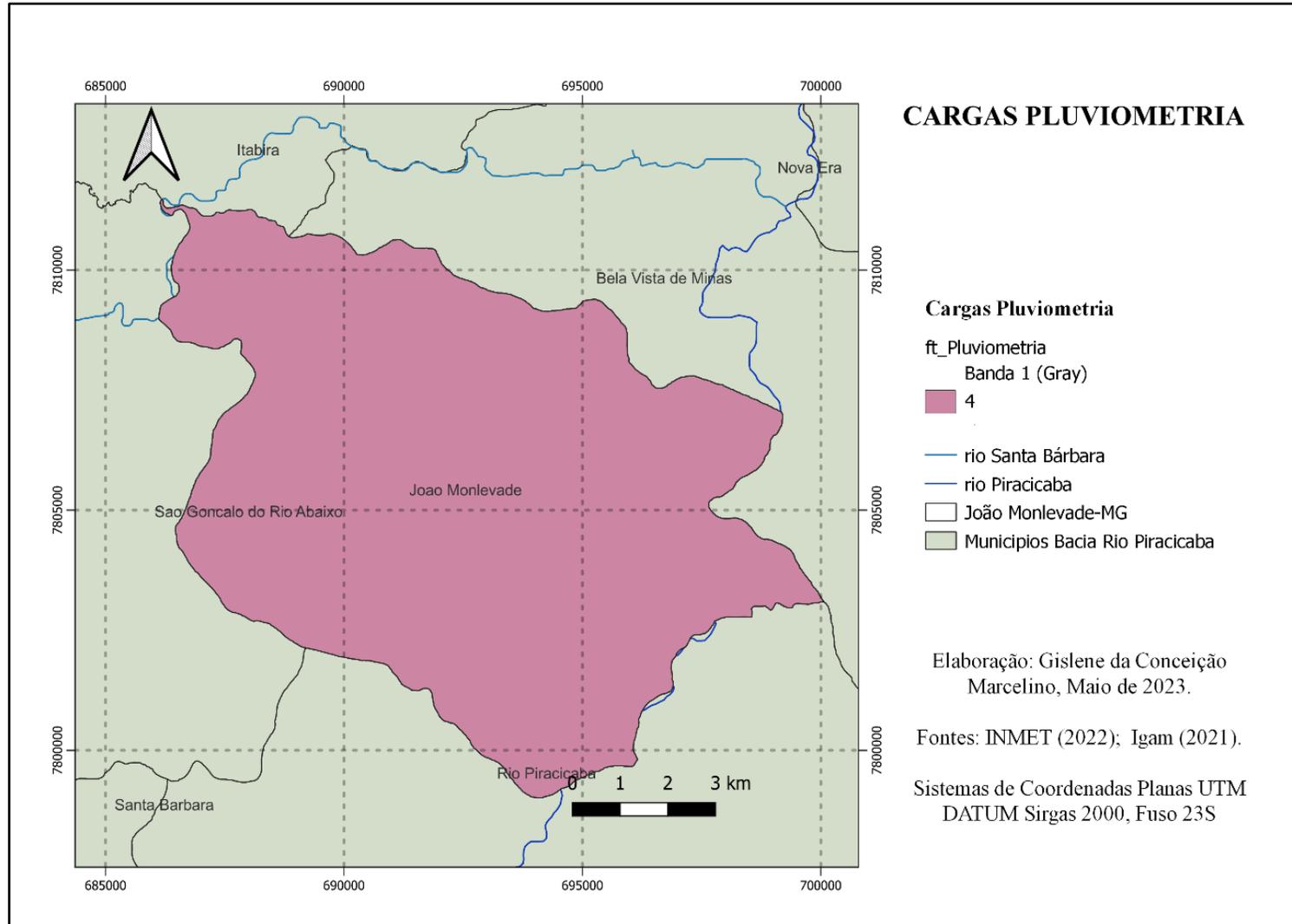
Como os dados da interpolação resultaram em cinco classes, porém com pouca variação, utilizou-se como base a atribuição de pesos da pesquisa de Limoeiro (2020) que atribuiu o fator alto para precipitações acima de 1000mm. Assim, como a precipitação média da área de estudo foi de 1426 mm, todo o mapa teve a carga 4 (quatro) atribuída, conforme Figura 21.

Figura 20 - Mapa de Pluviometria.



Fonte: Autora (2022).

Figura 21 - Carga de Pluviometria.



Fonte: Autora (2023).

5.8 Avaliação e ponderação dos mapas temáticos

Uma vez obtida a valoração entre as classes, a próxima etapa consistiu em determinar o peso referente a cada um dos fatores temáticos através do AHP, em que se estabeleceu uma hierarquização entre os fatores e as características destes em proporcionar a infiltração e a recarga dos aquíferos em menor ou maior facilidade.

Pereira (2020), entende que os processos de recarga de aquíferos iniciam-se através dos solos, portanto, é considerado o fator principal para potencialidade hídrica subterrânea de uma região. A geologia apresenta um papel preponderante na formação de aquíferos, assim como os solos, as características de porosidade e permeabilidade das rochas são fundamentais no armazenamento e transmissão das águas subterrâneas.

Para as características de uso e ocupação do solo e declividade foram consideradas que ambas possuem importâncias relativamente iguais quanto ao favorecimento na infiltração de água no subsolo. Solos que possuem boa cobertura vegetal tendem a reter maior quantidade de água, reduzindo a perda por escoamento superficial. Similarmente, regiões com relevos planos reduzem o escoamento da água, mantendo-a mais tempo no solo e criando condições melhores para a sua infiltração.

Desta forma, optou-se pela seguinte ordem decrescente de importância aos temas: hidrogeologia, geologia, classes de solos, pluviometria, declividade, uso e ocupação do solo e hipsometria, adotando-se a mesma valoração dos trabalhos de Pereira (2020), Limoeiro (2020).

Em seguida, foram atribuídas as importâncias para cada tema na matriz de comparação pareada, no qual as cargas obtidas pelo método AHP estão descritas na Tabela 12.

Tabela 12 - Matriz de comparação pareada para os fatores temáticos.

Matriz de comparação pareada para os fatores temáticos

	Hidrogeologia	Geologia	Classes de solo	Pluviometria	Declividade	Uso e ocupação	Hipsometria
<i>Hidrogeologia</i>	1	2	2	3	4	5	5
<i>Geologia</i>	1/2	1	2	3	3	2	5
<i>Classes de solo</i>	1/2	1/2	1	2	4	3	5
<i>Pluviometria</i>	1/3	1/3	1/2	1	2	3	5
<i>Declividade</i>	1/4	1/3	1/4	1/2	1	3	2
<i>Uso e ocupação</i>	1/5	1/2	1/3	1/3	1/3	1	3
<i>Hipsometria</i>	1/5	1/5	1/5	1/5	1/2	1/3	1

Fonte: Autora (2023).

Pelo método AHP, foram gerados pesos normalizados, descritos na Tabela 13.

Tabela 13 - Matriz normalizada para os fatores temáticos.

Matriz normalizada

	Hidrogeologia	Geologia	Classes de solo	Pluviometria	Declividade	Uso e ocupação	Hipsometria	Vetor prioridade
<i>Hidrogeologia</i>	0,335	0,411	0,318	0,299	0,270	0,288	0,192	0,302
<i>Geologia</i>	0,168	0,205	0,318	0,299	0,202	0,115	0,192	0,214
<i>Classes de solo</i>	0,168	0,103	0,159	0,199	0,270	0,173	0,192	0,181
<i>Pluviometria</i>	0,112	0,068	0,080	0,100	0,135	0,173	0,192	0,123
<i>Declividade</i>	0,084	0,068	0,040	0,050	0,067	0,173	0,077	0,080
<i>Uso e ocupação</i>	0,067	0,103	0,053	0,033	0,022	0,058	0,115	0,065
<i>Hipsometria</i>	0,067	0,041	0,032	0,020	0,034	0,019	0,038	0,036

Fonte: Autora (2023).

Além disso, calculou-se a razão de consistência do modelo AHP, sendo obtido um valor inferior ao limite de 0,1. Assim, comprova-se que os valores não foram gerados aleatoriamente.

Para atribuição dos pesos obtidos pelo método AHP em ambiente SIG, foi utilizada a opção Reclassificar por tabela do QGIS que permite a atribuição de novos valores às classes em formato raster. Desta maneira, foram inseridos manualmente os respectivos pesos para cada uma das classes dos fatores temáticos. Posteriormente, para utilização do método de combinação linear ponderada no SIG, foi utilizada a ferramenta Raster Calculator, no qual foi inserida a Equação 4 para elaboração do mapa final.

$$PHS = USO_pUSO_{pi} + DEC_pDEC_{pi} + HID_pHID_{pi} + PLU_pPLU_{pi} + SOL_pSOL_{pi} + GEO_pGEO_{pi} + HIP_pHIP_{pi} \quad (4)$$

Em que:

PHS = Potencial hídrico subterrâneo

USO = Uso e ocupação do solo

DEC = Declividade

HID = Hidrogeologia

PLU = Pluviometria

SOL = Solos

GEO = Geologia

HIP = Hipsometria

P = Peso normalizado do tema

Pi = Peso normalizado individual das classes do tema

Definidos todos os pesos para os fatores temáticos e suas respectivas classes, utilizando a ferramenta de álgebra de mapas do QGis, o mapa do potencial de recarga hídrica de João Monlevade-MG foi elaborado e em seguida, foram quantificadas as respectivas áreas para cada uma das classes de potencialidade hídrica subterrânea.

O mapa gerado foi reclassificado em três classes de potencial hídrico subterrâneo sendo: baixo (regiões com valores iguais a 2), moderado (regiões com valores iguais a 3) e alto (regiões com valores iguais a 4), conforme Figura 22.

Em seguida, foram quantificadas as respectivas áreas para cada uma das classes de potencial hídrico subterrâneo, conforme a Tabela 14.

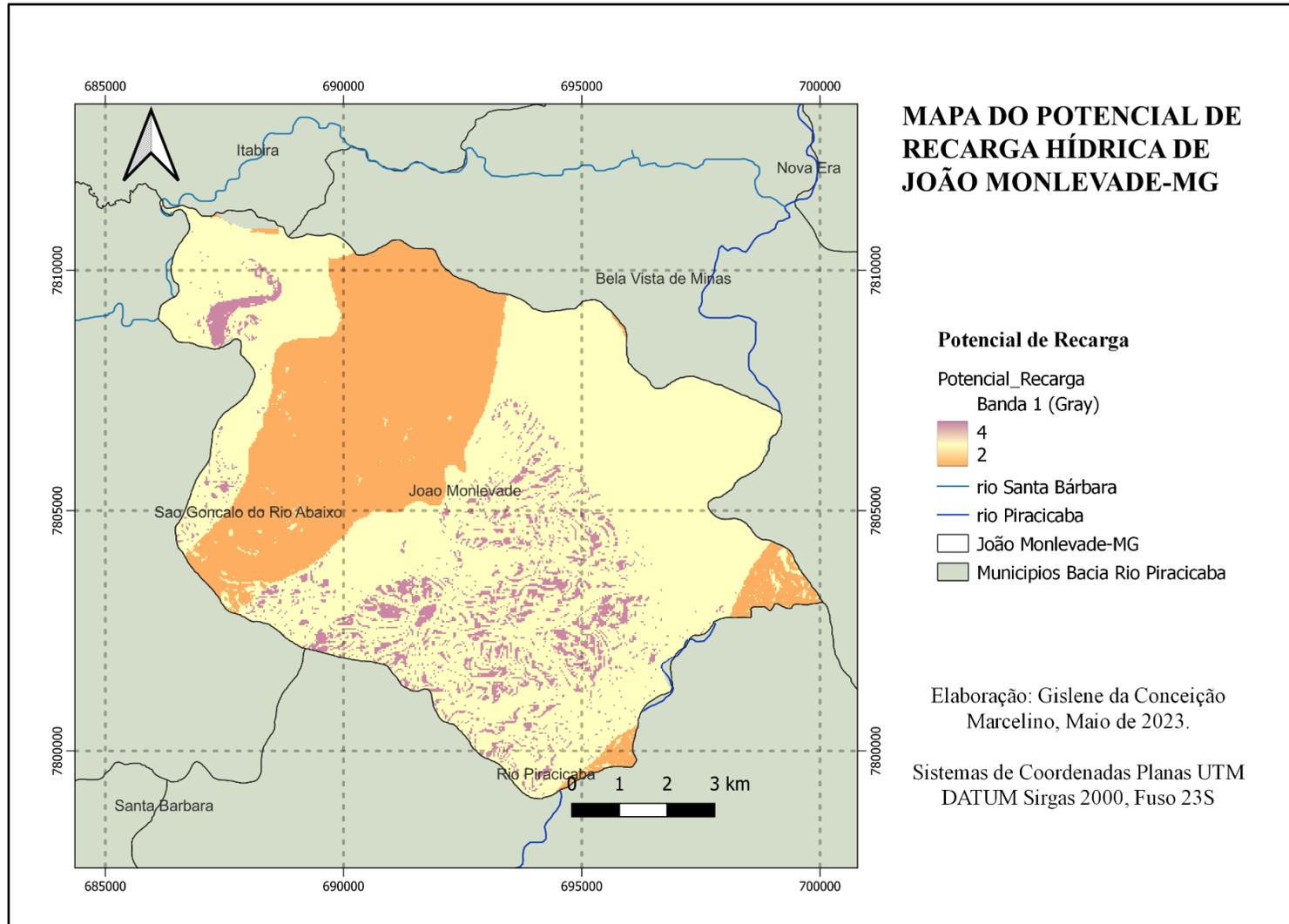
Tabela 14 - Quantificação das áreas de potencial de recarga hídrica.

Potencial de Recarga Hídrica	Área	
	m ²	(%)
Baixo (2)	27.809.100	28,38
Moderado (3)	63.023.400	64,32
Alto (4)	7.154.100	7,30
Total	97.986.600	100,00

Fonte: Autora (2023).

Percebe-se que a maior parte do município se encontra na classe Moderado, seguida pela classe Baixo, ambas em regiões bem contínuas. Já as áreas que apresentam potencial de recarga hídrica alto são regiões mais fragmentadas, como pode ser observado na figura 22.

Figura 22 - Mapa do Potencial de Recarga Hídrica de João Monlevade-MG.



Fonte: Autora (2023).

Um estudo realizado por Pereira (2020), que identificou áreas de recarga hídrica no município de Itabira-MG, identificou que 31,58% do território apresenta um potencial muito baixo para águas subterrâneas, seguindo com 32,84%, a maior porcentagem do município é classificada como de baixa potencialidade. Em seu estudo o autor ainda demonstra que as regiões consideradas de moderada potencialidade ocorrem em 27,40% da área por todo o território e por fim, ocupando 7,52% e 0,66%, as classes de potencialidade alta a muito alta, respectivamente. O autor (2020), concluiu que entre os fatores que possam ter influenciado tal distribuição foram o uso e ocupação do solo, densas regiões de vegetação nativa e reflorestamento, tipo de solo presente, elevada presença de lineamentos ou geologia extremamente favorável a águas subterrâneas. Embora as frações sejam diferentes das encontradas neste estudo, a constatação da influência dos fatores é bem semelhante às encontradas para o município de João Monlevade.

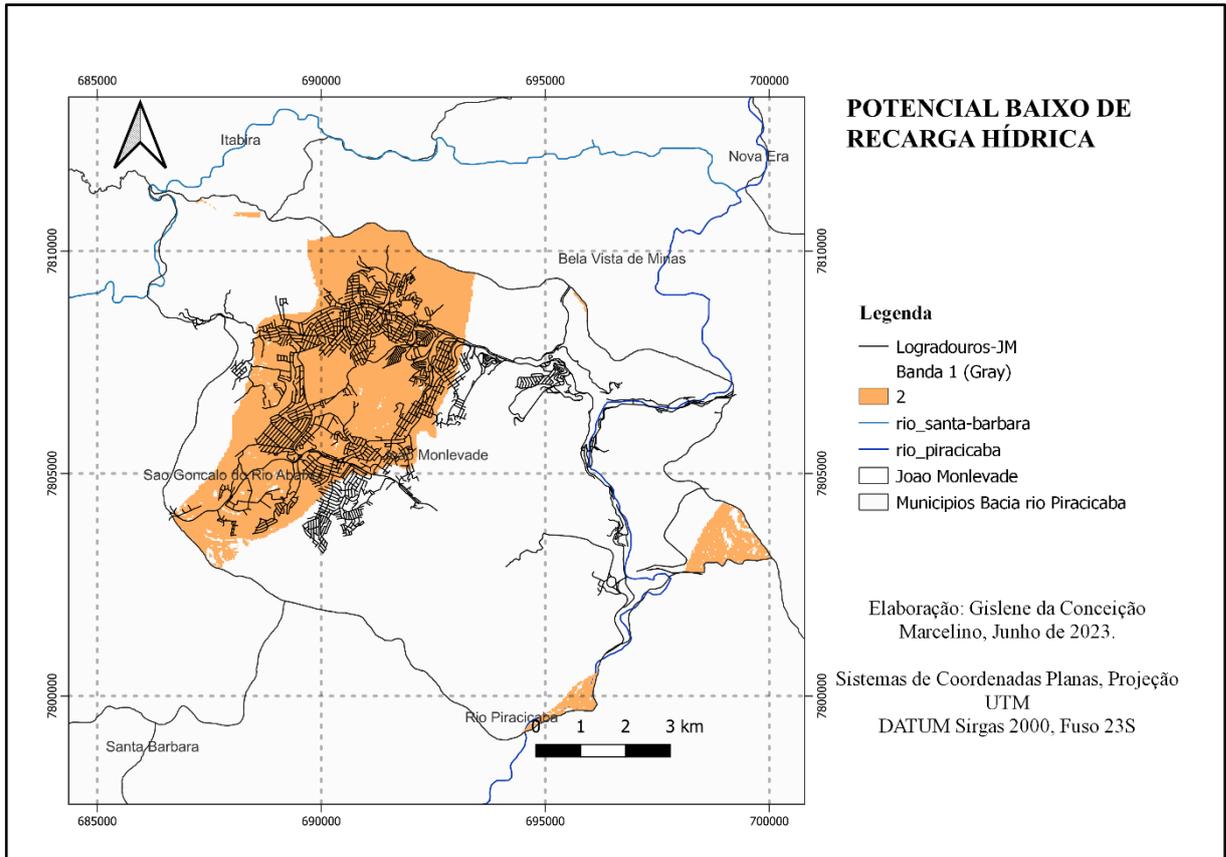
Limoeiro (2020), delimitou áreas potenciais para recarga hídrica subterrânea nas sub-bacias do rio das Pedras e rio Paiaíá-BA e identificou a área com maior potencial de recarga hídrica ocupando 15,69% da região de estudo que se encontravam com as condições mais favoráveis de declividade e altimetria, pluviometria, densidade de lineamentos e vegetação campo rupestre. As áreas de médio potencial apresentaram um percentual de 59,44% e estão presentes em praticamente toda a área de estudo. As de baixo potencial ocuparam 24,87% da região de estudo. Portanto, este estudo também corrobora com a importância dos fatores adotados nesta pesquisa.

Observando os limites das classes de potencial de recarga, percebe-se uma semelhança com os limites do mapa hidrogeológico e do mapa geológico, demonstrando que estes foram os que de fato mais contribuíram para os resultados encontrados.

Também, foram elaborados mapas contendo as classes de forma separada para melhor visualização e discussão dos resultados encontrados para João Monlevade. Como observado na Tabela 14, cerca de 29% do território de João Monlevade apresenta um potencial baixo para águas subterrâneas. Essas regiões estão concentradas principalmente na porção central do município, onde está localizado a malha urbana, abrangendo os bairros Carneirinhos, Nossa Senhora da Conceição, conforme Figura 23.

Trata-se de áreas com domínio hidrogeológico Cristalino, Geologia (Granito e Ortognaisse) e Uso e Ocupação do solo caracterizado como Área não vegetada e solo exposto em sua grande maioria.

Figura 23 - Potencial baixo de recarga hídrica.



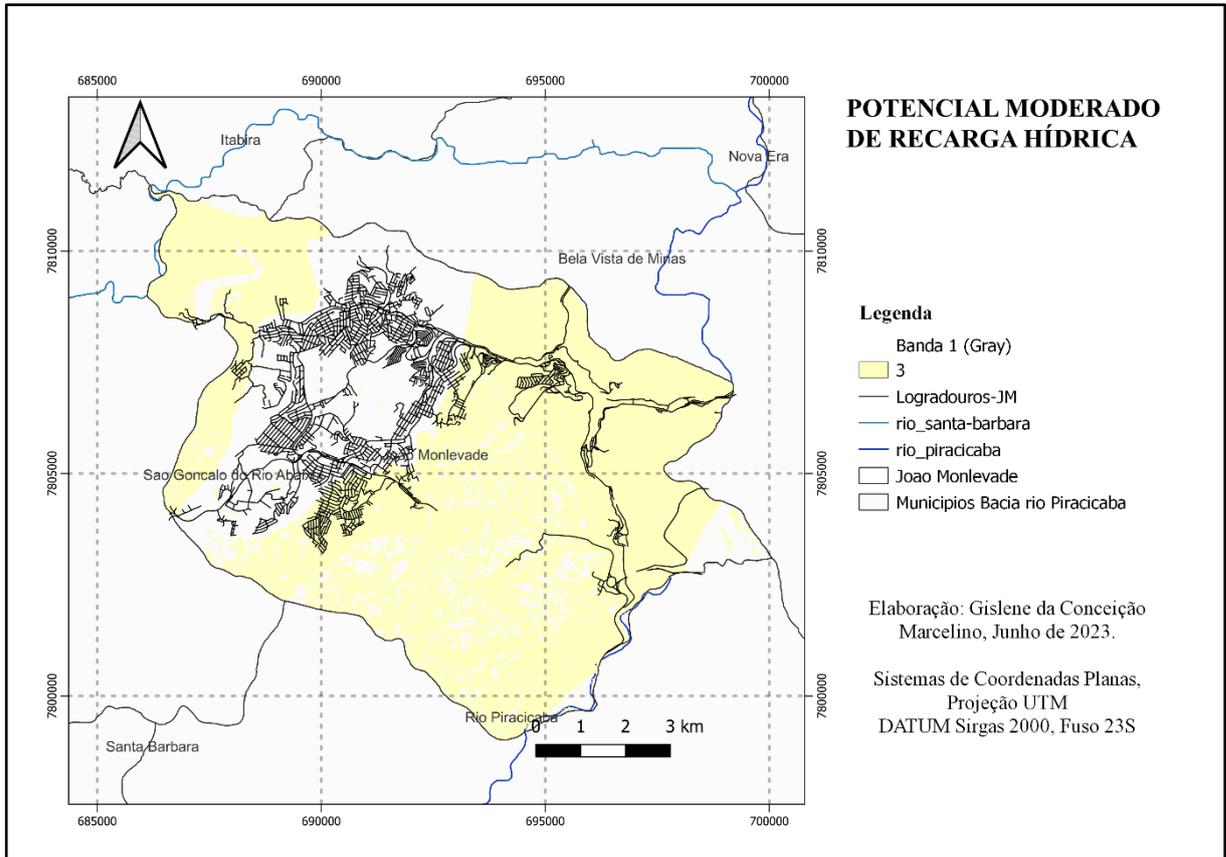
Fonte: Autora (2023).

Seguindo com 64,32%, a maior porcentagem do município é classificada como moderada potencialidade. Sua distribuição é dispersa por todo o território, entretanto, possui maior frequência na faixa noroeste e sudoeste do município, incluindo as Zonas de preservação e Usos diversificados, conforme Figura 24.

Um estudo realizado por Silva *et al.* (2019) verificou a influência da expansão urbana aliada às características morfométricas nas ocorrências de inundações no município de João Monlevade-MG e concluíram por meio da análise do uso e ocupação do solo foi constatado que nos três anos analisados (2005, 2016 e 2019), os usos antrópicos prevaleceram e houve um aumento da expansão urbana, fato que pode ser verificado nesta pesquisa.

Os mesmos autores (2019), também verificaram que em 2005, o somatório das classes equivalentes aos usos antrópicos foi de 57,6% já em 2016 e 2019 foi próximo 58,1%, o que significa que a maior parte da bacia possui usos que interferem negativamente na permeabilidade da água no solo, dificultando sua infiltração e favorecendo o escoamento superficial e a evaporação, isso explica o baixo potencial de recarga nessa área e contribui para a ampliação de eventos de inundação na região central do município.

Figura 24 - Potencial moderado de recarga hídrica.

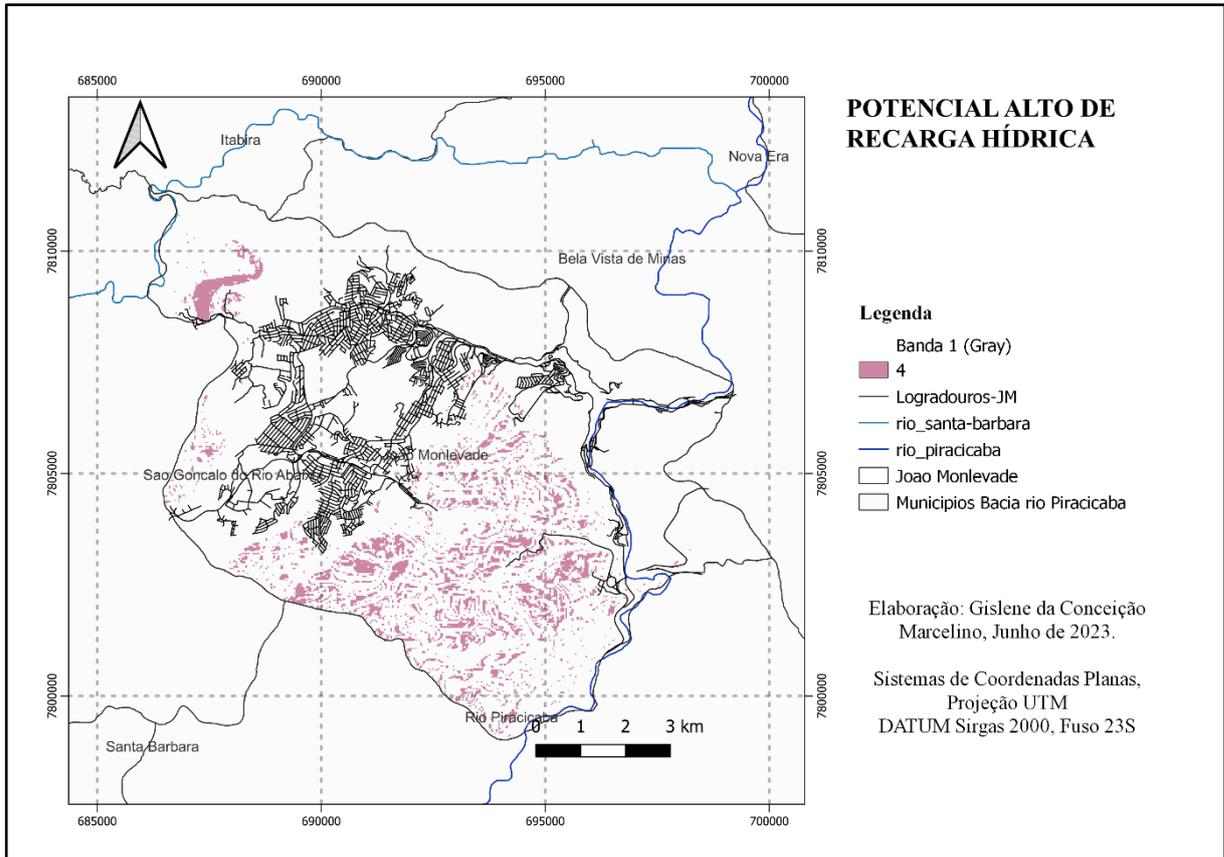


Fonte: Autora (2023).

Trata-se de áreas com Uso e Ocupação do solo caracterizado por Florestas e Formação vegetal não natural em sua grande maioria e uma pequena área de Agricultura. O domínio hidrogeológico refere-se às rochas Metassedimentos-Metavulcânicas.

Ocupando um percentual de 7,3% as classes de potencialidade alta, são encontradas especialmente em pequenas áreas ao norte e sudoeste, e principalmente nas zonas de preservação do município, conforme mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Potencial alto de recarga hídrica.

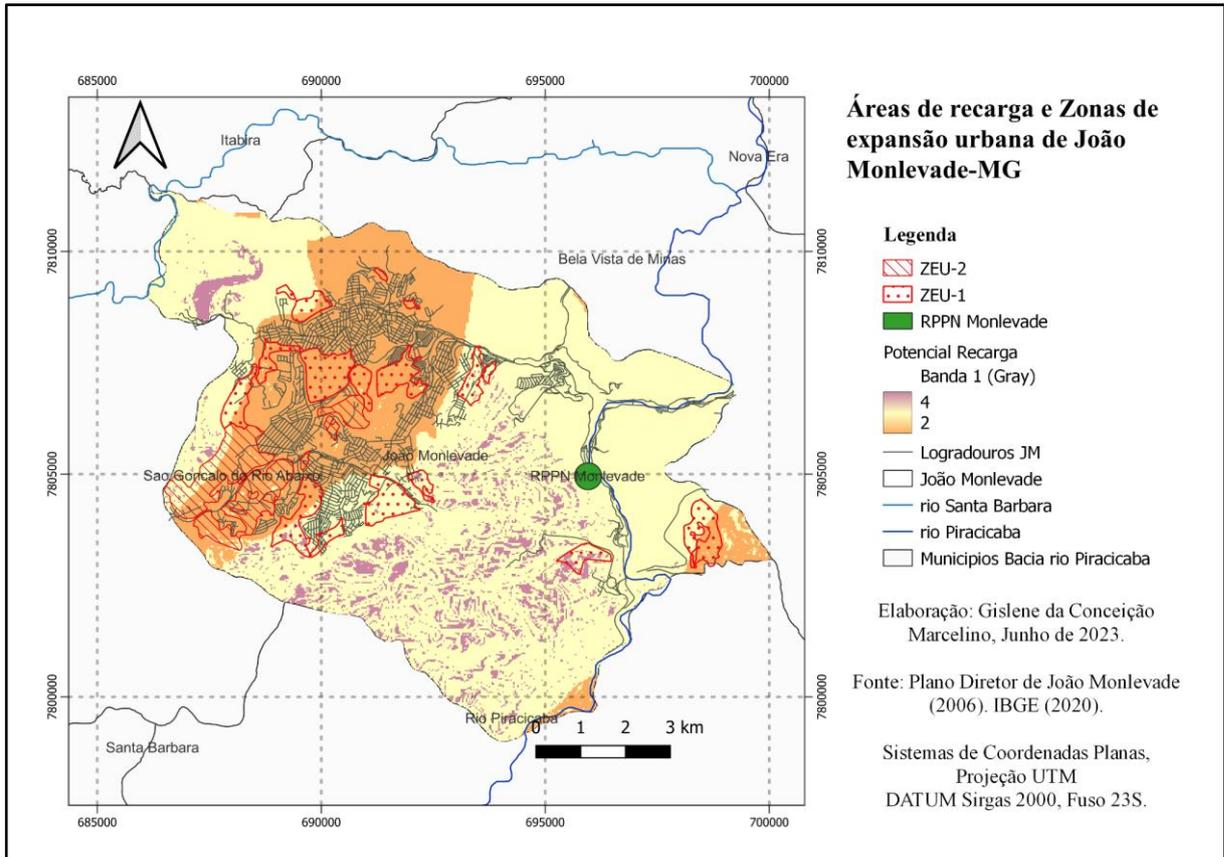


Fonte: Autora (2023).

Correlacionando as áreas de recarga hídrica e as Zonas de expansão urbana, temos que o maior percentual se encontra nas áreas de baixo potencial de recarga, conforme Figura 26, o que para o município é importante. Contudo algumas porções das zonas de expansão ainda se encontram em locais com maiores potenciais de recarga (potencial moderado) estas não deveriam ser impermeabilizadas, a fim de se manter a recarga dos aquíferos destas regiões.

A região de expansão mais crítica encontra-se a sul da RPPN, localizada em uma região onde há fragmentos de áreas com alto potencial de recarga. Esta região deveria ser convertida em reserva, conversão que já está prevista a possibilidade no plano diretor vigente, a fim de se manter as regiões que mais contribuem com a recarga dos aquíferos.

Figura 26 - Potencial de recarga correlacionada às zonas de expansão urbana.

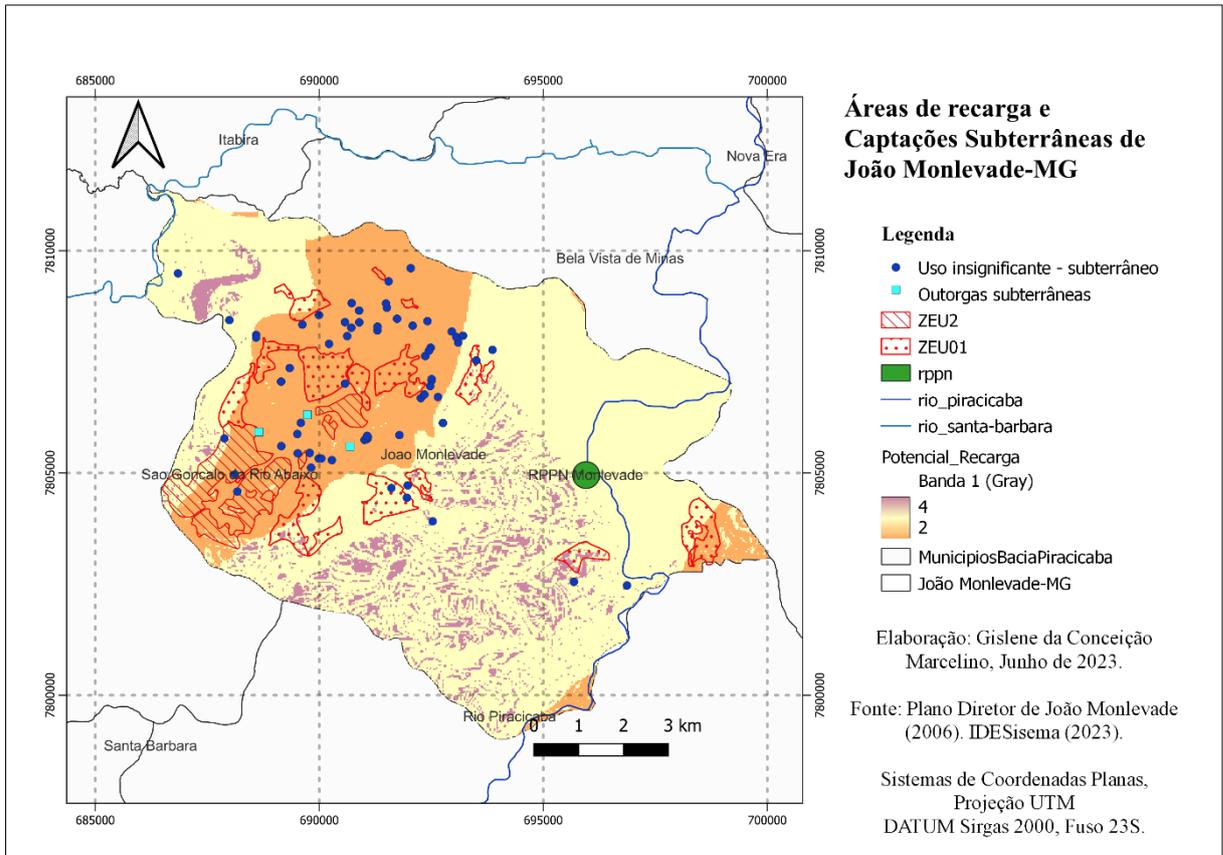


Fonte: Autora (2023).

Outra correlação importante, trata-se dos pontos de captação hídrica subterrânea no município de João Monlevade-MG, extraídos da plataforma IDESisema (2022), conforme Figura 27.

Em sua grande maioria, as captações se encontram na região do centro urbano do município e nas áreas com baixo potencial de recarga hídrica subterrânea. Assim, conclui-se que a ocupação das áreas hoje zoneadas como áreas de expansão, além de contribuir com a futura impermeabilização das regiões, que reduzirão a recarga local, também podem trazer uma maior exploração da água subterrânea para diversos fins.

Figura 27- Áreas de recarga e Captações subterrâneas de João Monlevade-MG.



Fonte: Autora (2023).

Assim, embora a maior parte dos pontos sejam de captação de uso insignificante, a exploração nestes locais se caracterizam como mais uma pressão sobre os recursos hídricos subterrâneos, demonstrando ainda mais a importância da manutenção da recarga dos aquíferos como locais para a manutenção da segurança hídrica no município.

6. CONCLUSÕES

A integração dos resultados da análise multicritério utilizando o método AHP, para a geração do mapa que representa o potencial de recarga hídrica de João Monlevade-MG, utilizou os fatores temáticos de uso e ocupação do solo, classes de solo, geologia, hidrogeologia, pluviometria, declividade e hipsometria, em que todos foram submetidos aos respectivos pesos de contribuição de recarga hídrica subterrânea.

Observou-se que o critério hidrogeologia resultou em 30,2% de importância, seguido de geologia 21,4%, classes de solo 18,1%, pluviometria 12,3%, declividade 8,0%, uso e ocupação do solo 6,5% e hipsometria 3,6%. Em seguida, os mapas temáticos foram integrados em ambiente SIG gerando o mapa de potencial hídrico subterrâneo do município dividido em três classes de potencialidade: baixa, moderada e alta. Como resultado, 28,38% do território apresentam um potencial baixo, 64,32% apresentam um potencial moderado e 7,30% apresentam um potencial alto para a recarga de águas subterrâneas.

Mesmo com a ponderação do grau de importância entre os critérios, a hidrogeologia e geologia foram os que governaram a delimitação das classes de potencialidade para o município de João Monlevade.

Correlacionando as áreas de recarga hídrica e as Zonas de Expansão Urbana, o maior percentual se encontra nas áreas de baixo potencial de recarga, o que para o município é importante. Contudo algumas porções das zonas de expansão ainda se encontram em locais com maiores potenciais de recarga (potencial moderado). E estas não devem ser impermeabilizadas, a fim de se manter a recarga dos aquíferos destas regiões.

Os resultados obtidos podem ser utilizados como ferramenta para a gestão dos recursos hídricos, proteção das áreas com maiores potenciais de recarga hídrica subterrânea, principalmente as zonas de preservação do município.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método AHP (Analytic Hierarchy Process) é uma técnica de tomada de decisão desenvolvida por Thomas L. Saaty que pode ser aplicada em várias áreas, incluindo a identificação de áreas de recarga hídrica subterrânea. Embora o AHP seja amplamente utilizado e tenha várias vantagens, também apresenta algumas limitações.

Em resumo, o AHP oferece uma estrutura hierárquica e um processo sistemático para a identificação de áreas de recarga hídrica subterrânea, permitindo a consideração de múltiplos critérios e a comparação entre eles. No entanto, é importante estar ciente das limitações relacionadas à disponibilidade de dados, subjetividade na atribuição de pesos, sensibilidade a alterações e a falta de consideração explícita das incertezas. Medição de desempenho é uma tarefa desafiante, nem sempre os dados estão disponíveis, acessíveis ou estruturados na forma ideal para consolidação. Além disso, há também os aspectos subjetivos a serem considerados, cujas medições são ainda mais complexas, exatamente por serem de caráter pessoal e de difícil externalização.

Neste estudo, os resultados foram satisfatórios na primeira avaliação, porém requer alguns ajustes e atualização de dados e informações para estudos futuros.

RECOMENDAÇÕES

Embora os dados disponíveis permitam um mapeamento consistente, para a identificação das áreas potenciais para recarga hídrica subterrânea do município de João Monlevade-MG, os fatores geologia e hidrogeologia, requerem análise minuciosa e detalhada.

Além disso, os dados pluviométricos utilizados referem-se a uma única estação pluviométrica, pois não foi possível encontrar dados atualizados das demais estações. Diante disso, recomenda-se, em trabalhos futuros, que haja campanhas de campo para coleta de informações e que sejam utilizados dados de poços para estudo da produtividade da área de estudo.

Por fim, recomenda-se atenção por parte da administração pública e órgãos ambientais competentes, às áreas com potencial moderado para recarga hídrica que coincidem com as zonas de preservação do município conforme Plano Diretor vigente.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA (BRASIL). **Conjuntura Dos Recursos Hídricos No Brasil**. Qualidade e Quantidade da Água. 2021. Disponível em: <https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/capitulos/quantidade-qualidade>. Acesso em: 23 mar. 2022.

ALVARENGA, Janaína Abreu; GONÇALVES, José Augusto Costa. **Estudo da vulnerabilidade do aquífero aluvionar de Amaro Lanari, principal fonte de abastecimento d`água das cidades do Vale Do Aço, Minas Gerais**. 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/issue/view/1178>. Acesso em: 26 fev. 2022.

ARAÚJO., José Carlos de. **Resgate cultural de João Monlevade, História e Arquitetura**. 2011. 1ª turma de Engenharia Civil, FaEng. Disponível em: <http://ec1uemg.blogspot.com/2011/08/resgate-cultural-de-joao-monlevade.html>. Acesso em: 10 jun. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS – ABAS (BRASIL). **Águas subterrâneas: o que são?** 2019. Disponível em: <https://www.abas.org/aguas-subterraneas-o-que-sao/#ind21>. Acesso em: 20 fev. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS – ABAS (BRASIL). **Aquíferos**. 2019. Disponível em: <https://www.abas.org/aguas-subterraneas-o-que-sao/#ind21>. Acesso em: 20 fev. 2023.

BACELLAR, Luis de Almeida Prado; OLIVIEIRA, Nilcileia Cristina de Magalhães; FIUME, Bruna; BARELLA, Cesar Falcão; NOLA, Iraydes Tálita de Sena. **Aplicação do método AHP para confecção de modelo de favorabilidade hídrica subterrânea de aquíferos fraturados**. 2020. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 1, p. 90-102, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v34i1.29769>. Acesso em: 12 fev. 2023.

BANDEIRA, Íris Celeste Nascimento; ABREU, Francisco de Assis Matos de. **Principais áreas de recarga do sistema hidrogeológico livre, da folha SA-23 – V - C - I -1-SO e suas implicações ambientais**. 2009. I Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo. Acesso em: 26 mar. 2022.

BRASIL (GOVERNO DO BRASIL). **Lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1o da Lei no 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. *Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília*, 9 jan. 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.html. Acesso em: 12 fev. 2021.

BRASIL. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto Belo Horizonte: se.23-z-c-vi. SE.23-Z-C-VI**. 1999. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Geologia/Geologia-Basica/Projeto-Belo-Horizonte-381.html>. Acesso em: 20 abr. 2021.

BRASIL. ICMBIO. **Reservas Particulares Do Patrimônio Natural - RPPN-RPPNMonlevade**. 2023. Disponível em: <https://sistemas.icmbio.gov.br/simrppn/publico/detalhe/488/>. Acesso em: 20 jun. 2023.

BRASIL. MAPBIOMAS. **Mapa das Coleções**. 2020. Disponível em: https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR. Acesso em: 10 mar. 2022.

CASTRO, Karen Quintão; GONÇALVES, José Augusto Costa. **Quantificação do potencial hídrico subterrâneo do baixo curso do Rio Piracicaba (MG): Interação das águas subterrâneas e superficiais**. 2022. Revista Brasileira de Geografia Física v.15 n. 04 (2022) 1881-1901. Castro. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>. Acesso em: 10 abr. 2023.

CAVALCANTE, Fernanda Beatriz Ferreira. **Consumo residencial de água em Uberlândia – Minas Gerais, Brasil (2006-2016): Subsídios informacionais para gestão da demanda**. 2019. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/183370/cavalcante_fbf_me_ilha.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em: 15 fev. 2021.

CLIMATE-DATA.ORG. **Clima João Monlevade**. 2022. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/joao-monlevade-24904/>. Acesso em: 05 abr. 2022.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Leste: Folha Belo Horizonte - SE. 23, escala 1:100.000. Belo Horizonte: CPRM, Belo Horizonte –MG.

FRANCO, Elton Santos; LUIZ, Thiago Alcântara; SANTOS, Natália Alves dos; NARCIZO, Rogelaine Vanessa; LOPES, José de Arimatéia. **Canalização do Córrego Carneirinhos e sua relação com os alagamentos em João Monlevade/MG**. 2016. Disponível em: <http://www.ufvjm.edu.br/vozes>. Acesso em: 10 jun. 2023.

FREITAS, Marcos Airton de Sousa; MATOS, Bolivar Antunes; TEIXEIRA, Alexandre Lima de F.; BURNETT, João Augusto; ZOBY, José Luiz Gomes. **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos nas 12 Regiões Hidrográficas do Brasil**. 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/275958839_DISPONIBILIDADE_E_DEMANDAS_DE_RECURSOS_HIDRICOS_NAS_12_REGIOES_HIDROGRAFICAS_DO_BRASIL. Acesso em: 21 fev. 2023.

GOEPEL, K.D. AHP Analytic Hierarchy Process (EVM multiple inputs). 2018. Disponível em: <http://bpmsg.com>.

GONÇALVES, José Augusto Costa. **Potencial de Uso das Águas Subterrâneas no Estado do Espírito Santo: águas subterrâneas: o que são?. Águas Subterrâneas: o que são?**. 2016. Disponível em: http://www.cedagro.org.br/arquivos/Irrigantes_2016_Aguas_Subterranea.pdf. Acesso em: 30 jun. 2023.

GHOSH, M., SAHU, A.S. **Delineation of groundwater potential zones using AHP and GIS techniques: a case study in Barakar river basin, India**. Arab J Geosci 16, 157 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11253-z>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE - Cidades – Minas Gerais: **João Monlevade**, 2021. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/joao-monlevade/panorama>>. Acesso em: 26 mar. 2022.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais do Brasil Climatológicas - 1991 a 2020**. 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 30 mar. 2022.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Introdução ao Geoprocessamento**. 1991-2006. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_geo.html. Acesso em: 25 mar. 2022.

JOÃO MONLEVADE. Prefeitura Municipal de João Monlevade. **Lei N° 1686/2006 de 10 de outubro de 2006: revisa o plano diretor do município de João Monlevade e atende ao previsto no § 1° do art. 87 da lei orgânica do município de João Monlevade**. 2006. Acesso em: 19 jun. 2023.

JOÃO MONLEVADE. Prefeitura Municipal de João Monlevade. **Lei N° 1686/2006 de 10 de outubro de 2006: revisa o plano diretor do município de João Monlevade - Anexo I**. 2006. Disponível em: <<https://www.pmjm.mg.gov.br/publicacoesView/?id=499>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

LIMOEIRO, Alessandra dos Santos. **Delimitação de áreas potenciais para recarga hídrica subterrânea: estudo de caso nas Sub-bacias do Rio das Pedras e Rio Paiaíá, Bahia**. Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências. 2020.

MINAS GERAIS. INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Gestão das Águas**. 2021. Disponível em: <http://igam.mg.gov.br/gestao-das-aguas>. Acesso em: 23 mar. 2022.

MORAES, MEB., and LORANDI, R., orgs. **Métodos e técnicas de pesquisa em bacias hidrográficas [online]**. Ilhéus, BA: Editus, 2016, 283p. ISBN 978-85-7455-443-3. Available from SciELO Books Disponível em: <<http://books.scielo.org>>.

OLIVEIRA, Aline da Nóbrega. **Cidade e Natureza: Urbanização em áreas de recarga de aquíferos**. 2020. TD - n. 69 (2020) - Brasília: Companhia de Planejamento do Distrito Federal, 2020. Disponível em: <http://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/02/TD-69-Cidade-e-Natureza-Urbaniza%C3%A7%C3%A3o-em-%C3%A1reas-de-recarga-de-aqu%C3%ADferos-2020.pdf> Acesso em: 02 fev. 2021.

PECHTA, Milla; VASCONCELOS, Vitor Vieira. **Indicadores para uso de águas subterrâneas no Brasil, por domínio hidrogeológico, utilizando o SIAGAS**. 2018. XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Disponível em: <https://www.abas.org/xxcabas/anais/10331>. Acesso em: 11 abr. 2023.

PEREIRA, Pedro Henrique Rodrigues; GONÇALVES, José Augusto Costa; VIEIRA, Eliane Maria. **Evaluation of the groundwater recharge potential using GIS multi-criteria data analysis: a case study from district of Itabira, Minas Gerais, southeastern Brazil**. 2020. DOI:10.5902/2179460X40433. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/40433/html>. Acesso em: 10 fev. 2022.

PUC-RIO (Rio de Janeiro). **O Método AHP – Analytic Hierarchy Process**: capítulo 3. 2007, 14p. (36-49). Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/10385/10385_4.PDF. Acesso em: 11 jun. 2023.

SAATY, Thomas L. A Scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*. 15, 234-281. 1977.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada** / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. — Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2011. 67 p. - (Documentos / Embrapa Solos, ISSN 1517-2627 ; 130)

SANTOS, Humberto Gonçalves dos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2018. 356 p. : il. color. ; 16 cm x 23 cm.

SANTOS, Juliene Rodrigues dos; MANZIONE, Rodrigo Lilla. **Estimativa da recarga de águas subterrâneas em área de afloramento do sistema Aquífero Guarani na região de Bofete - SP**. 2018. XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Disponível em: <https://abas.org/xxcabas/>. Acesso em: 26 mar. 2022.

SÃO PAULO. Mestrado Profissional Em Rede Nacional Em Gestão E Regulação De Recursos Hídricos - PROFÁGUA. **Linhas De Pesquisa: Instrumentos Da Política De Recursos Hídricos**. 2018. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/#!/pos-graduacao/profagua/programa/linhas-de-pesquisa/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

SENHORINHO, Eliel Martins; TROIAN, Guilherme Casarotto; KUHN, Isadora Aumond. **Estimativa de recarga pelo método WTF (Water Table Fluctuation) para um poço (RIMAS) monitorado por 5 anos em Capão da Canoa - RS**. 2018. XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Disponível em: <https://abas.org/xxcabas/>. Acesso em: 26 mar. 2022.

SERAPHIM, Ana Paula Albuquerque Campos Costalonga. **Relações entre as áreas de recarga dos aquíferos e áreas destinadas à urbanização: estudo dos padrões de ocupação do solo da unidade hidrográfica do Lago Paranoá - DF**. 2018. Disponível em: <http://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/02/TD-55-Rela%C3%A7%C3%B5es-entre-as-%C3%81reas-de-Recarga-dos-Aqu%C3%ADferos-e-%C3%81reas-Destinadas-a-Urbaniza%C3%A7%C3%A3o-2018.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2021.

SERAPHIM, Ana Paula Albuquerque Campos Costalonga; BEZERRA, Maria do Carmo de Lima. **Identificação de áreas de recarga de aquíferos e suas interfaces com áreas propícias à urbanização**. 2019. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/42764/1/ARTIGO_IdentificacaoAreasRecarga.pdf. Acesso em: 03 jul. 2022.

SOUSA, Flávio Alves de. **Identificação das zonas de recarga e caracterização dos sistemas freáticos de Iporá – GO**. 2019. GEOAMBIENTE ON-LINE Revista Eletrônica do Curso de Geografia - UFG/REJ Graduação e Pós-Graduação em Geografia. Disponível em: <http://www.revistas.ufg.br/geoambiente>. Acesso em: 26 mar. 2022.

SOKOLOSKI, Leilane Junqueira Fraga. Mapeamento da vulnerabilidade socioambiental: suporte à gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Piracicaba/MG. 2020. Dissertação de Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), Universidade Federal de Itajubá.

SILVA, Josiano Josiel Rodrigues; OLIVEIRA, Gisely de Assis; VIEIRA, Eliane Maria; FREITAS, Ana Carolina Vasques. **Influência da expansão urbana aliada às características morfométricas nas ocorrências de inundações: estudo de caso no município de João Monlevade-MG.** 2019. Research, Society and Development, v. 9, n. 2, e136922101, 2020. Acesso em: 13 jun. 2023.

TEDESCO, Adriana Maria; OLIVEIRA, Gilson Adamczuk; TROJAN, Flávio. **Avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas por meio dos métodos AHP e TOPSIS.** 2021. Eng Sanit Ambient | v.26 n.3 | maio/jun 2021 | 401-407. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220190322>. Acesso em: 10 nov. 2021.

VARGAS, Tiago de; SGORLA, Vinícius; BELLADONA, Rossano; VEDANA, Luiz Alberto. **Mapas de zonas potenciais de recarga da água subterrânea como uma nova ferramenta para a segurança hídrica do abastecimento público.** 2022. Revista Águas Subterrâneas. Disponível em: <http://doi.org/10.14295/ras.v37i130152>. Acesso em: 22 abr. 2023.

VIEIRA, Julia H. **Waste water treatment in the recharge and discharge areas of the guarani aquifer.** 2018. University of New Hampshire. XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/issue/view/1326>. Acesso em: 24 abr. 2021.