



**PEDRO HENRIQUE DE PAULA SILVA**

**MAPEAMENTO DO POTENCIAL DE RECARGA DA BACIA  
DO RIO GRANDE COM FERRAMENTA GIS**

**LAVRAS - MG  
2023**

**PEDRO HENRIQUE DE PAULA SILVA**

**MAPEAMENTO DO POTENCIAL DE RECARGA DA BACIA DO RIO GRANDE  
COM FERRAMENTA GIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade Federal de Lavras, como parte  
das exigências do Curso de Engenharia  
Florestal, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Pedro Henrique de Paula.

Mapeamento do potencial de recarga da Bacia do Rio Grande  
com ferramenta GIS / Pedro Henrique de Paula Silva. - 2023.

50 p.

Orientador(a): Bruno Montoani Silva.

TCC (graduação) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Águas subterrâneas. 2. Recarga Hídrica. 3. Análise  
Hierárquica de Processos. I. Silva, Bruno Montoani. II. Título.

**PEDRO HENRIQUE DE PAULA SILVA**

**MAPEAMENTO DO POTENCIAL DE RECARGA DA BACIA DO RIO GRANDE  
COM FERRAMENTA GIS**

**MAPPING THE RECHARGE POTENTIAL OF THE RIO GRANDE BASIN WITH  
GIS TOOL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade Federal de Lavras, como parte  
das exigências do Curso de Engenharia  
Florestal, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 24 de novembro de 2023  
Prof. Dr. Bruno Montoanni Silva – UFLA  
Dra. Sâmara Martins Barbosa – UFLA  
Me. Josiel de Jesus Santos – UFLA

---

Prof. Dr. Bruno Montoanni Silva  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, a Deus, pela saúde e por possibilitar realizar o meu sonho.

Aos meus queridos pais e familiares, pelo suporte emocional e financeiro, que possibilitaram a concretização deste sonho. Agradeço pelo amor incondicional, incentivo, e por sempre depositarem confiança em mim.

Ao meu irmão Luiz Augusto, pela amizade sincera e companheirismo, que me incentivou nos momentos mais difíceis e me inspirou para não desistir dos meus sonhos.

Aos meus amigos de curso e de moradia, pelos bons momentos e amizade, e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período em que estive me dedicando a este trabalho.

A todos os professores, orientadores e coorientadores que fizeram parte da minha trajetória, e aos membros da banca. Em especial, agradeço ao professor Bruno Montoanni e à mestrandia Lara Mota, pelo grande empenho em ajudar e pelas valiosas contribuições para elaboração deste trabalho.

Ao Núcleo de Estudos em Ciência do Solo – NECS, por me despertar o amor pela ciência do solo, pelo conhecimento adquirido ao longo do curso e pelas amizades construídas.

Aos Laboratórios de Ciência e Tecnologia da Madeira e Física do Solo, por me possibilitarem o contato com a pesquisa e pela oportunidade de desenvolvimento acadêmico.

Às empresas Viveiro de Mudanças Boa Vista, Consórcio Regional de Saneamento Básico - CONSANE e Gerdau e às lideranças dessas empresas, pela confiança em meu trabalho e pela oportunidade de desenvolvimento profissional.

À UFLA, pela excelente estrutura, pelos recursos disponibilizados para minha formação e pela educação gratuita e de qualidade. Local onde tive a oportunidade de vivenciar momentos únicos que moldaram a minha formação como ser humano e estudante.

## RESUMO

As águas subterrâneas são um reservatório estratégico de água potável e são essenciais para garantir a segurança hídrica, especialmente no contexto das alterações climáticas. Apesar da sua grande importância, a gestão dos recursos hídricos subterrâneos nas bacias hidrográficas ainda representa um grande desafio para os órgãos públicos e privados, principalmente devido ao desconhecimento da sua distribuição no território. A Bacia do Rio Grande em Minas Gerais tem relevância estratégica para a preservação das águas subterrâneas, devido à sua grande contribuição no atendimento a diversos setores da economia, além de estar localizada em uma região estratégica para geração de energia no Estado. Dadas as dificuldades impostas pelos métodos tradicionais para obtenção de informações deste importante recurso, a utilização de análises multicritério como a Análise Hierárquica de Processos (AHP) em conjunto com técnicas de geoprocessamento vem ganhando destaque para o mapeamento das águas subterrâneas com grande potencial para utilização na gestão de recursos hídricos subterrâneos. Com base no acesso a informações de geologia, topografia e uso e ocupação do solo, foi possível mapear as zonas de recarga. Observou-se predominância de áreas com potencial de baixo e médio potencial de recarga na bacia. A utilização de técnicas de geoprocessamento permitiu superar as dificuldades impostas pelos métodos tradicionais, com potencial para ser utilizados na gestão de águas subterrâneas.

**Palavras-chave:** Águas subterrâneas. Recarga Hídrica. Análise Hierárquica de Processos (AHP).

## ABSTRACT

Groundwater is a strategic reservoir of drinking water and is essential to ensure water security, especially in the context of climate change. Despite its great importance, the management of underground water resources in river basins still represents a major challenge for public and private bodies, mainly due to the lack of knowledge of their distribution in the territory. The Rio Grande Basin in Minas Gerais has strategic relevance for the preservation of groundwater, due to its great contribution to serving various sectors of the economy, in addition to being located in a strategic region for energy generation in the State. Given the difficulties imposed by traditional methods for obtaining information from this important resource, the use of multi-criteria analyzes such as Hierarchical Process Analysis (AHP) in conjunction with geoprocessing techniques has been gaining prominence for mapping groundwater with great potential for use in management of underground water resources. Based on access to information on geology, topography and land use and occupation, it was possible to map the recharge zones. A predominance of areas with low and medium recharge potential was observed in the basin. The use of geoprocessing techniques made it possible to overcome the difficulties imposed by traditional methods, with the potential to be used in groundwater management.

**Keywords:** Groundwater. Water Recharge. Analytic Hierarchy Process (AHP).

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Bacia do Rio Grande em Minas Gerais. ....	22
<b>Figura 2</b> - Mapa de solos da bacia do Rio Grande - MG.....	31
<b>Figura 3</b> - Mapa de declividade da bacia do Rio Grande. ....	33
<b>Figura 4</b> - Mapa de densidade de drenagem.....	34
<b>Figura 5</b> - Litotipos presentes na Bacia do Rio Grande - MG.....	35
<b>Figura 6</b> - Uso e Ocupação do Solo na Bacia do Rio Grande - MG.....	37
<b>Figura 7</b> - Mapa de potencial de recarga de aquíferos.....	39

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Fontes de aquisição dos dados.....	24
<b>Tabela 2</b> - Escala de classificação de Saaty.....	29
<b>Tabela 3</b> – Classificação AHP e pesos para os parâmetros.....	29
<b>Tabela 4</b> – Índice de razão de consistência de Saaty.....	30
<b>Tabela 5</b> – Classes de solos, pesos para as diferentes classes de solo e sua expressão geográfica na bacia do Rio Grande - MG.....	31
<b>Tabela 6</b> - Classes de declividade, pesos entre as classes e expressão geográfica para a bacia do Rio Grande – MG.....	33
<b>Tabela 7</b> – Tipos de litotipos, pesos entre os diferentes litotipos e sua expressão geográfica na bacia do Rio Grande.....	36
<b>Tabela 8</b> - Uso e ocupação do solo na bacia do Rio Grande - MG.....	37

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Importância das Zonas de Potencial de Recarga.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Importância da estimativa.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3</b>	<b>Formas da estimativa.....</b>	<b>16</b>
<b>2.4</b>	<b>Análise Hierárquica de Processos (AHP).....</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>20</b>
<b>3.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
<b>5.1</b>	<b>Área de estudo .....</b>	<b>22</b>
<b>5.2</b>	<b>Coleta e Pré-Processamento de dados.....</b>	<b>23</b>
<b>5.3</b>	<b>Confecção dos mapas .....</b>	<b>25</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Classe de solo e litologia .....</b>	<b>25</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Declividade .....</b>	<b>25</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Uso e ocupação do solo .....</b>	<b>26</b>
<b>5.3.4</b>	<b>Densidade de drenagem .....</b>	<b>26</b>
<b>5.3.5</b>	<b>Potencial de recarga .....</b>	<b>27</b>
<b>5.4</b>	<b>Análise Hierárquica de Processos (AHP).....</b>	<b>28</b>
<b>5.4.1</b>	<b>Seleção de fatores e elaboração da matriz de comparação pareada.....</b>	<b>28</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Estimativa de pesos relativos.....</b>	<b>29</b>
<b>5.4.3</b>	<b>Avaliação da consistência da matriz .....</b>	<b>30</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>31</b>
<b>6.1</b>	<b>Solos.....</b>	<b>31</b>
<b>6.2</b>	<b>Declividade.....</b>	<b>33</b>

<b>6.3</b>	<b>Densidade de drenagem.....</b>	<b>34</b>
<b>6.4</b>	<b>Litologia .....</b>	<b>35</b>
<b>6.5</b>	<b>Uso e ocupação do solo.....</b>	<b>37</b>
<b>6.6</b>	<b>Mapa de potencial de recarga.....</b>	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam um dos principais desafios do século XXI em relação à gestão de recursos naturais, principalmente a água (BORETTI; ROSA, 2019). O aumento da industrialização, o uso intensivo de água para a irrigação e o aumento do desmatamento resultantes do crescimento populacional são alguns dos fatores responsáveis pela redução da disponibilidade dos recursos hídricos superficiais (DAR; RAI; BHAT, 2021; JAAFARZADEH et al., 2021), aumentando a importância recursos hídricos subterrâneos como fonte primária ou alternativa para o suprimento de água.

A bacia do Rio Grande é considerada uma das regiões mais importantes no que se refere à conservação dos recursos hídricos para o Estado de Minas Gerais, uma vez que seus rios são responsáveis pelo abastecimento de água, além da importância estratégica para geração de energia (AGÊNCIA REGIONAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DA BACIA DO RIO GRANDE, [s. d.]). Nesse sentido, a utilização de ferramentas que possam auxiliar na gestão das águas subterrâneas em bacias hidrográficas como a bacia do Rio Grande torna-se indispensável para a preservação dos recursos hídricos, proporcionando, assim, um melhor entendimento deste recurso.

Os estudos realizados em bacias hidrográficas são essenciais para a compreensão dos processos que controlam o movimento da água e seus prováveis impactos sobre a quantidade e a qualidade da água (ANDRADE; MELLO; BESKOW, 2013). Apesar da sua grande importância, a gestão dos recursos hídricos subterrâneos nas bacias hidrográficas ainda representa um grande desafio para órgãos públicos e privados, especialmente devido a sua distribuição de maneira heterogênea no território (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA, 2020). Associado a isso, a dificuldade de mensuração e a percepção dos diversos setores da economia e da sociedade deste recurso como um recurso infinito faz com que muitas vezes este recurso seja superexplorado, tornando imprescindível a adoção de mecanismos que auxiliem em sua gestão (ANA, 2020; VILLAR; HIRATA, 2022).

É cada vez mais comum o emprego de recursos tecnológicos como técnicas de geoprocessamento e análises multicritério como instrumento de apoio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos (DÍAZ-ALCAIDE; MARTÍNEZ-SANTOS, 2019; NAGHIBI; AHMADI; DANESHI, 2017; RAHMATI; POURGHASEMI; MELESSE, 2016). Nesse sentido, a utilização de ferramentas GIS torna-se de grande importância para a compreensão das áreas mais favoráveis a recarga, principalmente em locais com poucos dados disponíveis e topografia complexa (THAN et al., 2022).

Ao incorporar diferentes elementos geológicos, topográficos e de uso e cobertura do solo, essas ferramentas tornam-se importantes instrumentos auxiliares na gestão deste recurso, sendo fundamentais na identificação de zonas mais favoráveis ao processo de recarga hídrica, tornando-se uma ferramenta muito útil para compreensão da distribuição espacial dos recursos hídricos subterrâneos, possibilitando, também, a identificação dos fatores que afetam a sua disponibilidade e dos locais com potencial de poluição (MARÉCHAL et al., 2006).

É crescente a utilização das análises de decisão multicritério, contribuindo para a avaliação qualitativa e/ou quantitativa em estudos ambientais (CARDOSO et al., 2009). Essas técnicas são importantes para o processo de tomada de decisão em estudos com um grande número de informações, reduzindo a sua subjetividade, além de facilitar a estruturação e análise dos dados (HUANG; KEISLER; LINKOV, 2011; OKAWA et al., 2021). A Análise Hierárquica de Processos (AHP) introduzida por Saaty (1977) é consolidada como uma das principais ferramentas de análise multicritério, sendo empregada em estudos de natureza diversa e que envolvam tomadas de decisões complexas, com utilização crescente em estudos ambientais, incluindo mapeamento das zonas de potencial de recarga em diversas partes do mundo (DARKO et al., 2019; RAHMATI et al., 2015).

Diante disso, este estudo busca investigar a formação das zonas de recarga de aquíferos subterrâneos na bacia do Rio Grande em Minas Gerais, utilizando técnicas de análise geoprocessamento e sensoriamento remoto, a fim de compreender a distribuição espacial das zonas de recarga hídrica em diferentes regiões da bacia.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Importância das Zonas de Potencial de Recarga

A recarga de águas subterrâneas é definida como a entrada (infiltração) de água no solo, por unidade de área, proveniente principalmente das chuvas não absorvida pelas plantas e evaporação, que atinge os aquíferos livres ou zona saturada do solo (FREEZE; CHERRY, 1979).

Ao consultarmos a literatura, observa-se que não há uma definição clara do conceito de zonas de potencial de recarga, sendo este um conceito genérico e que depende do objetivo de cada estudo (THANH et al., 2022). Costa et al. (2019b) define as zonas de recarga de águas subterrâneas como os locais onde a superfície do terreno favorece a entrada e percolação da água através do solo ou rocha. Por sua vez, de acordo com Thanh et al. (2022), o conceito de potencial de recarga de águas subterrâneas também pode ser entendido como “o volume de águas subterrâneas que pode ser retirado de um aquífero para uma finalidade específica, sem afetar a produção e a qualidade das águas subterrâneas de um aquífero”.

A ocorrência e o movimento das águas subterrâneas são influenciados por aspectos climáticos, hidrológicos e geofísicos. Nesse sentido, a recarga é maior em: 1) áreas com clima úmido e que apresentam solo ou rochas permeáveis; 2) áreas com clima úmido e que apresentam solo e rochas permeáveis (AHMED; ALRAJHI; ALQUWAIZANY, 2021; FITTS, 2015). Com relação aos aspectos hidrológicos e geofísicos, diferentes parâmetros como litologia, classes de solo, declividade, densidade de drenagem, densidade de lineamento e uso e ocupação são essenciais para compreensão deste processo (LENTSWE; MOLWALEFHE, 2020).

Os parâmetros influenciam em diferentes escalas as características das águas subterrâneas, incluindo a recarga hídrica. Para tanto, é necessário considerá-los para uma melhor compreensão do processo de recarga (COSTA et al., 2017). De acordo com a classificação do referido autor, é necessário realizar a ponderação de algumas variáveis ambientais, como: a) litologia, b) classe de solo c) declividade. Estas devem considerar os seguintes critérios:

A) Litologia: a capacidade das rochas em fornecerem nutrientes e a susceptibilidade aos processos do intemperismo para rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Segundo Kist (2022), a litologia está associada à estruturação dos derrames de lavas, visto que as estruturas de resfriamento ou primárias, quando interligadas a um sistema de fraturas tectônicas, podem influenciar na circulação de águas subterrâneas.

B) Tipo de solo: propriedades físicas e químicas (fertilidade do solo). Segundo Garcez e Alvarez (1988) e Lepsch (2011), depois da infiltração de água no solo, as propriedades físicas dos solos como textura, estrutura, porosidade e profundidade, assim como sua qualidade e a forma como os horizontes estão dispostos no perfil do solo influenciam na retenção e movimentação de água no solo. Nesse sentido, solos mais porosos, com material de origem em que as partículas apresentam maior dimensão ou aqueles de maior estado de fissuração geralmente apresentam uma maior capacidade de infiltração.

C) Declividade: a velocidade de escoamento, o tempo de oportunidade de infiltração de água e o tipo de fluxo do escoamento hídrico em cada forma de relevo. A declividade está relacionada com o fluxo e direcionamento da infiltração de água. Em locais com declividade muito acentuada, o escoamento pluviométrico é favorecido e em consequência há baixa infiltração de água, resultando em uma menor recarga. Por sua vez, áreas com declives baixos são consideradas muito boas para (alta) infiltração, pois proporcionam o acúmulo da água superficial e aumentam a infiltração, enquanto áreas com declives moderados são consideradas "boas" (AL-DJAZOULI et al., 2021; MENEZES et al., 2009). Além disso, a declividade possui relação direta com os processos de formação do solo, onde declividades mais acentuadas favorecem a remoção de solo da superfície por erosão, ocasionando menor espessura do solum (CURI et al., 2017).

Com relação à densidade de drenagem, é este o parâmetro que controla a eficiência de escoamento. Segundo Strahler (1964), a densidade de drenagem refere-se à relação entre o comprimento total dos canais de drenagem e a área total da bacia. Os maiores valores de densidade de drenagem são obtidos em regiões semiáridas, com precipitação anual média entre 400 mm a 600 mm. A densidade de drenagem tem pouco desenvolvimento nas regiões de clima árido pelo, pela falta de água de escoamento superficial, enquanto que regiões com elevada precipitação média anual (> 600 mm) a densidade é menor em função da retenção do escoamento superficial efetuada pelas raízes e pelos troncos da vegetação (FEITOSA et al., 2008). Sendo assim, este parâmetro é considerado uma função inversa da permeabilidade, sendo influenciado também pela topografia, declividade e características do subsolo. Para locais de alta densidade de drenagem, o escoamento superficial é favorecido e conseqüentemente a infiltração é menor e há uma possibilidade de baixa disponibilidade de água subterrânea. Nesse sentido, os pesos mais altos são atribuídos à área de baixa densidade de drenagem e vice-versa (RAJAVENI; BRINDHA; ELANGO, 2017; SARAVANAN et al., 2020; VARGAS et al., 2023).

Com relação ao uso e ocupação do solo, segundo Giampá e Gonçales (2013) “A magnitude da recarga depende das condições de infiltrabilidade, impostas pelas condições de uso e ocupação do território e pelas condições de ocorrência dos corpos aquíferos”. Agarwal e Garg (2016) complementam que este componente está relacionado com o escoamento superficial, a evapotranspiração e a recarga das águas subterrâneas.

## **2.2 Importância da estimativa**

As águas armazenadas em subsuperfície possuem seu destaque e importância devido à sua importância para o abastecimento (abastecimento de água às famílias, à agricultura e à indústria), por fornecer serviços regulatórios (capacidade de amortecimento dos aquíferos) e de apoio (prevenção de subsidência de terras), além da sua importância sociocultural (banhos termais). Por isso, a quantificação das águas subterrâneas está em pauta em nível global, por ser essencial para implementar políticas de forma a mitigar os impactos de sua superexploração e poluição, tendo em vista a crescente dependência deste recurso diante da conjuntura da expansão da urbanização e do crescimento populacional, assim com os impactos das alterações climáticas (CUTHBERT et al., 2019; ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E CULTURA - UNESCO, 2022; VILLAR, 2016).

Os países localizados na Ásia e no Pacífico respondem por mais de 60%, do total de água subterrânea retirada no mundo. Nos países latino-americanos e no Caribe as águas subterrâneas são reconhecidas por sua relevância ambiental, uma vez que descarregam cerca de 3.700 km<sup>3</sup>/ano nos rios da região. Isso se reflete em 10.200 metros cúbicos anuais de recursos renováveis de águas subterrâneas por pessoa, representando um pouco mais de 33% da média anual per capita de água na região (UNESCO, 2022; WILLAARTS; GARRIDO; LLAMAS, 2014).

Em nível global, as águas subterrâneas podem ser empregadas de diversas formas, sendo a maior utilização para agricultura. O Brasil detém a maior reserva de águas subterrâneas renováveis da América Latina, com uma capacidade de armazenamento de 1.874 km<sup>3</sup>/ano (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2013). O uso agropecuário e consumo humano são as principais formas de utilização deste recurso, as quais representam mais de 50% do consumo total. Além disso, também pode ser utilizado como abastecimento complementar em algumas regiões; no entanto, é quase sempre a única opção disponível na maioria das zonas rurais ou periferias, constituindo-se a única fonte

disponível de água em quase 40% dos municípios brasileiros (ANA, 2020; HIRATA et al., 2019; VILLAR, 2016).

A disponibilidade de água subterrânea não ocorre de maneira uniforme no território. As águas subterrâneas são extraídas através de perfuração de poços ou aproveitamento direto das nascentes (HIRATA et al., 2019). No Brasil, a exploração deste recurso é caracterizada por ser realizada, na maioria das vezes, de maneira empírica, sendo que o volume retirado corresponde a 1.083,3 m<sup>3</sup>/s dos 13.205 m<sup>3</sup>/s disponíveis. Para o ano de 2021, o número de poços registrados (347.095) era muito inferior ao número de poços estimado (2,6 milhões de poços), o que indica que o volume de água captado possa ser muito superior em consequência da proliferação de poços não registrados (ANA, 2022).

O desconhecimento dos usuários cadastrados implica em desconhecimento das disponibilidades das águas subterrâneas, como a localização e volumes disponíveis das reservas; taxas de uso e vulnerabilidade. Além disso, a falta de dados sobre a acessibilidade (falta de redes de monitoramento, dados sobre a localização, litologia e qualidade das águas) e a gestão desse recurso são essenciais para a aplicação de ações de priorização e de gestão conservadoras. Em locais onde as águas subterrâneas constituem-se a principal fonte de suprimento hídrico, o conhecimento dos locais mais propensos à exploração pode potencializar a sua exploração, assim como reduzir problemas frequentes como a interferência entre poços e diminuição dos fluxos fundamentais dos rios (GOETTEN, 2015; MELO et al., 2013; MOISA et al., 2023; REBOUÇAS, 2002).

### **2.3 Formas da estimativa**

Estimar com precisão a recarga hídrica é um grande desafio. No entanto, sua estimativa associada à compreensão da sua variabilidade espacial e temporal são parâmetros críticos para a gestão da água (SANTAROSA et al., 2021; SCANLON; HEALY; COOK, 2002).

A avaliação das características das águas subterrâneas pode ser alcançada através de métodos diretos e indiretos, como técnicas geofísicas, hidrogeológicas, geológicas, de perfuração, sensoriamento remoto e geoprocessamento. Para escolha do melhor método deve-se levar em consideração a facilidade de aplicação dos métodos; disponibilidade dos dados; custo; escalas de tempo e espaço utilizadas e disponibilidade de profissionais (KUMAR; MONDAL; AHMED, 2020; SCANLON; HEALY; COOK, 2002; YEH et al., 2016).

Ferramentas computacionais e técnicas de geoprocessamento integrado com análises multicritério e algoritmos de aprendizado de máquina têm sido empregadas para delinear

regiões potenciais de águas subterrâneas em várias partes do mundo, tornando-se um importante instrumento para gestão deste recurso, mesmo em áreas remotas (HACHEM et al., 2015; JHA; CHOWDARY; CHOWDHURY, 2010).

De acordo com Kaewdum e Chotpantarat (2021) e Al-Djazouli et al. (2021), os mapas de potencial de recarga permitem: i) prospecção de locais de perfuração de poços de águas subterrâneas; ii) entender melhor a disponibilidade e os locais de maior probabilidade de descoberta das reservas hídricas subterrâneas; iii) recomendação dos locais onde podem ocorrer os maiores rendimentos; e iv) fornecimento de dados para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos.

De acordo com Thanh et al. (2022), em função das diferentes condições naturais, sociais e climáticas existentes nos diferentes países, não há um modelo universal que permita realizar o mapeamento das zonas de potencial de recarga ao redor do mundo. Sendo assim, diferentes modelos têm sido empregados para um mapeamento mais preciso do potencial de recarga de águas subterrâneas (ABIJITH et al., 2020; KUMAR; KRISHNA, 2018).

1. Modelos de decisão multicritério (MCDM): é uma ferramenta eficaz para a tomada de decisão para o problema que envolve muitos fatores de influência (CHENINI; MAMMOU; EL MAY, 2010). Como exemplo, têm-se as análises *Analytical Hierarchy Process* (AHP) e *Influencing Factor* (IF).

2. Modelos probabilísticos (PM): *BS model* e *Logistic Regression Model* (LR).

3. Estatísticas bivariadas (MS): Os métodos estatísticos bivariados apresentam algumas desvantagens para medir a relação entre fatores condicionantes e ocorrência de águas subterrâneas, devido à definição de pressupostos estatísticos antes do estudo. Como exemplo, têm-se as análises *Frequency Ratio Model* (FR) e *Evidential Belief Function* (EBF).

4. Modelos de mineração de dados e aprendizado de máquina. Alguns modelos como *artificial neural network* (RNA); *boosted regression tree* (BRT); *random forest* (RF); *decision tree* (DT); *hybrid genetic algorithm* (HGA), *self-adaptative hybrid genetic algorithm* (SAHGA), *fisher's linear discriminant function* (FLDA), *least-square support vector machine* (LSSVM), *extreme learning machine* (ELM) e *support vector machine* (SVM) foram alguns métodos adotados para um mapeamento mais preciso do potencial das águas subterrâneas em várias regiões do mundo. De acordo com Thanh et al. (2022), apesar de utilizados para o mapeamento das zonas de recarga, são necessários grande quantidade de dados para treinar e testar os modelos de aprendizado de máquina.

Geralmente, a acurácia dos modelos estatísticos comuns varia de aproximadamente 59,0% a 90,3%, enquanto que em modelos comuns de aprendizagem de máquina variam de 50,0% a 90,1% (THANH et al., 2022).

## 2.4 Análise Hierárquica de Processos (AHP)

A metodologia Análise Hierárquica de Processos - AHP proposta por Saaty (1980) é consolidada como o principal procedimento de análise multicritério. Esta importante ferramenta matemática permite confrontar diferentes alternativas (ou cenários), por meio da comparação pareada entre elas, fundamentada em vários critérios, com o propósito de simplificar o processo de tomada de decisão em situações de resolução de problemas que envolvam múltiplas alternativas, podendo ser empregada para realização de estudos de zonas potenciais de águas subterrâneas (AGUARÓN et al., 2020; MARINS; SOUZA; BARROS, 2009; ROY, 1996).

A aplicação da metodologia AHP segue alguns passos (SAATY, 1977):

1. Elaboração do problema e escolha dos fatores que influenciam o resultado.
2. Definição da estrutura de hierarquia e da matriz de comparação pareada.
3. Execução dos julgamentos com base na opinião de especialistas e atribuição dos pesos subjetivos de acordo com a escala de importância, sendo as classificações mais altas atribuídas aos parâmetros que têm uma influência mais significativa no resultado em comparação com o outro parâmetro considerado.
4. Validação da consistência da matriz, a fim de apurar a confiabilidade dos dados. Utiliza-se o Quociente de Consistência (QC), o qual expressa a razão entre o Índice de Consistência (IC) e a Razão de Consistência (RC). Valores acima de 0,1 indicam a necessidade de uma reavaliação dos pesos atribuídos pelos observadores.

Estudos têm aplicado a metodologia AHP em conjunto com sistemas de informações geográficas (SIG) para o mapeamento de zonas de recarga no mundo (ARULBALAJI; PADMALAL; SREELASH, 2019; DAR; RAI; BHAT, 2021; KUMAR; MONDAL; AHMED, 2020; MURMU et al., 2019; RATHER et al., 2022).

Al-Djazouli et al. (2021) utilizou a metodologia AHP para realizar o mapeamento das zonas de potencial de recarga em regiões áridas; no entanto, mencionam que a qualidade dos mapas gerados pode ser influenciada pela escolha dos fatores e seu peso. Akbari et al. (2021) utilizou dez camadas temáticas para composição do mapa de potencial de recarga no Iran e comparou diferentes técnicas (*Best–Worst Method* - BWM e *Full Consistency Method* - FOCUM) para o mapeamento. “Baixo”, “Moderado”, “Alto” e “Muito alto” foram as classes

obtidas. As áreas indicadas pela técnica AHP concentraram-se na classificação “muito alto potencial de recarga” e houve uma maior oscilação entre a menor e a maior classificação quando comparadas às demais técnicas. Jothibasú e Anbazhagan (2016) mapearam as zonas de recarga no Sul da Índia e utilizaram os poços de água subterrânea já conhecidos para validação do mapa e obtiveram uma acurácia de 76,90%. Com a utilização da metodologia aplicada juntamente com os índices utilizados, os autores concluíram que o potencial das águas subterrâneas pode ser avaliado por através desta ferramenta.

No Brasil, estudos utilizaram a metodologia AHP em conjunto com técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto para estudos envolvendo para realizarem o mapeamento dos recursos hídricos subterrâneos. Costa et al. (2019a) utilizou a metodologia AHP para realizar o mapeamento de áreas de maior aptidão agrícola no Estado de Minas Gerais. Baseado na atribuição de pesos, cada mapa temático que afetava a distribuição das áreas de aptidão foi agrupado para geração do mapa final. As áreas foram agrupadas em cinco diferentes classes: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto e concluiu-se que a metodologia foi adequada para realização do estudo.

Alves (2021) utilizou AHP em conjunto com Combinação Linear Ponderada (CLP) em SIG para recomendação de áreas de potencial de recarga gerenciada de aquíferos no estado da Paraíba. A partir da combinação dos diferentes critérios (uso e cobertura do solo, geologia, pedologia, profundidade do lençol freático, distância a partir dos rios, elevação e declividade do terreno), concluiu-se que aproximadamente 51,54% da área de estudo possui um potencial alto e muito alto para recarga com águas dos rios da região.

### **3 OBJETIVO**

#### **3.1 Objetivo geral**

Investigar a formação das zonas de recarga de aquíferos subterrâneos no território na bacia do Rio Grande em Minas Gerais, utilizando técnicas de análise geoprocessamento, a fim de compreender a distribuição espacial das zonas de recarga hídrica em diferentes regiões da bacia.

#### **3.2 Objetivos específicos**

1. Identificar as zonas de recarga de aquíferos subterrâneos usando uma abordagem integrada que leva em consideração as camadas de litologia, uso do solo, classe de solo, densidade de drenagem e declividade;
2. Aplicar a Análise Hierárquica de Processos (AHP) para determinar os pesos relativos dos fatores influenciadores, investigando os diferentes fatores na distribuição espacial das zonas de recarga;

#### **4 JUSTIFICATIVA**

A escolha do tema justifica-se devido à sua relevância, uma vez que pode ser um instrumento com potencial para gerir de forma mais eficaz e sustentável os recursos hídricos subterrâneos na bacia do Rio Grande, uma das principais bacias do Estado, com destaque à sua importância estratégica para a geração de energia. A exploração desse recurso frequentemente ocorre de maneira empírica, e as dificuldades de mensuração utilizando métodos tradicionais representam desafios consideráveis para os gestores que buscam uma utilização sustentável deste recurso.

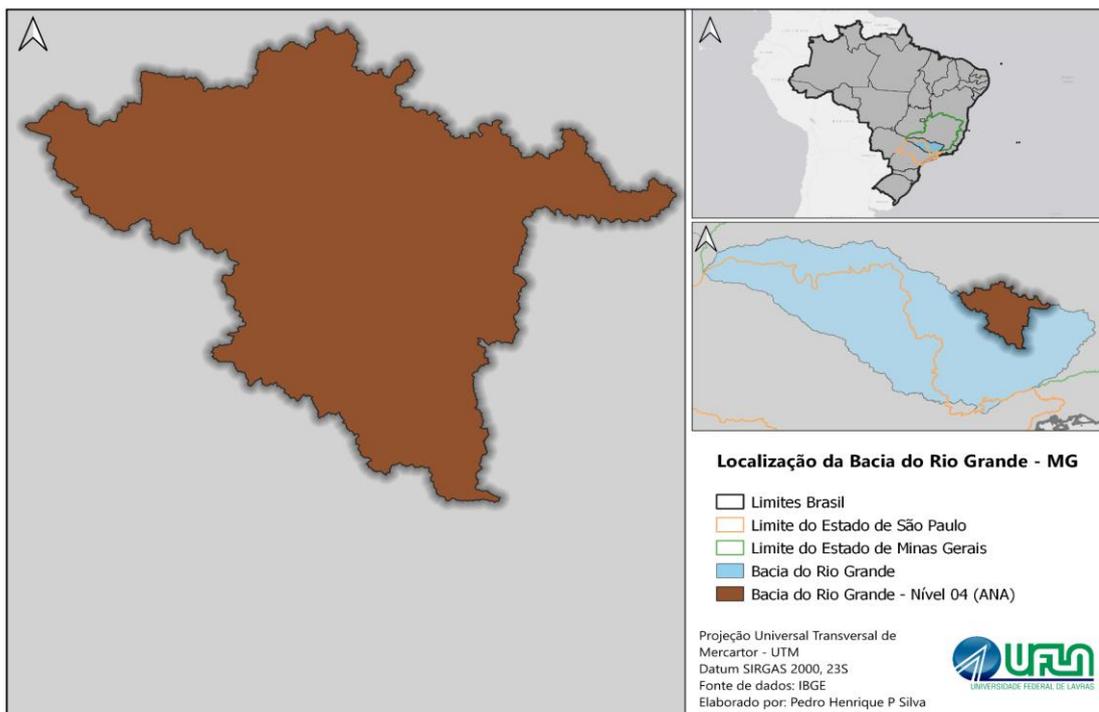
Nesse contexto, mapear as áreas de recarga hídrica no contexto da bacia do Rio Grande é de grande importância para o entendimento da distribuição espacial das áreas mais favoráveis para a recarga hídrica, podendo contribuir para um ordenamento territorial mais eficiente. Isso permitiria direcionar esforços para a preservação das regiões onde a recarga hídrica possui maior potencial, reduzindo a exploração excessiva, evitando a exaustão dos aquíferos, além de reduzir a sua contaminação.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Área de estudo

A bacia do Rio Grande encontra-se inserida na região centro-sul do Estado de Minas Gerais, abrangendo 47 municípios (Figura 1). Possui área total de 11.091,61km<sup>2</sup> e perímetro de 936 Km, e está inserida em uma região de transição entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica. A bacia encontra-se inserida na macrorregião hidrográfica do Paraná, situada em uma região de aquíferos porosos, representada pelos aquíferos Barroso e Fraturado Centro-Sul. A maior porção da bacia é recoberta pelo clima CWb, o qual é caracterizado por invernos frios e secos e verões quentes e úmidos, apresentando temperatura média anual entre 18°C a 20°C, e pluviosidade média anual é de 1570 mm; a outra porção apresenta clima Cwa, com temperaturas inferiores a 18°C) e verão quente (com temperaturas superiores a 22°C e e precipitação média anual de 1500 mm (ALVARES et al., 2013).

**Figura 1 - Bacia do Rio Grande em Minas Gerais.**



Fonte: Do Autor (2023).

## **5.2 Coleta e Pré-Processamento de dados**

De acordo com Florenzano (2016) o pré-processamento consiste em uma etapa preliminar, que tem como objetivo realizar o tratamento dos dados brutos e, dentre outras aplicações, é responsável pela eliminação do efeito da topografia nas imagens. Para a elaboração dos mapas de potencial de recarga e para realização das operações de geoprocessamento foi utilizado o Hardware notebook Intel Core i7, 16 GB de RAM e SSD de 512GB e o software QGIS versão 3.28 utilizando o complemento SAGA (Sistema de Informações Geocientíficas Avançado).

Os dados foram coletados a partir de fontes disponíveis nos meios eletrônicos, nos formatos vetorial e raster, conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1** - Fontes de aquisição dos dados.

<b>Informação</b>	<b>Local</b>	<b>Escala/Resolução</b>	<b>Formato</b>
Cobertura vegetal e uso do solo	Map Biomas coleção beta	10 x 10 m	Raster
Litologia	Portal da Geologia	1:1.000.000	Vetorial
Altimetria	Modelo Digital de Elevação (MDE) COP30 - Copernicus DEM	30 x 30 m	Raster
Classes de solo	Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais	1:650.000	Vetorial
Limite Territoriais e Unidades da Federação	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE	1:250:000	Vetorial
Limites da bacia do Rio Grande	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA	1:50.000	Vetorial

Fonte: Do Autor (2023).

Em seguida, realizou-se o pré-processamento dos dados com a reprojeção das camadas para o sistema policônico EPSG: 31983 SIRGAS 2000/ 23S e correção da geometria dos arquivos em formato vetorial.

### **5.3 Confeção dos mapas**

#### **5.3.1 Classe de solo e litologia**

Os mapas de solos e litologia foram feitos seguindo as mesmas etapas. Inicialmente, realizou-se a correção das geometrias (*caixa de ferramenta de processamento > vetor > corrigir geometrias*) e em seguida o recorte dentro da área de estudo através da ferramenta “recortar” (*caixa de ferramenta de processamento > sobreposição de vetor > recortar*). Os pesos atribuídos às diferentes classes de solo foram feitos de acordo com o proposto por Costa et al. (2017).

Para o mapa de solos, foi feita a classificação de acordo com o primeiro nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 1999). Para o mapa dos litotipos, foi feita uma adaptação nos pesos dos litotipos propostos na classificação de Costa et al. (2017), no qual realizou-se o agrupamento dos litotipos cuja a área ocupava uma porção inferior a 0,8% do território, sendo estes litotipos classificados como “outros”, os quais incluem argilito, charnockitóides, complexo máfico-ultramáfico, filito, granada, intrusivas ácidas a intermediárias, meta-arenito, metadiamicrito, metavulcânica, silimanita e tonalito. Para atribuição do peso a esta classe, foi feita a média dos pesos das respectivas classes que estavam incluídas nesta classificação. Outra adaptação refere-se à atribuição dos pesos às classes de litotipos não listadas na classificação de Costa et al. (2017) e encontradas na bacia do Rio Grande. Para estes casos, os litotipos receberam pesos baseados no litotipos com características parecidas e que possuía correspondência na tabela proposta pelo autor supracitado.

#### **5.3.2 Declividade**

O mapa de declividade foi gerado a partir do modelo digital de elevação recortado para a área de estudo por meio da ferramenta “recortar máscara pela camada de máscara”, por meio do complemento GDAL. O cálculo da declividade foi feito através da ferramenta “declive” (*caixa de ferramenta de processamento > raster > declive*). Os intervalos de relevo foram

agrupados de acordo com a classificação da Embrapa (1999), sendo elas relevo plano (0 - 3%); suave ondulado (3 a 8%); ondulado (8 - 20%); forte ondulado (20 - 45%) e montanhoso à escarpado (acima de 75%). Nesta classificação, realizou-se uma adaptação às fases de relevo proposta pela Embrapa, no qual as classes montanhosas (45 a 75% de declividade) e escarpado (> 75%) foram agrupadas, conforme proposto por Costa et al. (2017).

### 5.3.3 Uso e ocupação do solo

O mapa de uso e ocupação de solo foi feito a partir das informações disponíveis do MAP BIOMAS. O recorte da camada raster dentro da área de estudo foi realizado no Google Earth Engine. A camada raster foi reprojetaada com auxílio da ferramenta “reprojetar camadas raster” (*caixa de ferramenta de processamento > reprojetar camadas raster > projeções > reprojetar coordenadas*), através do complemento GDAL e em seguida foi feita a categorização dos dados segundo a classificação do MAP BIOMAS com base nas simbologias disponíveis para o 1º nível categórico através da ferramenta “reclassificar por tabela” (*análise raster > reclassificar por tabela*).

### 5.3.4 Densidade de drenagem

O mapa de densidade de drenagem foi obtido a partir do modelo digital de elevação. Realizou-se o preenchimento das falhas do MDE por meio da ferramenta *r.fill.dir*, a fim de torná-lo hidrologicamente consistente. Em seguida, as redes de drenagem foram extraídas por meio da ferramenta *r.stream.extract* e convertidas para vetor por meio da ferramenta *r.to.vect*. Todas as ferramentas descritas neste item estavam disponíveis no complemento GRASS (Sistema de Suporte para Análise de Recursos Geográficos).

Para geração da densidade de drenagem, foram necessárias as seguintes etapas.

1. Criação de grids de 15km x 15km por meio da ferramenta “criar grade” (*caixa de ferramentas de processamento > criação de vetor > criar grade*);
2. Os grids foram recortados para dentro da bacia por meio da ferramenta “recortar” (*caixa de ferramentas de processamento > sobreposição de vetor > recortar*);
3. Foi realizada a interseção da rede de drenagem utilizando o shapefile criado no item 2 utilizando-se a ferramenta “interseção” (*caixa de ferramentas de processamento > sobreposição de vetor > interseção*);

4. As camadas foram dissolvidas utilizando a ferramenta “dissolver” (*caixa de ferramentas de processamento > geometria do vetor > dissolver*);
5. Com base no shape criado no item 4, foi calculado o comprimento das redes de drenagem dentro de cada grid. Para isso, foi utilizada a tabela de atributos, sendo o comprimento calculado em quilômetros;
6. O shape criado no item anterior foi unido ao shape da bacia criado no item 2 por meio da ferramenta “unir atributos pelo valor do campo” (*caixa de ferramentas de processamento > vetor geral > Unir Atributos pelo valor do campo*). Em seguida, foi utilizada a tabela de atributos para o cálculo da área em Km<sup>2</sup> para cada grid. Dentro da mesma camada vetorial, foi feito o cálculo da densidade de drenagem, o qual foi feito realizando-se a divisão dos comprimentos das redes de drenagem pela área do grid, gerando assim a densidade de drenagem;
7. Com base no shape gerado no item 6, foram gerados centróides por meio da ferramenta “centróide” (*geometria do vetor > centróide*);
8. Por fim, foi feita pela Ponderação do Inverso da Distância (IDW) dos pontos da camada gerada no item 7 utilizando a ferramenta “interpolador” (*caixa de ferramentas de processamento > Interpolador > Interpolação IDW*).

### **5.3.5 Potencial de recarga**

Os mapas em formato vetorial foram convertidos para formato raster através da ferramenta “converter vetor para raster”, através do complemento GDAL (Biblioteca de Abstração de Dados Geoespaciais). Em seguida, realizou-se a ponderação das diferentes camadas temáticas e seus respectivos atributos através da ferramenta “reclassificar por tabela” (*caixa de ferramentas de processamento > análise raster > reclassificar por tabela*). Os graus de importância foram diferentes em relação às diferentes classes, sendo estes definidos a partir da metodologia AHP. Por fim, realizou-se a álgebra de mapas através da ferramenta “raster calculator” (*caixa de ferramentas de processamento > análise de dados raster > raster calculator*). Os valores dos pesos para cada classe temática foram trabalhados pixel a pixel, segundo a Equação 1, de forma a gerar o valor correspondente ao potencial de recarga.

**Equação 1:**

$$ZPR = [(0,272 \times LIT) + (0,110 \times DEC) + (0,492 \times US) + (0,059 \times CS) + (0,067 \times DD)]$$

(1)

ZPR = zonas de potencial de recarga

LIT = Litologia

DEC = Declividade

US = Uso do Solo

CS = Classe de Solo

DD = Densidade de Drenagem

Foram definidas três classes para representar, qualitativamente, o potencial de recarga para a bacia hidrográfica do Rio Grande. Para valores de AR menores ou iguais a 1,21 a área foi classificada como de baixo potencial, já para valores de AR superiores a 5,24 a área foi classificada como de alto potencial de recarga. Os valores intermediários foram enquadrados na classe de médio potencial de recarga.

**5.4 Análise Hierárquica de Processos (AHP)****5.4.1 Seleção de fatores e elaboração da matriz de comparação pareada**

Os parâmetros que influenciam na distribuição das zonas de recarga, como uso e cobertura do solo, litologia, classe de solo, densidade de drenagem e declividade foram definidos a partir de revisão bibliográfica.

Em seguida, foi elaborada a matriz de comparação pareada. No método AHP, utiliza-se a criação de matrizes de avaliação ou julgamento de pares para assignar ponderações aos fatores geoespaciais de cada categoria (classes dentro dos fatores) e para avaliar o seu valor percebido, empregando a escala de consistência de Saaty (Tabela 2).

Para elaboração da matriz de comparação pareada, os fatores foram dispostos em uma planilha e os pesos atribuídos aos diferentes fatores foram obtidos a partir de uma revisão bibliográfica. Para desenvolver a matriz de comparação pareada, cada fator de deslizamento foi avaliado em relação a todos os outros fatores, atribuindo um valor dominante relativo variando de 1 a 9, de acordo com a importância relativa dos fatores relativos à frequência de deslizamentos (Tabela 2).

**Tabela 2 - Escala de classificação de Saaty.**

<b>Intensidade de importância</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>2,4,6,8</b>
<b>Definição</b>	Igual importância	Importância moderada	Forte importância	Importância muito forte	Extrema importância	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes
<b>Explicação</b>	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo	A experiência e o julgamento favorecem ligeiramente uma atividade em detrimento de outra	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em detrimento de outra	Uma atividade é fortemente favorecida e sua dominância é demonstrada na prática	A evidência que favorece uma atividade em detrimento de outra é a mais elevada possível ordem de afirmação	Quando o compromisso é necessário

Fonte: Do Autor (2023).

#### 5.4.2 Estimativa de pesos relativos

Para elaboração da matriz de comparação pareada, foram estimados os pesos para os parâmetros que afetam o mapeamento do potencial de recarga. A Tabela 3 apresenta a classificação AHP para as diferentes camadas temáticas, na qual cada entrada da matriz representa a influência do fator linha em relação ao fator coluna (LENTSWE e MOLWALEFHE, 2020).

**Tabela 3 – Classificação AHP e pesos para os parâmetros.**

	<b>Solo</b>	<b>Densidade de drenagem</b>	<b>Declividade</b>	<b>Uso e ocupação do solo</b>	<b>Litologia</b>
<b>Solo</b>	1	1/5	1/6	1/4	1/7
<b>Densidade de drenagem</b>	1/5	1/7	1/8	1/3	1/9
<b>Declividade</b>	6	5	1	1/4	1/5
<b>Uso e ocupação do solo</b>	4	1/2	4	1	3
<b>Litologia</b>	7	6	5	1/3	1

Fonte: Do Autor (2023).

Os pesos relativos para as camadas temáticas foram obtidos a partir de revisão bibliográfica, utilizando os trabalhos de Jothibasu e Anbazhagan (2016) e Lentswe e Molwalefhe (2020). Após a elaboração da matriz a partir da utilização dos pesos dos autores supracitados, a matriz foi normalizada, e em seguida foram calculados os pesos para as camadas temáticas. Para tanto, foram calculados os autovetores dividindo os valores da coluna pela soma da coluna da matriz normalizada e depois calculando a média dos valores das linhas (Saaty, 1980).

### 5.4.3 Avaliação da consistência da matriz

Após calculado os pesos às diferentes camadas temáticas, realizou-se a avaliação da consistência da matriz. Para isso, foi feito o cálculo do autovetor e em seguida encontrado o valor do índice de consistência. Por fim, realizou-se o cálculo do quociente de consistência de Saaty, a qual levou em consideração o índice de razão de consistência de Saaty (Tabela 4), sendo encontrado o valor de 0,06. De acordo com Saaty (1980), valores inferiores a 0,1 indicam que a matriz é consistente.

**Tabela 4 – Índice de razão de consistência de Saaty.**

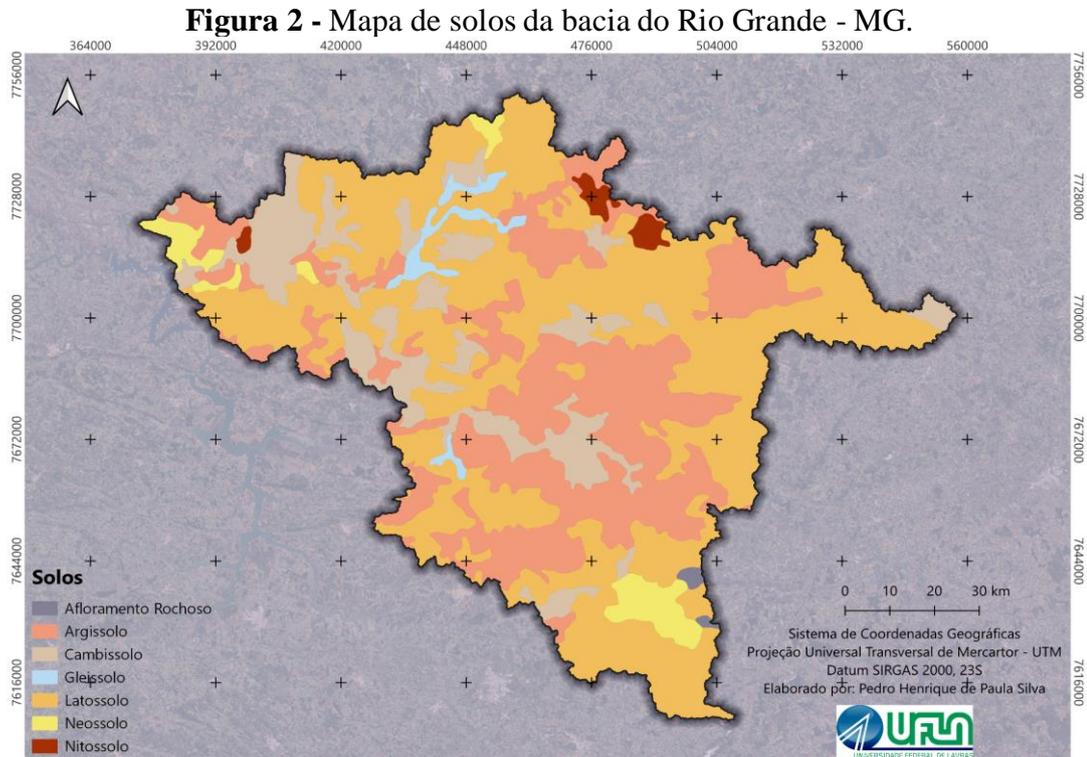
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,00	0,00	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fonte: Saaty (1980).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Solos

A Figura 2 ilustra as classes de solos presentes na bacia do Rio Grande.



A Tabela 5 demonstra os pesos para as diferentes classes de solos e a abrangência geográfica dessas classes dentro da bacia.

**Tabela 5** – Classes de solos, pesos para as diferentes classes de solo e sua expressão geográfica na bacia do Rio Grande - MG.

Classe de solo	Peso	Área	Área (%)
Afloramento Rochoso	1	32,2	0,3
Argissolo	3,7	3279,5	29,6
Cambissolo	3	1512,8	13,6
Gleissolo	2,3	168,4	1,5
Latossolo	4,3	5605,8	50,5
Neossolo	2,7	377,5	3,4
Nitossolo	4,3	115,5	1,0

Fonte: Do Autor (2023).

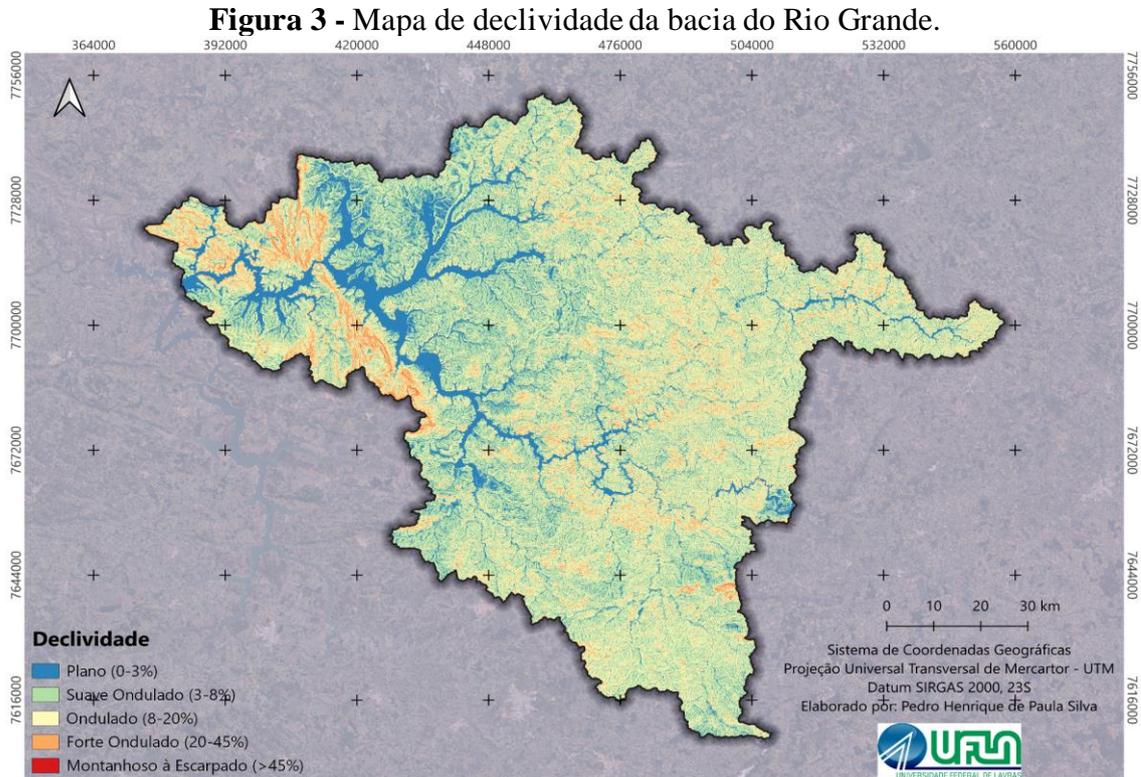
Os atributos físicos do solo como profundidade efetiva e permeabilidade, associadas às características morfológicas favorecem o processo de percolação de água em Latossolos e Nitossolos. Em razão da baixa expressão geográfica na bacia, o potencial de recarga do Nitossolo na área analisada pode ser inferior às demais classes. Observa-se a presença majoritária de Latossolos no local, a qual possui uma representatividade de 50,5% da bacia. A estrutura microgranular, além da elevada porosidade total favorece o processo de infiltração e retenção de água em latossolos (AMARAL et al., 2016). Tais aspectos quando combinados a condições favoráveis de relevo e manejo tornam esses solos os mais indicados para a recarga hídrica (COSTA et al., 2017; MENEZES, 2007).

A classe Argissolo é a segunda classe predominante, ocupando 29,6% da bacia, encontrando-se distribuída ao longo de toda a bacia, a qual ocupa preferencialmente a porção central da bacia. De acordo com Menezes et al. (2009), em solos mais profundos e desenvolvidos pedologicamente há menor impedimento à infiltração, e portanto, podem ter uma maior contribuição para o processo de recarga.

Cambissolos são outra classe predominante, ocupando 13,6% da bacia. Os Cambissolos e os Neossolos possuem uma variabilidade muito alta em função da diversidade do material de origem, da topografia e das condições climáticas e sua avaliação deve levar em consideração as especificidades dos seus locais de ocorrência para um melhor entendimento da sua capacidade de recarga hídrica (COSTA et al., 2017; EMBRAPA, 2018).

## 6.2 Declividade

A Figura 3 ilustra o mapa de declividade da bacia do Rio Grande.



Fonte: Do Autor (2023).

De acordo com a Tabela 6, o relevo mais representativo para a bacia do Rio Grande é o ondulado, o qual possui relevância intermediária para o processo de recarga hídrica de acordo com a classificação de Costa et al. (2017), e ocupa a maior porção da bacia, com 49,2%.

**Tabela 6 - Classes de declividade, pesos entre as classes e expressão geográfica para a bacia do Rio Grande – MG.**

Declividade	Peso	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
Plano (0-3%)	5	1094,8	9,9
Suave Ondulado (3-8%)	4	2025,5	18,4
Ondulado (8-20%)	3	5434,7	49,2
Forte Ondulado (20-45%)	2	2306,4	20,9
Montanhoso à Escarpado (>45%)	1	174,7	1,6

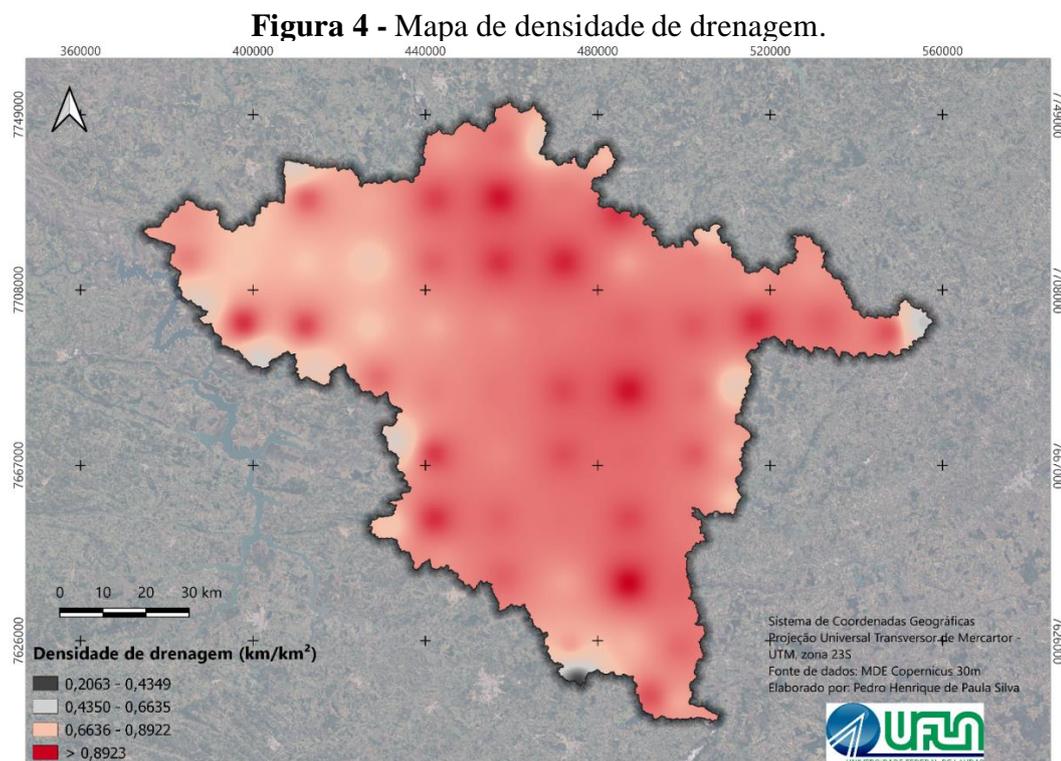
Fonte: Do Autor (2023).

Relevos com declividade até 3% recebe a maior nota em função da maior capacidade de contribuição para o processo de recarga (COSTA et al., 2017). De acordo com o referido autor, o processo de recarga hídrica é favorecido nestas condições em função da menor velocidade de escoamento superficial da água e maior tempo de infiltração. Nesse sentido, a presença destes relevos em solos com maior potencial de recarga como Latossolos e Nitossolos podem favorecer o processo de recarga hídrica na bacia.

### 6.3 Densidade de drenagem

Com base na Figura 4, é possível observar a distribuição espacial da densidade de drenagem ao longo da bacia. Os valores mínimos foram encontrados predominantemente nos municípios de Rezende Costa, São Tiago e Carmo da Cachoeira, indicando uma drenagem pobre nestes locais (VILLELA; MATOS, 1975).

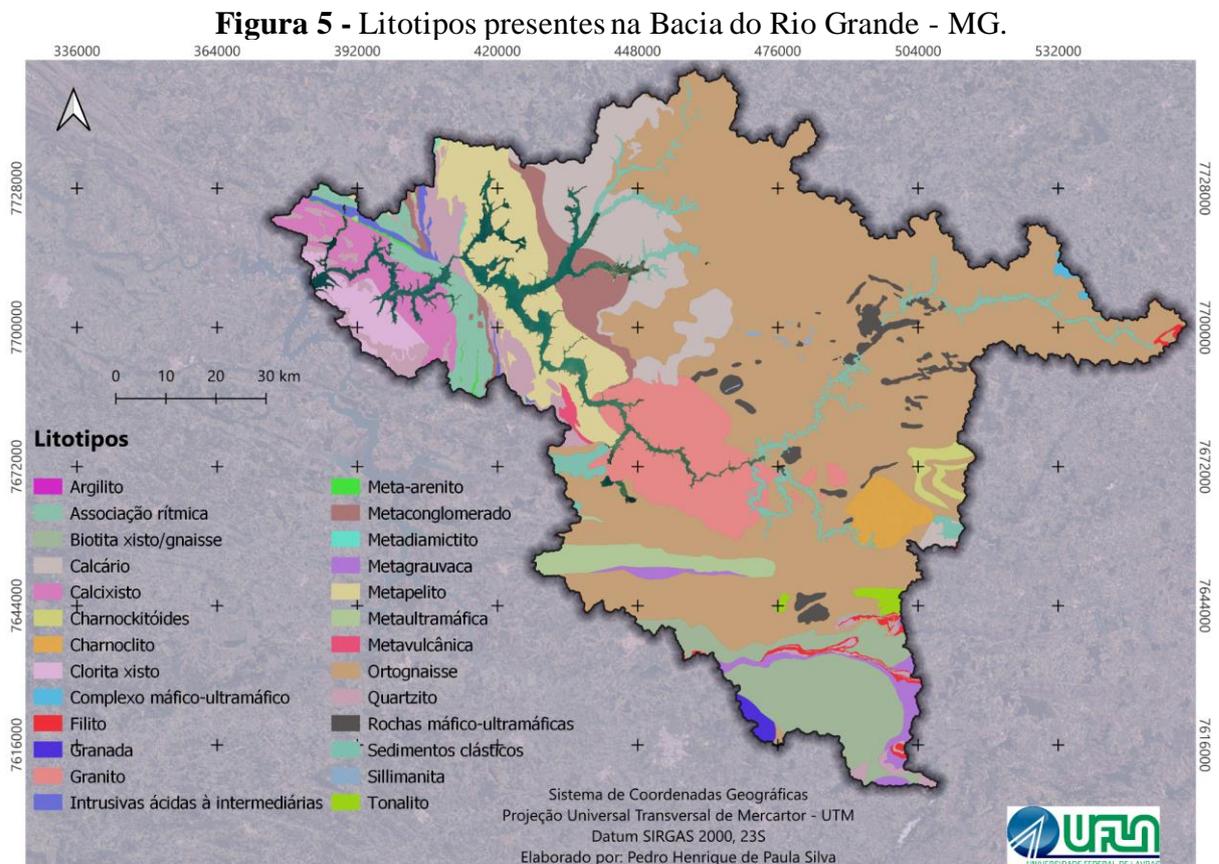
De acordo com a classificação dos autores supracitados, bacias com valores de densidade de drenagem entre 0,5 e 1,5 km/km<sup>2</sup> possuem drenagem regular, enquanto que valores inferiores a 0,5 indica uma drenagem pobre. Com base nisso, é possível observar uma maior abrangência da classe 0,6636 a 0,8922, a qual distribui-se uniformemente ao longo da bacia, caracterizando a maior parte da bacia como drenagem regular.



Fonte: Do Autor (2023).

## 6.4 Litologia

A Figura 5 apresenta os tipos de litotipos presentes na bacia do Rio Grande, o peso para os diferentes litotipos, baseados na classificação de Costa et al. (2017) e a expressão geográfica destes litotipos da bacia.



Fonte: Do Autor (2023).

Observa-se no geral uma maior concentração de litotipos com baixa capacidade contribuição para o processo de recarga hídrica. O litotipo Ortognaisse corresponde à classe com maior expressão na bacia, ocupando uma área de 5231 km<sup>2</sup>, o que corresponde à 48,9% da área total. O calcário apresentou ocupa uma área de 704,5km<sup>2</sup>, o que corresponde a 6,6% da bacia, ocupando preferencialmente a porção norte da bacia (Tabela 7).

**Tabela 7** – Tipos de litotipos, pesos entre os diferentes litotipos e sua expressão geográfica na bacia do Rio Grande.

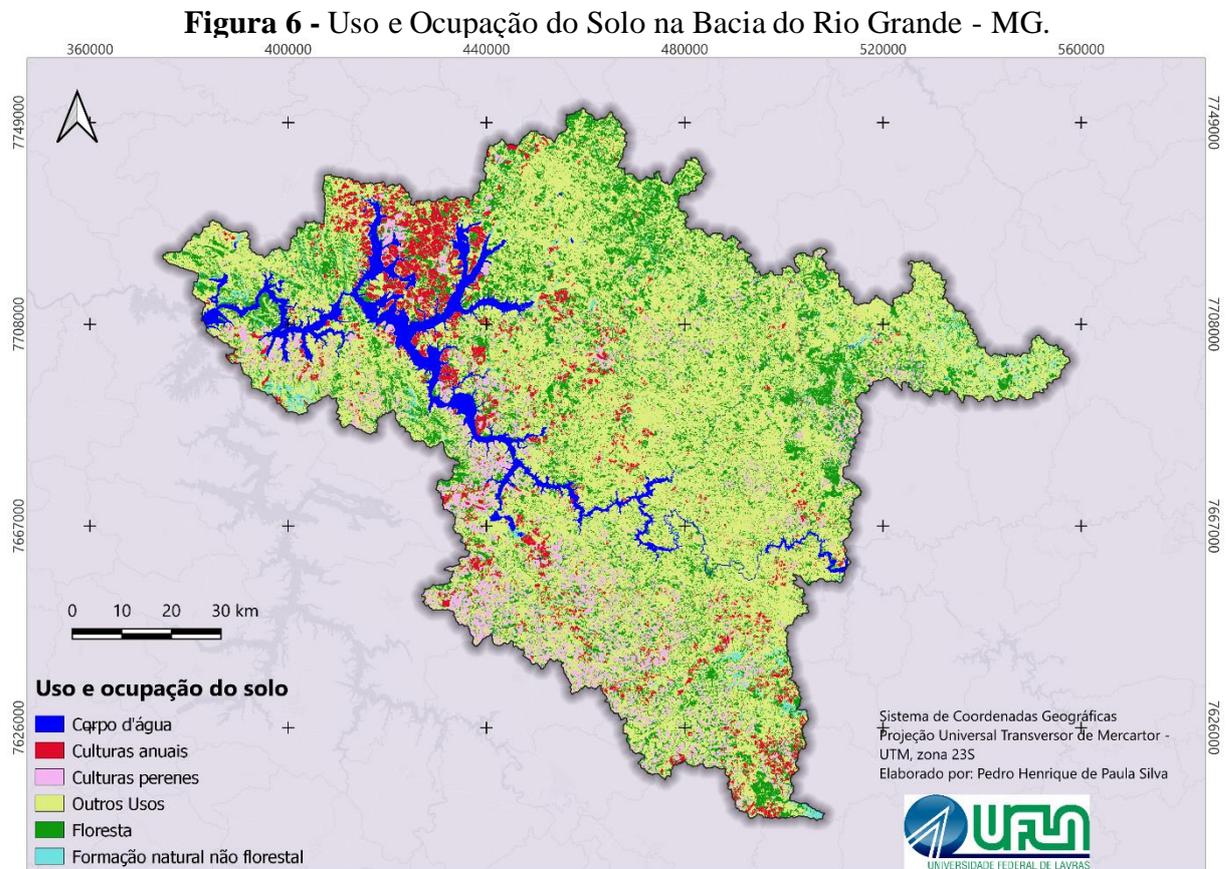
<b>Litotipos</b>	<b>Peso</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>
Associação rítmica	1,2	227,2	2,1
Biotita xisto/gnaisse	1,7	707,7	6,6
Calcário	3,6	704,5	6,6
Calcixisto	5	280,0	2,6
Charnoclitó	1,8	155,2	1,5
Clorita xisto	1,3	165,6	1,5
Granito	1,5	679,6	6,4
Metaconglomerado	1,5	275,5	2,6
Metagrauvaca	1,2	138,8	1,3
Metapelito	1,4	697,5	6,5
Metaultramáfica	2,5	198,7	1,9
Ortognaisse	1,7	5231,0	48,9
Quartzito	1	396,3	3,7
Rochas máfico-ultramáficas	2,4	193,4	1,8
Sedimentos clásticos	1,2	326,0	3,0
Outros	1,7	319,2	3,0

Fonte: Do Autor (2023).

Apesar da sua baixa expressão geográfica, a presença deste tipo de litotipo pode indicar áreas mais favoráveis ao processo de recarga hídrica. De acordo com Costa et al. (2007), litotipos com maiores resistências à denudação e capacidade de fornecimento de nutrientes recebem o maior peso. Por sua vez, o litotipo calcístico recebe a maior nota em função da sua capacidade de fornecimento de nutrientes e resistência à denudação. No entanto, assim como as rochas máficas e ultramáficas, apesar da sua contribuição para a recarga hídrica, ocupam uma área inferior comparado aos demais litotipos, o que pode reduzir a sua contribuição para o processo de recarga hídrica na bacia.

## 6.5 Uso e ocupação do solo

A Figura 6 ilustra o mapa de uso e ocupação do solo na Bacia do Rio Grande.



Fonte: Do Autor (2023).

Com base na Tabela 8, é possível observar a predominância da classe outros usos na bacia. Esta classe é composta por áreas não vegetadas, pastagem e mosaicos de usos e ocupa a maior porção da bacia, abrangendo uma área de 6.602,10 km<sup>2</sup> o que representa 59,6% do uso do solo na bacia.

**Tabela 8 - Uso e ocupação do solo na bacia do Rio Grande - MG.**

Uso e ocupação do solo	Peso	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Culturas anuais	2	635,4	5,7
Culturas perenes	3	839,9	7,6
Corpo D'água	1	558,1	5,0
Floresta	5	2222,0	20,0
Formação natural não florestal	6	225,9	2,0
Outros usos (Área não vegetada, Pastagem, Mosaico de Usos)	4	6602,1	59,6

Fonte: Do Autor (2023).

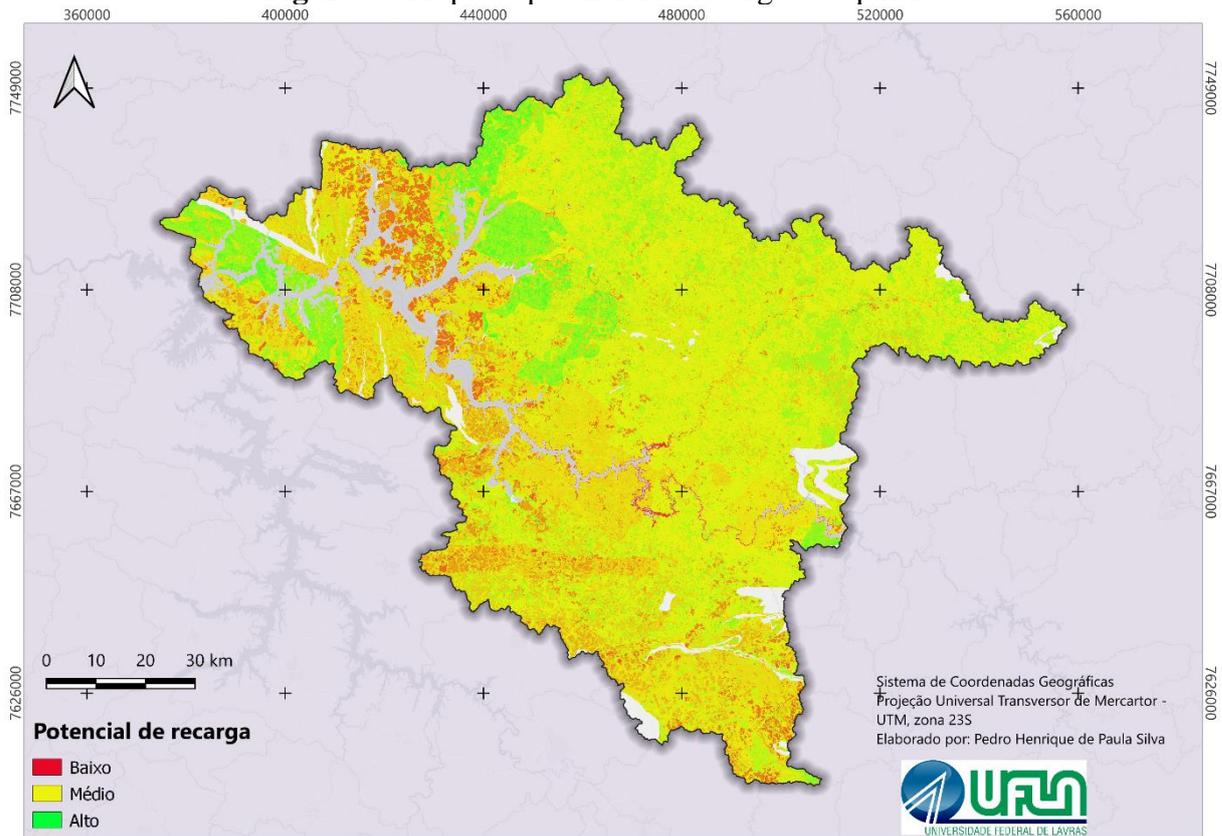
Menezes et al. (2009) ao avaliarem duas nascentes sob pastagem e mata nativa na Serra da Mantiqueira (MG), observaram maiores valores de densidade do solo e redução na condutividade hidráulica para o uso pastagem, evidenciando a contribuição da matéria orgânica para o movimento de água no solo e conseqüentemente para o processo de recarga dos aquíferos. Por sua vez, as áreas florestais são o segundo uso mais representativo, a qual responde por aproximadamente 15,7% da área da bacia, ocupando uma área de 1739,8 km<sup>2</sup>. Santana et al. (2023) ao avaliarem mata nativa, pastagem e plantações de eucalipto observaram menores valores de condutividade hidráulica para pastagem e eucalipto, o que indica a menor contribuição destes usos para a recarga hídrica quando comparado a florestas nativas. De acordo com o autor, em áreas antropizadas as alterações das propriedades físicas do solo resultantes da sua utilização podem provocar a degradação do solo, e conseqüentemente reduzir o potencial de recarga.

## **6.6 Mapa de potencial de recarga**

Os mapas de potencial de recarga foram elaborados a partir da técnica de álgebra de mapas, relacionando a ponderação das diferentes camadas temáticas e seus respectivos pesos, no qual realizou-se a integração das camadas produzidas nos itens anteriores.

Foram confeccionados dois mapas de potencial de recarga a fim de verificar a distribuição espacial das zonas de recarga. Sendo assim, o primeiro mapa foi elaborado combinando-se as camadas classe de solo, declividade, densidade de drenagem, litologia e uso do solo. As zonas de recarga foram classificadas em “Baixa”, “Média”, “Alta” (Figura 7).

**Figura 7 - Mapa de potencial de recarga de aquíferos.**



Fonte: Do Autor (2023).

Com base na Figura 7, observa-se a predominância de classes de baixo a médio potencial de recarga, estando associadas à solos com bom desenvolvimento e porosidade, como Latossolos e Argissolos e litotipos com boa porosidade como calcário, preferencialmente em regiões de relevo plano a suave ondulado e áreas florestais. As áreas de baixo potencial de recarga foram encontradas localizadas na porção noroeste da bacia, a qual corresponde às áreas com relevos mais declivosos da bacia, associadas a regiões de baixa densidade de drenagem. Além disso, é possível observar a não classificação em algumas porções do mapa. Isto ocorreu devido à ausência de dados espaciais para essas regiões, portanto, e, portanto, não foram classificadas.

## 7 CONCLUSÃO

Através da utilização de técnicas de geoprocessamento foi possível elaborar o mapa de potencial de recarga para a bacia do Rio grande, viabilizando análises de resultados com elevados volumes de informação.

A aplicação da análise multicritério através do método do Processo Analítico Hierárquico (AHP), permitiu reduzir a subjetividade dos julgamentos e possibilitou a estruturação do problema por meio de níveis hierárquicos, facilitando assim, a realização de julgamentos consistentes e a definição dos pesos dos critérios e subcritérios para obtenção do objetivo final.

Foi observada a predominância de áreas de baixo a médio potencial ao longo da bacia, com predominância de áreas de alto potencial na região noroeste, associadas a formações florestais, relevos menos declivosos e ao litotipo calcário.

Para verificação das informações obtidas neste estudo, recomenda-se a validação do mapa em campo, a fim de testar a viabilidade da sua aplicação no mapeamento potencial das águas subterrâneas, assim como a viabilidade de sua aplicação para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos na bacia.

## REFERÊNCIAS

- ABIJITH, Devanantham; SARAVANAN, Subbarayan; SINGH, Leelambar; JENNIFER, Jesudasan Jacinth; SARANYA, Thiyagarajan; PARTHASARATHY, K. S. S. GIS-based multi-criteria analysis for identification of potential groundwater recharge zones - a case study from Ponnaniyar watershed, Tamil Nadu, India. **HydroResearch**, [S. l.], v. 3, p. 1–14, 2020. DOI: 10.1016/j.hydres.2020.02.002. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S258975782030007X>.
- AGARWAL, Rajat; GARG, P. K. Remote Sensing and GIS Based Groundwater Potential & Recharge Zones Mapping Using Multi-Criteria Decision Making Technique. **Water Resources Management**, [S. l.], v. 30, n. 1, p. 243–260, 2016. DOI: 10.1007/s11269-015-1159-8. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11269-015-1159-8>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL) - ANA. Catálogo de Metadados da ANA. **Bacias Hidrográficas Ottocodificadas (Níveis Otto 1-7)**. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b228d007-6d68-46e5-b30d-a1e191b2b21f>. Acesso em: 28 nov. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL) - ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020**: informe anual. Brasília: ANA, 2020. 118 p. Disponível em: [https://biblioteca.ana.gov.br/sophia\\_web/acervo/detalhe/87742?guid=1692585630261&returnUrl=%2Fsophia\\_web%2Fresultado%2Flistar%3Fguid%3D1692585630261%26quantidadePaginas%3D1%26codigoRegistro%3D87742%2387742&i=10](https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/87742?guid=1692585630261&returnUrl=%2Fsophia_web%2Fresultado%2Flistar%3Fguid%3D1692585630261%26quantidadePaginas%3D1%26codigoRegistro%3D87742%2387742&i=10).
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL) - ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022**: informe anual. Brasília: ANA, 2023. 105 p. Disponível em: [https://biblioteca.ana.gov.br/sophia\\_web/acervo/detalhe/98553?guid=1701461079196&returnUrl=%2Fsophia\\_web%2Fresultado%2Flistar%3Fguid%3d1701461079196%26quantidadePaginas%3d1%26codigoRegistro%3d98553%2398553&i=3](https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/98553?guid=1701461079196&returnUrl=%2Fsophia_web%2Fresultado%2Flistar%3Fguid%3d1701461079196%26quantidadePaginas%3d1%26codigoRegistro%3d98553%2398553&i=3).
- AGÊNCIA REGIONAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DA BACIA DO RIO GRANDE (ARPA RIO GRANDE). **Bacia Hidrográfica do Rio Grande – BHRG**. [s. d.]. Disponível em: <https://arpariogrande.org.br/bhrg/>. Acesso em: 01 dez. 2023.
- AGUARÓN, Juan; ESCOBAR, María Teresa; MORENO-JIMÉNEZ, José María; TURÓN, Alberto. The Triads Geometric Consistency Index in AHP-Pairwise Comparison Matrices. **Mathematics**, [S. l.], v. 8, n. 6, 2020. DOI: 10.3390/math8060926. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-7390/8/6/926>.
- AHMED, Alaa; ALRAJHI, Abdullah; ALQUWAZANY, Abdulaziz S. Identification of Groundwater Potential Recharge Zones in Flinders Ranges, South Australia Using Remote Sensing, GIS, and MIF Techniques. **Water**, [S. l.], v. 13, n. 18, 2021. DOI: 10.3390/w13182571. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/18/2571>.
- AKBARI, Maryam et al. Identification of the Groundwater Potential Recharge Zones Using MCDM Models: Full Consistency Method (FUCOM), Best Worst Method (BWM) and Analytic Hierarchy Process (AHP). **Water Resources Management**, [S. l.], v. 35, n. 14, p.

4727–4745, 2021. DOI: 10.1007/s11269-021-02924-1. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11269-021-02924-1>.

AL-DJAZOULI, Mahamat Ouchar; ELMORABITI, Karim; RAHIMI, Abdelmejid; AMELLAH, Omayma; FADIL, Omer Abdelrahim Mohammed. Delineating of groundwater potential zones based on remote sensing, GIS and analytical hierarchical process: a case of Waddai, eastern Chad. **GeoJournal**, [S. l.], v. 86, n. 4, p. 1881–1894, 2021. DOI: 10.1007/s10708-020-10160-0. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s10708-020-10160-0>.

ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar; DE MORAES GONÇALVES, José Leonardo; SPAROVEK, Gerd. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [S. l.], v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507. Disponível em: [http://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen\\_s\\_climate\\_classification\\_map\\_for\\_Brazil?af=crossref](http://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil?af=crossref).

ALVES, Suênio Anderson Feliciano da Silva. **Potencial para aplicação da recarga gerenciada de aquífero na bacia do Rio Gramame e parte do baixo curso do Rio Paraíba**. 2021. 159 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021. Disponível em: [https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/22735/1/SuênioAndersonFelicianoDaSilvaAlves\\_Tese.pdf](https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/22735/1/SuênioAndersonFelicianoDaSilvaAlves_Tese.pdf).

AMARAL, Jonas Rodrigo Do; COSTA, Adriana Monteiro Da; VIANA, João Herbert Moreira; OLIVEIRA, Amanda Ribeiro De. Condutividade Hidráulica Saturada em Solos na Bacia do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas - MG. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, v. 20, 2016, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Curitiba: SBCS; Londrina: IAPAR, 2016. p. 1079–1081. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/151183/1/Condutividade-hidraulica-1.pdf>.

ANDRADE, Márcio A.; MELLO, Carlos R. De; BESKOW, Samuel. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 69–76, 2013. DOI: 10.1590/S1415-43662013000100010. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662013000100010&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662013000100010&lng=pt&tlng=pt).

ARULBALAJI, P.; PADMALAL, D.; SREELASH, K. GIS and AHP Techniques Based Delineation of Groundwater Potential Zones: a case study from Southern Western Ghats, India. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 9, n. 1, 2019. DOI: 10.1038/s41598-019-38567-x. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-38567-x>.

BORETTI, Alberto; ROSA, Lorenzo. Reassessing the projections of the World Water Development Report. **NPJ Clean Water**, [S. l.], v. 2, n. 15, 2019. DOI: 10.1038/s41545-019-0039-9. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41545-019-0039-9>.

CARDOSO, Rosangela S.; XAVIER, Lúcia Helena; GOMES, Carlos Francisco Simões; ADISSI, Paulo José. Uso de SAD no apoio à decisão na destinação de resíduos plásticos e

gestão de materiais. **Pesquisa Operacional**, [S. l.], v. 29, n. 1, p. 67–95, 2009. DOI: 10.1590/S0101-74382009000100004. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0101-74382009000100004&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-74382009000100004&lng=pt&tlng=pt).

CHENINI, Ismail; MAMMOU, Abdallah Ben; EL MAY, Moufida. Groundwater Recharge Zone Mapping Using GIS-Based Multi-criteria Analysis: A Case Study in Central Tunisia (Maknassy Basin). **Water Resources Management**, [S. l.], v. 24, n. 5, p. 921–939, 2010. DOI: 10.1007/s11269-009-9479-1. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11269-009-9479-1>.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DE MINAS GERAIS (CODEMGE). Portal da Geologia. **Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais**. 2014. Disponível em: <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/>. Acesso em: 29 nov. 2023.

COSTA, Adriana Monteiro Da; SALIS, Hugo Henrique Cardoso De; ARAÚJO, Bárbara Janine Reis Silva; MOURA, Maíse Soares De; SILVA, Victor Cordeiro Da; OLIVEIRA, Amanda Ribeiro De; PEREIRA, Max Paulo Rocha; VIANA, João Herbert Moreira. Potencial de uso conservacionista em bacias hidrográficas: estudo de caso para a bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte - MG. **Revista GEOgrafia**, [S. l.], v. 27, n. 2, p. 127–147, 2019. a. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/212084/1/Potencial-uso.pdf>.

COSTA, Adriana Da; SALIS, Hugo De; VIANA, João; PACHECO, Fernando Leal. Groundwater Recharge Potential for Sustainable Water Use in Urban Areas of the Jequitiba River Basin, Brazil. **Sustainability**, [S. l.], v. 11, n. 10, 2019. b. DOI: 10.3390/su11102955. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/10/2955>.

COSTA, Adriana Monteiro Da; VIANA, João Herbert Moreira; EVANGELISTA, Laís Pinheiro; CARVALHO, Dayane Caroline De; PEDRAS, Klinsmann Cortezzi; HORTA, Ivana de Marco; SALIS, Hugo Henrique de Cardoso; PEREIRA, Max Paulo Rocha; SAMPAIO, Jarbas Lima Dias. Ponderação de variáveis ambientais para a determinação do Potencial de Uso Conservacionista para o Estado de Minas Gerais. **Revista Geografias**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 118–133, 2017. DOI: 10.35699/2237-549X..13439. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/geografias/article/view/13439>.

CURI, Nilton; SILVA, Sérgio Henrique Godinho; POGGERE, Giovana; MENEZES, Michele Duarte De. **Mapeamento de solos e magnetismo no campus da UFLA como traçadores ambientais**. Lavras: Editora UFLA, 2017.

CUTHBERT, M. O.; GLEESON, T.; MOOSDORF, N.; BEFUS, K. M.; SCHNEIDER, A.; HARTMANN, J.; LEHNER, B. Global patterns and dynamics of climate–groundwater interactions. **Nature Climate Change**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 137–141, 2019. DOI: 10.1038/s41558-018-0386-4. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41558-018-0386-4>.

DAR, Tanveer; RAI, Nachiketa; BHAT, Aadil. Delineation of potential groundwater recharge zones using analytical hierarchy process (AHP). **Geology, Ecology, and Landscapes**, [S. l.], v. 5, n. 4, p. 292–307, 2021. DOI: 10.1080/24749508.2020.1726562. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/24749508.2020.1726562>.

DARKO, Amos; CHAN, Albert Ping Chuen; AMEYAW, Ernest Effah; OWUSU, Emmanuel Kingsford; PÄRN, Erika; EDWARDS, David John. Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction. **International Journal of Construction Management**, [S. l.], v. 19, n. 5, p. 436–452, 2019. DOI: 10.1080/15623599.2018.1452098. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15623599.2018.1452098>.

DÍAZ-ALCAIDE, S.; MARTÍNEZ-SANTOS, P. Review: Advances in groundwater potential mapping. **Hydrogeology Journal**, [S. l.], v. 27, n. 7, p. 2307–2324, 2019. DOI: 10.1007/s10040-019-02001-3. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10040-019-02001-3>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, v. 5, 2018.

FEITOSA, Fernando A. Carneiro; MANOEL FILHO, João; FEITOSA, Edilton Carneiro; DEMETRIO, José Geilson A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM; Recife: LABHID, 2008.

FITTS, Charles R. **Águas Subterrâneas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Geomorfologia: Conceitos e Tecnologias Atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **AQUASTAT**. 2013. Disponível em: [www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat](http://www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat). Acesso em: 13 nov. 2023.

FREEZE, Allan R.; CHERRY, John A. **Groundwater**. New Jersey: Prentice-Hall, 1979. Disponível em: <https://gw-project.org/books/groundwater/>.

GARCEZ, Lucas Nogueira; ALVAREZ, Guillermo Acosta. **Hidrologia**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1988.

GIAMPÁ, Carlos Eduardo Quaglia; GONÇALES, Valter Galdiano. **Águas Subterrâneas e Poços Tubulares Profundos**. 2. ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2013.

GOETTEN, Willian Jucelio. **Avaliação da governança da água subterrânea nos estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. 2015. 320 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2015. Disponível em: <https://186.209.113.130/~observatorio/wp-content/uploads/2019/09/AVALIACAO-DA-GOVERNANCA-DA-AGUA-SUBTERRANEA-NOS-ESTADOS-DE-SAO-PAULO-PARANÁ-SANTA-CATARINA-E-RIO-GRANDE-DO-SUL-.pdf>.

HACHEM, Aouragh My; ALI, Essahlaoui; ABDELHADI, El Ouali; ABDELLAH, El Hmaid;

SAID, Kamel. Using Remote Sensing and GIS-Multicriteria decision Analysis for Groundwater Potential Mapping in the Middle Atlas Plateaus, Morocco. **Research Journal of Recent Sciences**, [S. l.], v. 4, n. 7, p. 33–41, 2015. Disponível em: <http://www.isca.me/rjrs/archive/v4/i7/6.ISCA-RJRS-2014-161.pdf>.

HIRATA, Ricardo; SUHOGUSOFF, Alexandra Vieira; MARCELLINI, Silvana Susko; VILLAR, Pilar Carolina; MARCELLINI, Laura. **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2019. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002928658>.

HUANG, Ivy B.; KEISLER, Jeffrey; LINKOV, Igor. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 409, n. 19, p. 3578–3594, 2011. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.06.022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969711006462>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Malha Municipal**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 30 nov. 2023.

JAAFARZADEH, Maryam Sadat; TAHMASEBIPOUR, Naser; HAGHIZADEH, Ali; POURGHASEMI, Hamid Reza; ROUHANI, Hamed. Groundwater recharge potential zonation using an ensemble of machine learning and bivariate statistical models. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 11, n. 5587, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-85205-6. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-85205-6>.

JHA, Madan K.; CHOWDARY, V. M.; CHOWDHURY, Alivia. Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information system and multi-criteria decision analysis techniques. **Hydrogeology Journal**, [S. l.], v. 18, n. 7, p. 1713–1728, 2010. DOI: 10.1007/s10040-010-0631-z. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10040-010-0631-z>.

JOTHIBASU, A.; ANBAZHAGAN, S. Modeling groundwater probability index in Ponnaiyar River basin of South India using analytic hierarchy process. **Modeling Earth Systems and Environment**, [S. l.], v. 2, n. 109, 2016. DOI: 10.1007/s40808-016-0174-y. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s40808-016-0174-y>.

KAERDUM, Narongsak; CHOTPANTARAT, Srilert. Mapping Potential Zones for Groundwater Recharge Using a GIS Technique in the Lower Khwae Hanuman Sub-Basin Area, Prachin Buri Province, Thailand. **Frontiers in Earth Science**, [S. l.], v. 9, 2021. DOI: 10.3389/feart.2021.717313. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2021.717313/full>.

KUMAR, Akshay; KRISHNA, Akhouri Pramod. Assessment of groundwater potential zones in coal mining impacted hard-rock terrain of India by integrating geospatial and analytic hierarchy process (AHP) approach. **Geocarto International**, [S. l.], v. 33, n. 2, p. 105–129, 2018. DOI: 10.1080/10106049.2016.1232314. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10106049.2016.1232314>.

KUMAR, V. Ajay; MONDAL, N. C.; AHMED, S. Identification of Groundwater Potential

Zones Using RS, GIS and AHP Techniques: A Case Study in a Part of Deccan Volcanic Province (DVP), Maharashtra, India. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, [S. l.], v. 48, n. 3, p. 497–511, 2020. DOI: 10.1007/s12524-019-01086-3. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12524-019-01086-3>.

LENTSWE, Gaolatlhe Bhutto; MOLWALEFHE, Loago. Delineation of potential groundwater recharge zones using analytic hierarchy process-guided GIS in the semi-arid Motloutse watershed, eastern Botswana. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [S. l.], v. 28, n. 100674, 2020. DOI: 10.1016/j.ejrh.2020.100674. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214581819303088>.

LEPSCH, Igo F. **19 Lições de Pedologia**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

MAPBIOMAS[Brasil]. **Projeto MapBiomias – Coleção Beta de Mapas Anuais de Cobertura e Uso da Terra do Brasil com 10 metros de resolução espacial**. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/mapbiomas-cobertura-10m/>. Acesso em: 30 nov. 2023.

MARÉCHAL, J. C.; DEWANDEL, B.; AHMED, S.; GALEAZZI, L.; ZAIDI, F. K. Combined estimation of specific yield and natural recharge in a semi-arid groundwater basin with irrigated agriculture. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 329, n. 1–2, p. 281–293, 2006. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.02.022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169406001004>.

MARINS, Cristiano Souza; SOUZA, Daniela de Oliveira; BARROS, Magno da Silva. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais – um estudo de caso. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 41., 2009, **Anais**, p. 1778–1788. Disponível em: <http://www.din.uem.br/~ademir/sbpo/sbpo2009/artigos/55993.pdf>.

MELO, José Geraldo De; MORAIS, Samara Danniele Oliveira De; SILVA, Rafaela Alves Da; VASCONCELOS, Mickaelon Belchior De. Avaliação dos Recursos Hídricos do Aquífero Barreiras da Bacia do Rio Maxaranguape - RN. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], v. 27, n. 1, 2013. DOI: 10.14295/ras.v27i1.26875. Disponível em: <http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/26875>.

MENEZES, Michele Duarte De. **Levantamento de solos em sub-bacias hidrográficas como apoio para avaliação do uso da terra e da potencialidade de recarga de aquíferos**. 2007. 107 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007. Disponível em: [http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/7665/Dissertacao\\_Michele\\_Duarte\\_de\\_Menezes.pdf](http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/7665/Dissertacao_Michele_Duarte_de_Menezes.pdf).

MENEZES, Michele Duarte De; JUNQUEIRA JÚNIOR, José Alves; MELLO, Carlos Rogério De; SILVA, Antônio Marciano Da; CUR, Nilton; MARQUES, João José. Dinâmica hidrológica de duas nascentes, associada ao uso do solo, características pedológicas e atributos físico-hídricos na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha – Serra da Mantiqueira (MG). **Scientia Forestalis**, [S. l.], v. 37, n. 82, p. 175–184, 2009. Disponível em: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/36899885/cap07-libre.pdf?1425832206=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DDinamica\\_hidrologica\\_de\\_duas\\_nascentes\\_a.pdf&Expires=1699879275&Signature=OZijFqtoKIdYCo~jsteE5fvS53qaObHURRa3iv4qJ6-tde70xWA2pfJF](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/36899885/cap07-libre.pdf?1425832206=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DDinamica_hidrologica_de_duas_nascentes_a.pdf&Expires=1699879275&Signature=OZijFqtoKIdYCo~jsteE5fvS53qaObHURRa3iv4qJ6-tde70xWA2pfJF).

MOISA, Mitiku Badasa; GURMESSA, Mengistu Muleta; NEGASA, Geda Feyera; OLJIRA, Dereje Geleta; DINSÁ, Misgana Lamessa; DERIBEW, Kiros Tsegay; ROBA, Zenebe Reta; GEMEDA, Dessalegn Obsi. Evaluation of the groundwater recharge potential zone by using GIS and remote sensing in Ziway Abijata sub-basin, Central Rift Valley of Ethiopia. **Water Supply**, [S. l.], v. 23, n. 8, p. 3416–3431, 2023. DOI: 10.2166/ws.2023.183. Disponível em: <https://iwaponline.com/ws/article/23/8/3416/96369/Evaluation-of-the-groundwater-recharge-potential>.

MURMU, Preetilata; KUMAR, Mukesh; LAL, Deepak; SONKER, Irjesh; SINGH, Sudhir Kumar. Delineation of groundwater potential zones using geospatial techniques and analytical hierarchy process in Dumka district, Jharkhand, India. **Groundwater for Sustainable Development**, [S. l.], v. 9, 2019. DOI: 10.1016/j.gsd.2019.100239. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352801X18302339>.

NAGHIBI, Seyed Amir; AHMADI, Kouros; DANESHI, Alireza. Application of Support Vector Machine, Random Forest, and Genetic Algorithm Optimized Random Forest Models in Groundwater Potential Mapping. **Water Resources Management**, [S. l.], v. 31, n. 9, p. 2761–2775, 2017. DOI: 10.1007/s11269-017-1660-3. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11269-017-1660-3>.

OKAWA, Cristhiane Michiko Passos; ZUFFO, Antônio Carlos; DESCOVI, Cassiano Sampaio; ARAÚJO, Angélica Ardengue De. Gestão participativa das partes interessadas em área de manancial: uma abordagem usando análise multicritério. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S. l.], v. 26, n. 2, p. 239–249, 2021. DOI: 10.1590/s1413-415220190071. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522021000200239&tIng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522021000200239&tIng=pt).

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E CULTURA - UNESCO. **World Water Development Report 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2022>. Acesso em: 13 nov. 2023.

RAHMATI, Omid; NAZARI SAMANI, Aliakbar; MAHDAVI, Mohamad; POURGHASEMI, Hamid Reza; ZEINIVAND, Hossein. Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. **Arabian Journal of Geosciences**, [S. l.], v. 8, n. 9, p. 7059–7071, 2015. DOI: 10.1007/s12517-014-1668-4. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12517-014-1668-4>.

RAHMATI, Omid; POURGHASEMI, Hamid Reza; MELESSE, Assefa M. Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: A case study at Mehran Region, Iran. **CATENA**, [S. l.], v. 137, p. 360–372, 2016. DOI: 10.1016/j.catena.2015.10.010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0341816215301326>.

RAJAVENI, S. P.; BRINDHA, K.; ELANGO, L. Geological and geomorphological controls on groundwater occurrence in a hard rock region. **Applied Water Science**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 1377–1389, 2017. DOI: 10.1007/s13201-015-0327-6. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s13201-015-0327-6>.

RATHER, Abid Farooq; AHMED, Rayees; WANI, Gowhar Farooq; AHMAD, Syed Towseef; DAR, Tanveer; JAVAID, Sumaira; AHMED, Pervez. Mapping of groundwater potential zones

in Pohru Watershed of Jhelum Basin-Western Himalaya, India using integrated approach of remote sensing, GIS and AHP. **Earth Science Informatics**, [S. l.], v. 15, n. 4, p. 2091–2107, 2022. DOI: 10.1007/s12145-022-00824-5. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s12145-022-00824-5>.

REBOUÇAS, Aldo da Cunha. A Política Nacional de recursos hídricos e as águas subterrâneas. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], v. 16, n. 1, 2002. DOI: 10.14295/ras.v16i1.1304. Disponível em: <http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/1304>.

ROY, Bernard. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**. 1. ed. Boston, MA: Springer US, 1996. DOI: 10.1007/978-1-4757-2500-1. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4757-2500-1>.

SAATY, Thomas L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 234–281, 1977. DOI: 10.1016/0022-2496(77)90033-5. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022249677900335>.

SAATY, Thomas L. **The Analytic Hierarchy Process: planning, priority setting, resource allocation**. London: McGraw-Hill International Book Company, 1980.

SANTANA, Monna Lysa Teixeira et al. Interactions between land use and soil type drive soil functions, highlighting water recharge potential, in the Cantareira System, Southeast of Brazil. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 903, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166125. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969723047502>.

SANTAROSA, Lucas Vituri; GASTMANS, Didier; SITOLINI, Tatiana Pentead; KIRCHHEIM, Roberto Eduardo; BETANCUR, Sebastian Balbin; DE OLIVEIRA, Marcelo E. Dias; CAMPOS, José Cláudio Viégas; MANZIONE, Rodrigo Lilla. Assessment of groundwater recharge along the Guarani aquifer system outcrop zone in São Paulo State (Brazil): an important tool towards integrated management. **Environmental Earth Sciences**, [S. l.], v. 80, n. 95, 2021. DOI: 10.1007/s12665-021-09382-3. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12665-021-09382-3>.

SARAVANAN, Subbarayan; SARANYA, Thiyagarajan; JENNIFER, Jesudasan Jacinth; SINGH, Leelambar; SELVARAJ, Ayyakkannu; ABIJITH, Devanantham. Delineation of groundwater potential zone using analytical hierarchy process and GIS for Gundihalla watershed, Karnataka, India. **Arabian Journal of Geosciences**, [S. l.], v. 13, n. 695, 2020. DOI: 10.1007/s12517-020-05712-0. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s12517-020-05712-0>.

SCANLON, Bridget R.; HEALY, Richard W.; COOK, Peter G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 18–39, 2002. DOI: 10.1007/s10040-001-0176-2. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10040-001-0176-2>.

STRAHLER, Arthur Newell. Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. **Handbook of applied hydrology**, [S. l.], 1964. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:129764714>.

THANH, Nguyen Ngoc; THUNYAWATCHARAKUL, Pongsathron; NGU, Nguyen Huu; CHOTPANTARAT, Srilert. Global review of groundwater potential models in the last decade: Parameters, model techniques, and validation. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 614, n. 128501, 2022. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128501. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002216942201071X>.

THE EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). Copernicus Contributing Missions Online. **Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM)**. 2022. Disponível em: <https://spacedata.copernicus.eu/pt/web/guest/home>. Acesso em: 30 nov. 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA (UFV). Departamento de Solos - Centro de Ciências Agrárias. **Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais**. 2010. Disponível em: <https://dps.ufv.br/software/>. Acesso em: 01 dez. 2023.

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. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], v. 37, n. 1, p. 1–16, 2023. DOI: 10.14295/ras.v37i1.30152. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/30152>.

VILLAR, Pilar Carolina. Groundwater and the Right to Water in a Context of Crisis. **Ambiente & Sociedade**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 85–102, 2016. DOI: 10.1590/1809-4422asoc150126r1v1912016. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1414-753X2016000100006&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2016000100006&lng=en&tlng=en).

VILLAR, Pilar Carolina; HIRATA, Ricardo. Groundwater Governance and the Construction of Legal Indicators for Brazilian States. **Ambiente & Sociedade**, [S. l.], v. 25, p. 1–20, 2022. DOI: 10.1590/1809-4422asoc20210037r1vu202211ao. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1414-753X2022000100304&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2022000100304&tlng=en).

VILLELA, Swami Marcondes; MATTOS, Arthur. **Hidrologia aplicada**. Editora McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

WILLAARTS, Bárbara A.; GARRIDO, Alberto; LLAMAS, M. Ramón. **Water for Food Security and Well-being in Latin America and the Caribbean: Social and Environmental Implications for a Globalized Economy**. 1. ed. London: Routledge, 2014. DOI: 10.4324/9781315883137. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781134682805>.

YEH, Hsin-Fu; CHENG, Youg-Sin; LIN, Hung-I.; LEE, Cheng-Haw. Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. **Sustainable Environment Research**, [S. l.], v. 26, n. 1, p. 33–43, 2016. DOI: 10.1016/j.serj.2015.09.005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S246820391630005X>.