

VULNERABILIDADE AQUÍFERA DAS SUPRAMS LESTE MINEIRO E JEQUITINHONHA – MG

Aquifer vulnerability in the Jequitinhonha and east regions of Minas Gerais

Tuane de Oliveira Dutra^{1*}

Francisco César Dalmo²

Luan Brioschi Giovanelli³

Rafael Alvarenga Almeida⁴

Caio Mário Leal Ferraz⁵

Dayane Alves Dos Santos⁶

Myllena Trindade Silva⁷

Antônio Carlos Silva Tavares Mendes⁸

¹Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professora adjunta da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia (ICET) – e-mail: tuane.dutra@ufvjm.edu.br * Autora correspondente.

²Doutorado em Energia pela Universidade Federal do ABC. Professor Adjunto na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). Engenheiro Hídrico pela Universidade Federal de Itajubá. Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental e Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética pela Universidade de São Paulo – e-mail: francisco.dalmo@ufvjm.edu.br

³Doutorado e mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Professor Adjunto na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) – e-mail: luan.giovanelli@ufvjm.edu.br

⁴Doutorado e mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Docente na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia (ICET) – e-mail: rafael.almeida@ufvjm.edu.br

⁵Doutorado e mestrado em Geografia pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professor Adjunto na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) – e-mail: caio.ferraz@ufvjm.edu.br

⁶Graduação em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). Graduanda em Engenharia Hídrica pela UFVJM – e-mail: dayane.alves@ufvjm.edu.br

⁷Graduação em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) – e-mail: myllena.trindade@ufvjm.edu.br

⁸Graduação em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). Técnico em Informática pelo Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais (IFNMG) – e-mail: antonio.tavares@ufvjm.edu.br

RESUMO

O estado de Minas Gerais se destaca pelo consumo de água subterrânea no perímetro rural. Logo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a vulnerabilidade aquífera em duas Superintendências Regionais de Meio Ambiente (Suprams), localizadas na porção nordeste do estado, a Supram Leste Mineiro e a Supram Jequitinhonha. A análise foi realizada por meio do método de GOD, levando em consideração as características do solo da área e o nível estático dos poços outorgados. Também se realizou o cruzamento da localização dos poços cadastrados e outorgados no mapa de vulnerabilidade resultante. Em ambas as Suprams, o índice de vulnerabilidade baixo foi predominante, em mais de 80% da área da Supram Jequitinhonha e em mais de 90% da área da Supram Leste Mineiro. O percentual restante de ambas as áreas possui índices altos e extremos de vulnerabilidade, os quais atingem 19 municípios na Supram Leste Mineiro e 15 municípios na Supram Jequitinhonha. Os municípios de Coronel Fabriciano e Diamantina apresentam o cenário mais crítico, possuindo uma concentração considerável de poços localizados em regiões com vulnerabilidade extrema e/ou alta.

Palavras-chave: Método GOD; Poços outorgados; Águas subterrâneas.

ABSTRACT

The state of Minas Gerais stands out for groundwater consumption in rural areas. Therefore, this study aimed to assess aquifer vulnerability in two regions of the state: East and Jequitinhonha. Using the GOD method, the analysis considered soil characteristics and the static level of licensed wells. Additionally, locations of registered and licensed wells were overlaid on the resulting vulnerability map. Low vulnerability indices predominated, covering over 80% of the Jequitinhonha area and over 90% of the East area. The remaining portions of both regions exhibited high and extreme vulnerability indices, affecting 19 municipalities in the East and 15 in Jequitinhonha. The municipalities of Coronel Fabriciano and Diamantina present the most critical scenarios, with a significant concentration of wells located in areas of extreme or high vulnerability.

Keywords: GOD method; Licensed wells; Groundwater.

Data de submissão: 13/07/2024

Data de aprovação: 22/08/2024

1 INTRODUÇÃO

Avaliar características intrínsecas dos aquíferos que os tornam mais ou menos vulneráveis às fontes de contaminação superficiais é um caminho importante a ser seguido para assegurar água de qualidade para os diferentes usos existentes de água subterrânea.

Minas Gerais não é o estado que mais utilizam água subterrânea, para abastecimento público, em seus centros urbanos, no Brasil (Hirata *et al.*, 2019). No entanto, ainda segundo os autores, as águas subterrâneas se tornam protagonistas no perímetro rural do estado, sendo Minas Gerais o que mais se beneficia desse recurso nessas regiões. Por fim, os autores mencionam com base em dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que Minas Gerais é o segundo maior consumidor de água subterrânea pela população atendida por rede de abastecimento de água, ficando atrás apenas do estado de São Paulo.

As Suprams Leste Mineiro (SLM) e Jequitinhonha (SJQ), estão inseridas na porção nordeste do estado. Em ambas as regiões, conforme dados da ANA (2010), assim como em âmbito estadual, predominam, como fonte de abastecimento na zona urbana, o manancial superficial. No entanto, há uma quantidade expressiva de poços em ambas as áreas, os quais, segundo dados cadastrados na Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema), entre outubro de 2018 e janeiro de 2023, tinham como finalidade de uso principal, o consumo humano, abastecimento público, dessedentação animal e irrigação. Associado a este aspecto, há nas áreas de estudo, conforme Fiume *et al.* (2022), predomínio de aquífero do tipo fraturado em ambas as Suprams. Este tipo de formação aquífera é heterogênea e anisotrópica, condicionando grandes variações nas características hidrodinâmicas dos poços, tornando mais complexo os processos de remediação frente a ocorrência de uma contaminação.

Conforme Foster *et al.* (2003), a cartografia de vulnerabilidade é o passo inicial da avaliação do perigo de contaminação de água subterrânea e proteção de sua qualidade. Logo, frente ao exposto, e com o intuito de contribuir para a proteção das águas subterrâneas e manutenção dos usos existentes na SLM e SJQ, os quais, em sua maioria, demandam boa qualidade de água, o trabalho realizou a avaliação da vulnerabilidade aquífera através do

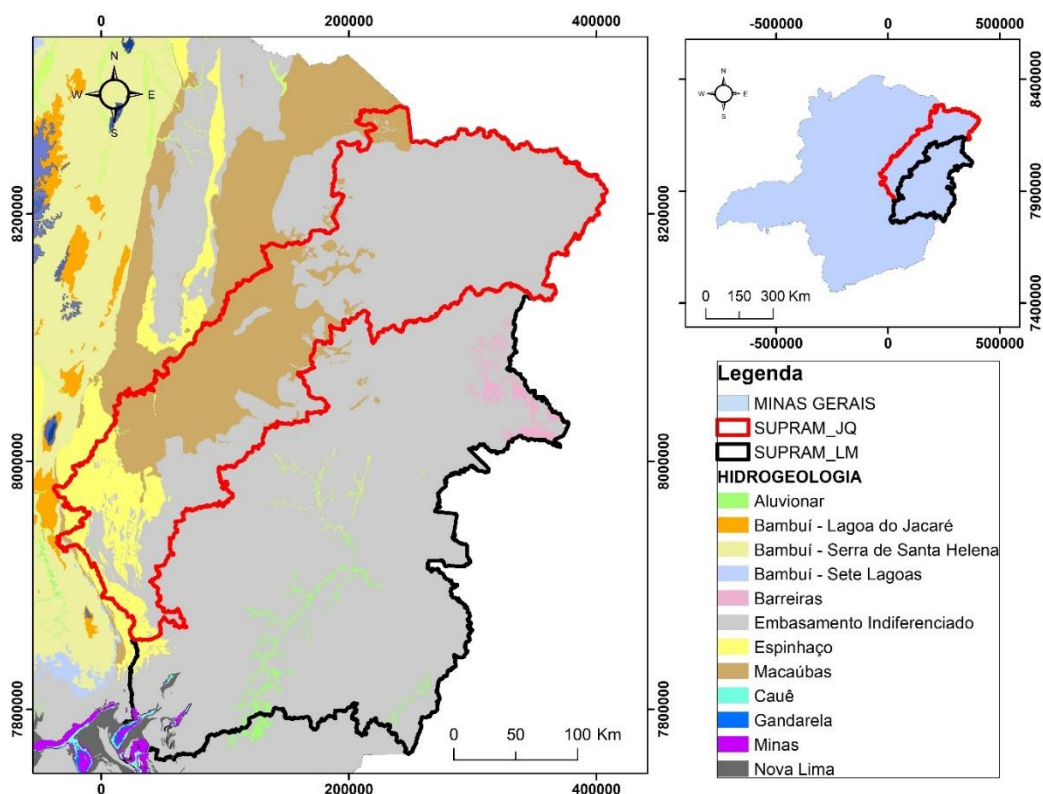
método de GOD (Foster; Hirata 1988). O método consiste em uma técnica de avaliação da vulnerabilidade aquífera amplamente difundida, frente a sua simplicidade de aplicação, utilizando apenas três parâmetros, relacionados com a capacidade do ambiente de atenuar a passagem de poluentes pela zona não saturada. Logo, o método é uma opção para situações em que não se tenha poucas informações iniciais. Conforme Ribeiro *et al.* (2011), o método GOD possibilita mapear locais de maior vulnerabilidade natural, o que permite aos órgãos gestores realizar o planejamento da área estudada.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Caracterização da área de estudo

As Suprams estudadas estão localizadas nas porções nordeste e sudeste do estado de Minas Gerais (Mapa 1). A SJQ possui 71 municípios sob a sua jurisdição, já a SLM, 145 municípios. Conforme o mapeamento de Fiume *et al.* (2022), as formações aquíferas predominantes na área de estudo são o Embasamento Indiferenciado, Macaúbas e Espinhaço, todas são aquíferos fraturados, com classificação livre a confinado e produtividade geralmente baixa (Mapa 1). Ainda segundo esses autores, a qualidade das águas subterrâneas da formação Espinhaço e Embasamento Indiferenciado são brandas, apresentando teor de sais baixos e de baixo a moderado, respectivamente. Já a formação Macaúbas, em geral, pode apresentar dureza e teor de sais de baixo a médio.

Mapa 1 – Hidrogeologia simplificada e de localização da área de estudo



Fonte: Adaptado FIUME *et al.* (2022)

Em menor proporção há, conforme, Fiume *et al.* (2022), outras formações do tipo: Fraturado: Cauê, Nova Lima e Minas, sendo a primeira com produtividade alta e as duas últimas com produtividade, no geral, baixa; Granulares: Aluvionar e Barreiras, com produtividade, no geral, muito baixa; Fraturado-Cárstico: Gandarela, Bambuí Lagoa do Jacaré e o Bambuí Sete Lagoas, todos com produtividade moderada, sendo que o último apresenta esta condição apenas na sua porção aflorante.

A área investigada, do ponto de vista litoestrutural, apresenta grande diversidade que reflete longa e complexa história geológica, a qual atravessou múltiplos ciclos tectônicos (Kuchenbecker, 2018). Em seu flanco ocidental, notadamente na SJQ e sudoeste da SLM, destacam-se litologias do Supergrupo Espinhaço e Grupo Macaúbas, logo a oeste destes (Mapa 1). Na porção central, em ambas as Suprams, predominam rochas graníticas neoproterozóicas e paleozóicas que dão lugar a paragneisses criogenianos mais a leste (Pinto; Silva, 2014). O extremo oriental da área se caracteriza pela presença de coberturas neógenas inconsolidadas do Grupo Barreiras, conforme Mapa 1 e IBGE (1987), cronocorrelatas às da Formação São

Domingos, que capeiam localmente níveis de cumeada no médio Jequitinhonha na SJQ (Pedrosa-Soares, 1981). Lineamentos estruturais de direções principais NE-SW e NW-SE predominam em toda a extensão da área investigada (IBGE, 1987).

A oeste (SJQ), a Serra do Espinhaço pode ser caracterizada por um conjunto de terras altas cuja nomenclatura deveria ser definida pelo termo planalto, em função de sua realidade fisiográfica (Saadi, 1995). Logo a leste desta, predomina modelo caracterizado por interflúvios tabulares recortados por profunda incisão da drenagem (SJQ), os quais dão lugar, na porção central (SLM), a planaltos de dissecação fluvial estruturalmente direcionada (Ferraz, 2006). Nas porções mais a leste, nas duas Suprams, notam-se os Tabuleiros Costeiros que caracterizam a fachada sublitorânea destas latitudes brasileiras (IBGE, 1987).

2.2 Vulnerabilidade aquífera

Conforme, Foster e Hirata (1988), a vulnerabilidade consiste na sensibilidade de um aquífero de ser negativamente afetado por uma carga contaminante aplicada na superfície em função de suas características intrínsecas.

Feitosa *et al.* (2008, p. 405), mencionam que “a vulnerabilidade de um aquífero pode ser determinada em função de vários aspectos e seu significado se diversifica conforme o contexto em que se insere”. Os contextos podem ser resumidos em três vulnerabilidades relacionadas: a susceptibilidade à contaminação, a disponibilidade quantitativa (incluindo a possibilidade de ser substituído por outras fontes) e a importância do aquífero em manter áreas ecológicas.

Ao termo vulnerabilidade também são conferidos diferentes adjetivos, os quais devem ser descritos, frente os diferentes significados que cada um apresenta. Logo, conforme Feitosa *et al.* (2008), existem os termos de:

- Vulnerabilidade Relativa: Diferentes áreas do mapa são classificadas uma com relação às outras, sem significado absoluto;
- Vulnerabilidade Absoluta: Cada área mapeada possuirá um significado, e os índices de vulnerabilidade estão associados a um contaminante ou grupo de contaminantes;
- Vulnerabilidade Geral: Aborda todas as atividades ou classes de contaminantes;

- Vulnerabilidade Específica: aborda um determinado contaminante, atividade ou classe de contaminantes.

A Resolução nº 396/2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2008), que trata do enquadramento das águas subterrâneas, em seu artigo 29, enfatiza a importância da caracterização da vulnerabilidade e dos riscos de poluição. Tal caracterização é uma das considerações que devem ser feitas no processo de enquadramento das águas subterrâneas. Neste ponto, vale destacar que a vulnerabilidade é independente do risco, por estar associada às características intrínsecas do meio (Ferreira, 1998). Já o risco depende não só da vulnerabilidade, mas também da existência de fontes de contaminação, as quais podem originar cargas de contaminantes no ambiente subterrâneo. Logo, é evidente que sem a análise de vulnerabilidade é quase impossível avaliar o risco existente e proceder o enquadramento adequado das águas subterrâneas.

Neste trabalho foi analisada a vulnerabilidade aquífera geral, dentro do contexto susceptibilidade à contaminação, através do método de GOD, apresentado no item a seguir.

2.3 Método de GOD

Conforme Foster e Hirata (1988), o método GOD consiste em uma metodologia de avaliação da vulnerabilidade geral amplamente utilizada devido à simplicidade de sua aplicação, através de três parâmetros.

O método GOD é um método bastante difundido, e possui diversas aplicações para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas no mundo. Conforme Foster *et al.* (2002), aplicações relevantes foram realizadas na América Latina e Caribe, durante a década de 1990, a exemplo, os trabalhos em Leon, México de Stuard e Milne (1997) e em Esperanza, Argentina (Paris *et al.* 1998, 1999).

Marques e Oliveira (2020), indicaram a aplicação do método, por diferentes autores, nos últimos 25 anos, em várias regiões do país, tais como: aquíferos da região metropolitana do Recife – PE, região aquífera de Soledade – RS, aquíferos na região de Araguaína – TO, águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Araripe – CE, aquíferos no Alto Aguapé e Alto Peixe – SP, águas subterrâneas em Humaitá – AM, aquíferos do Quadrilátero Ferrífero – MG e águas subterrâneas na região semiárida da Bahia, município de Tucano. Frente

as conclusões obtidas pelos diferentes autores que aplicaram o método nas regiões mencionadas, Marques e Oliveira (2020), ressaltaram três pontos em comum a respeito do método: “1) permite visualizar as diferentes classes de vulnerabilidade dos aquíferos; 2) o mapa de vulnerabilidade é importante para diagnosticar as diferentes suscetibilidades das áreas à poluição; e 3) o método é uma ferramenta útil para o planejamento do uso e ocupação do solo”.

Hirata (2001), ao abordar o quesito confiança dos mapas de vulnerabilidade, menciona que uma das grandes críticas aos métodos existentes é a precisão, frente ao comportamento complexo dos contaminantes na zona não saturada, onde atuam os processos de advecção, dispersão, retardação e degradação. Logo, é intuitivo concluir que, o método de GOD, com reduzido número de variáveis, proporciona simplicidade à avaliação, no entanto, se perde em definição (Auge, 2004). Frente ao exposto é importante levar em consideração, ao se utilizar os mapas de vulnerabilidade para tomada de decisão, as três “leis” da vulnerabilidade de aquíferos, conforme Hirata (2001): 1º os aquíferos são todos vulneráveis em algum grau; 2º a incerteza é inerente a todas as cartografias de vulnerabilidade e 3º o risco que o óbvio possa ser obscurecido e o sutil indistinguível existe sempre.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise do grau de vulnerabilidade foi utilizado o método de GOD, que estima a vulnerabilidade geral do aquífero. O índice de vulnerabilidade é obtido a partir do produto entre esses três parâmetros, conforme Equação 1.

$$Vul = G . O . D \quad (1)$$

Onde:

Vul: Vulnerabilidade; G: Grau de confinamento da água subterrânea; O: Ocorrência de estratos de cobertura; e D: Distância até o aquífero freático.

3.1 Grau de confinamento da água subterrânea (G)

Para a determinação do parâmetro G, foi considerada a espessura média dos solos, como critério de cobertura, conforme metodologia utilizada por Borges (2017), esta adaptação é adequada para área de estudo, levando-se em consideração que todos os aquíferos são livres a confinados, optou-se pelo pior cenário, o livre, sendo o solo sua única camada protetora. Logo, o cenário mais favorável foi atribuído aos latossolos e o mais desfavorável aos afloramentos rochosos e neossolos (TABELA 1). As demais ordens de solos foram enquadradas em classes intermediárias.

Tabela 1 – Índices do parâmetro G com base nos tipos de solos

G - Grau de Confinamento	
Faixa	Índice
Afloramento de Rocha (não confinado)	1
Neossolos (não confinado)	1
Cambissolos	0,9
Gleissolos	0,9
Argissolos	0,7
Latossolo (não confinado coberto)	0,6

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Na área investigada, Neossolos Litólicos ocorrem, majoritariamente, associados à litologias do Supergrupo Espinhaço, sobrejacentes a quartzitos comumente afetados por lineamentos estruturais, configurando cenário semelhante a afloramentos rochosos naquilo que diz respeito ao grau de confinamento (Amaral *et al.*, 2004; Pinto; Silva, 2014). Por outro lado, latossolos estão associados a níveis de cumeada tabulares ou feições somitais de relevos de baixa declividade. Estes solos recobrem granitóides e rochas de variados graus de metamorfismo, e podem apresentar espessuras que não ocasionalmente superam os 20 metros de espessura (IBGE, 1987; Ferraz, 2006, 2019).

Os cambissolos, assim como os argissolos, se concentram em vertentes que exibem rampas de declividades variadas, embora os primeiros ocorram naquelas em que tais declividades são mais acentuadas, se comparado ao que se verifica nos cenários de ocorrência dos argissolos (IBGE, 1987; Ferraz, 2006, 2019). Dessa maneira, o que se verifica é que a

cobertura pedológica das feições cujas ocorrências se associam aos argissolos é significativamente mais espessa do que o verificado naquelas em que os cambissolos estão presentes (IBGE, 1987; Ferraz, 2006, 2019).

Os gleissolos, em associação a outras coberturas influenciadas pela drenagem, estão presentes nas feições mais baixas do relevo (Amaral *et al.*, 2004; Pinto; Silva, 2014). Nesse contexto, se caracterizam por exibirem horizontes A que comumente ultrapassam 20 cm de profundidade, nos quais materiais orgânicos em diferentes estágios de decomposição se sobrepõem a camadas C que evoluíram a partir de coberturas sedimentares holocênicas que entulham os vales fluviais (EMBRAPA, 2013).

3.2 Ocorrência de estratos de cobertura (O)

O solo foi considerado como única camada de cobertura na área de estudo. A metodologia para a determinação dos pesos para este parâmetro, foi baseada na proposta de Streck *et al.* (2008) (TABELA 2).

Tabela 2 – Índices do parâmetro O baseado na classificação de Streck *et al.* (2008)

O - Ocorrência de estratos de cobertura		
Solos	Classificação Streck <i>et al.</i> (2008)	Índice
Afloramento de Rocha	Inadequado	1
Argissolos Vermelho Amarelos	Adequado	0,4
Argissolos Amarelos	Adequado	0,4
Argissolos Vermelhos	Adequado	0,4
Cambissolos Haplicos	Inadequado	1
Gleissolos Haplicos	Inadequado	1
Chernossolos Argiluvicos	Restrito	0,8
Latossolos Amarelos	Adequado	0,4
Latossolos Vermelho Amarelos	Adequado	0,4
Latossolos Vermelhos	Adequado	0,4
Planossolos Natricos	Inadequado	1
Neossolos Litolicos	Inadequado	1
Neossolos Fluvicos	Inadequado	1

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

A classificação do solo foi baseada na metodologia de Streck *et al.* (2008), que consiste em avaliar a aptidão dos solos para disposição de resíduos, levando em consideração características como: pedregosidade, profundidade, textura, rochosidade, drenagem natural, erodibilidade e aptidão agrícola. Logo, foram atribuídos os índices 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 para as classes de solo adequado, regular, restrito e inadequado, respectivamente (TABELA 2).

3.3 Distância até o aquífero freático (D)

Para a estimativa do parâmetro D foram utilizados os dados de nível estáticos disponibilizados pelo sistema de consulta de decisões de outorga de direito de uso de recursos hídricos, da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD). Foram identificados até dia 02/01/2023, 123 poços com dados para a SJQ e 551 poços com dados para SLM.

Conforme indicado por Hernandez *et al.* (2021), para a geração dos mapas de nível estático, foi utilizado o método de interpolação denominado Inverso da Distância Ponderada (*Inverse distance weighting - IDW*), no software QGIS, resultando em um *raster* com valores de nível d'água, o qual foi reclassificado para a geração do mapa do parâmetro D. Os índices dos parâmetros D seguiram os pesos previstos no método (TABELA 3).

Tabela 3 – Índices do parâmetro D baseado na metodologia de GOD

D - Distância até o lençol freático	
Faixa	Índice
> 50 m	0,6
20 - 50 m	0,7
5 - 20 m	0,8
< 5 m	0,9

Fonte: Adaptado de FOSTER; HIRATA (1988)

3.4 Índices de vulnerabilidade do método de GOD

A estimativa dos índices de vulnerabilidade do método de GOD segue as etapas de identificação do grau de confinamento (G), atribuindo-se um índice na escala de 0 a 1; definição dos estratos de cobertura da zona vadosa ou da camada confinante, com relação ao grau de consolidação e litologia (O), atribuindo-se um índice na escala de 0,4 a 1; estimativa da profundidade do nível estático (aquíferos livres) ou do teto do aquífero (aquíferos confinados) (D), com classificação na escala de 0,6 a 1 e por fim, multiplica-se os três parâmetros, obtendo o índice de vulnerabilidade final, o qual varia de 0 a 1.

Foster e Hirata (1988) subdividiram as classes de vulnerabilidade em cinco categorias, as quais estão relacionadas aos índices (TABELA 4).

Tabela 4 – Classes de Vulnerabilidade do método de GOD

Classes de vulnerabilidade	Índice de Vulnerabilidade
Insignificante	0 - 0,1
Baixa	0,1 - 0,3
Moderada	0,3 - 0,5
Alta	0,5 - 0,7
Extrema	0,7 - 1,0

Fonte: Adaptado de FOSTER; HIRATA (1988)

3.4 Poços inseridos na região

Para uma análise mais descritiva do mapa de vulnerabilidade desenvolvido, foi inserido no mesmo os poços outorgados e cadastrados existentes nas áreas de estudo. Vale salientar que os poços cadastrados são aqueles referentes aos usos considerados insignificantes, os quais independem de outorga, conforme especificado na Política Estadual de Recursos Hídricos, Lei n° 13.199/1999 (Minas Gerais, 1999). Os dados dos poços outorgados e cadastrados foram levantados utilizando-se a Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema) entre outubro de 2018 e janeiro de 2023. Logo, foram identificados na SJQ e na SLM, 678 e 3.324 poços, respectivamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Grau de confinamento da água subterrânea (G)

Em ambas as áreas analisadas predominam os tipos de solo mais favoráveis para a proteção das águas subterrâneas, que são os latossolos e argissolos (TABELA 5).

Tabela 5 – Índices do parâmetro G, por percentual de área, em ambas as Suprams

Supram		SJQ	SLM
Solo	G	% A	% A
Afloramento de Rocha	1	1,91%	1,51%
Argissolos Vermelho Amarelos	0,7	24,51%	10,00%
Argissolos Vermelhos	0,7	17,72%	28,97%
Argissolos Amarelos	0,7	0,00%	0,31%
Cambissolos Haplicos	0,7	4,64%	2,91%
Gleissolos Haplicos	0,9	0,02%	0,16%
Chernossolos Argiluvicos	0,8	0,03%	0,00%
Latossolos Amarelos	0,6	3,73%	6,97%
Latossolos Vermelho Amarelos	0,6	21,90%	39,69%
Latossolos Vermelhos	0,6	13,90%	6,73%
Planossolos Natricos	0,7	0,24%	0,00%
Neossolos Litolicos	1	11,41%	2,69%
Neossolos Fluvicos	1	0,00%	0,06%

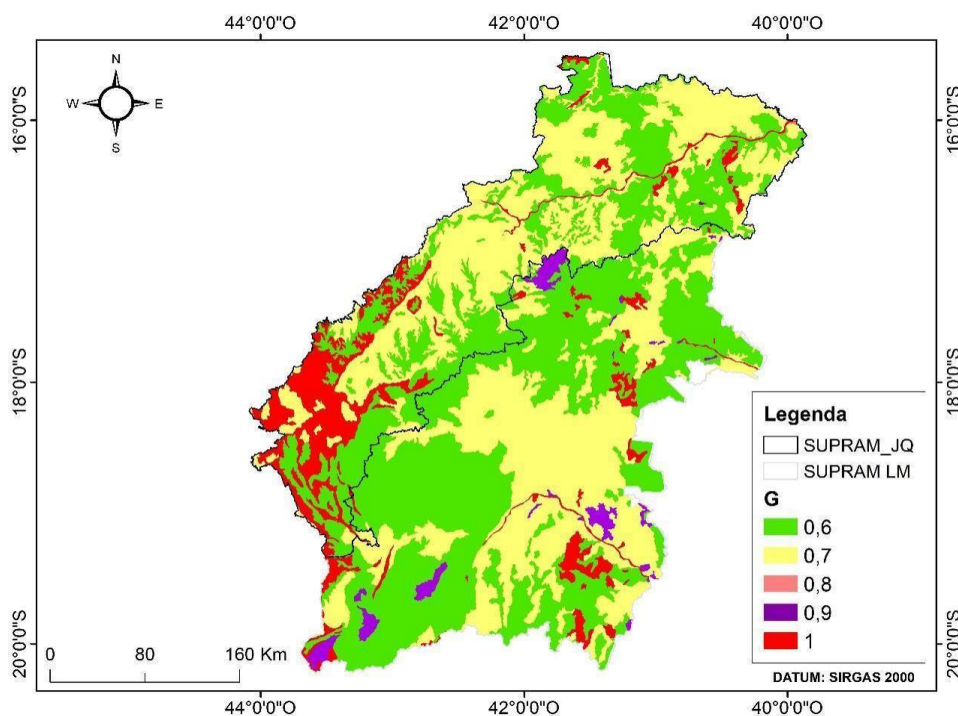
%A: área (%)

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Na SJQ predominam os argissolos, presentes em 42,2% da área, seguido pelos latossolos, os quais abrangem 35,8% da mesma. Na SLM a situação se inverte, com os latossolos sendo mais representativos que os argissolos, com ocupação da área de 53,4% e 39,3% respectivamente. Em relação aos solos menos favoráveis para vulnerabilidade, estes ocorrem em um maior percentual de área na SJQ, perfazendo quase 14% da mesma, sendo importante destacar os neossolos nessa região (11,4%). Contudo, na SLM, esses tipos de solos foram menos persistentes, não atingindo 8% da área, com os neossolos representando menos de 3% desse montante.

Os solos com índice 1, estão concentrados na porção sul da SJQ, com algumas áreas pontuais distribuídas na porção norte (MAPA 2). Na SLM, o índice 1 ocorre de forma mais pontual, nas regiões sudeste e norte da área. Em ambas as áreas nota-se que há ocorrência do índice em questão associado aos principais rios da região (MAPA 2). O índice 0,9 só ocorreu na SLM, de forma pontual, nas porções sul, sudeste e noroeste.

Mapa 2 – Distribuição espacial dos índices do parâmetro G



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

4.2 Ocorrência de estratos de cobertura (O)

Na análise do parâmetro O, notou-se que em ambas as áreas prevaleceu a classificação adequada, com o índice de 0,4 (TABELA 6). Sendo, os percentuais dessa classificação nas SLM e SJQ de respectivamente 93,3 e 82%. A classificação restrita, com índice de 0,8, só foi observada na SJQ, em uma porção de área ínfima, inferior a 0,5%.

Tabela 6 – Índices do parâmetro O, por percentual de área, em ambas as Suprams

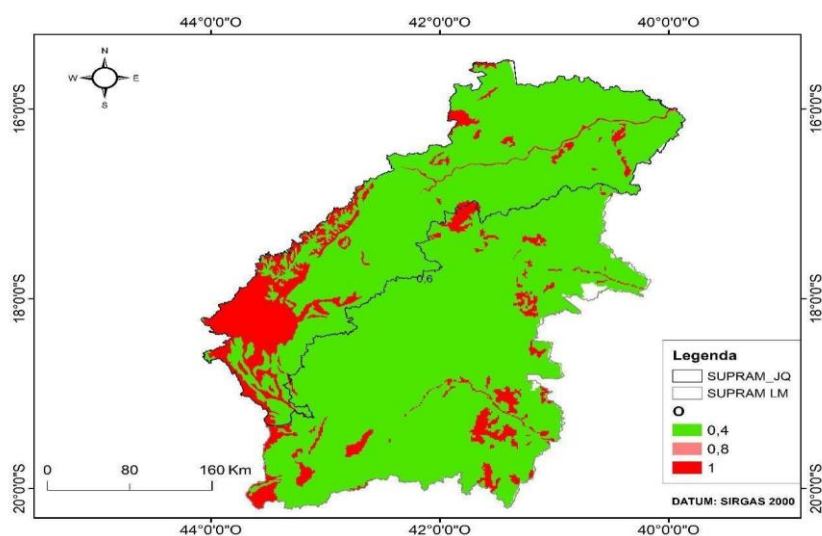
Supram			SJQ	SLM
Solo	O	Classificação Streck <i>et al.</i> (2008)	% A	% A
Latossolos Amarelos	0,4	Adequado	3,73%	6,97%
Latossolos Vermelho Amarelos	0,4	Adequado	21,90%	39,69%
Latossolos Vermelhos	0,4	Adequado	13,90%	6,73%
Planossolos Natricos	0,4	Adequado	0,24%	0,00%
Argissolos Vermelho Amarelos	0,4	Adequado	24,51%	10,00%
Argissolos Vermelhos	0,4	Adequado	17,72%	28,97%
Argissolos Amarelos	0,4	Adequado	0,00%	0,31%
Chernossolos Argiluvicos	0,8	Restrito	0,03%	0,00%
Afloramento de Rocha	1	Inadequado	1,91%	1,51%
Cambissolos Haplicos	1	Inadequado	4,64%	2,91%
Gleissolos Haplicos	1	Inadequado	0,02%	0,16%
Neossolos Litolicos	1	Inadequado	11,41%	2,69%
Neossolos Fluvicos	1	Inadequado	0,00%	0,06%

%A: área (%)

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Na distribuição espacial deste parâmetro, notou-se que na SJQ, o índice 1, menos favorável, se concentra na porção sul da área, com algumas ocorrências pontuais ao longo da mesma (MAPA 3).

Mapa 3 – Distribuição espacial dos índices do parâmetro O



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Na SLM, a ocorrência do índice 1 ocorreu de forma mais distribuída, no entanto, de forma pontual e descontínua, não ocorrendo apenas nas porções centrais e oeste da área.

4.3 Distância até o aquífero freático (D)

A distância da superfície até o aquífero, se demonstrou bastante variável em ambas as Suprams (TABELA 7). Na SJQ, o desvio padrão (11,52 m), ficou muito próximo à média (13,09 m), conforme Tabela 7, e na SLM o desvio padrão (18 m), foi superior à média (12,63 m).

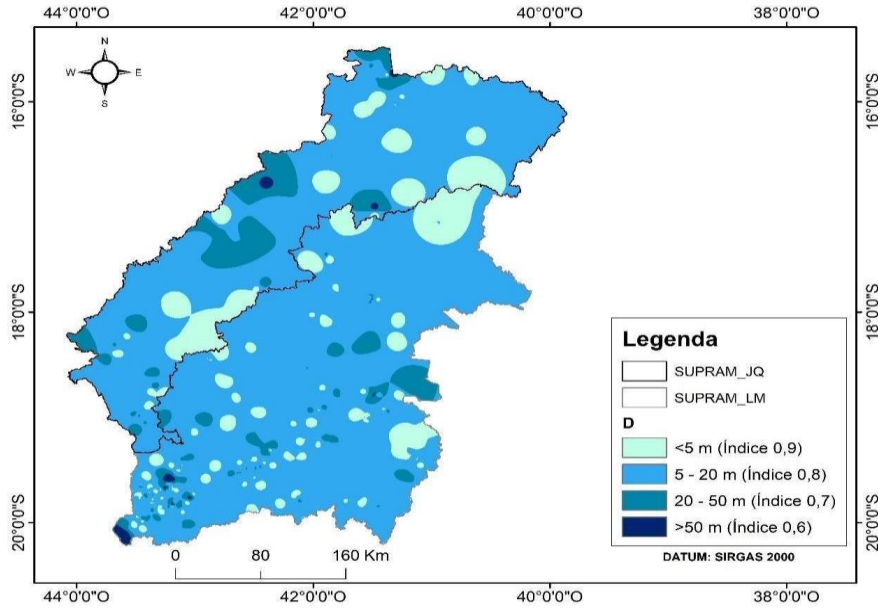
Tabela 7 – Análise estatística do parâmetro D

Parâmetros	SJQ	SLM
Média	13,09	12,63
Desvio padrão	11,52	18,00
Máximo	62,00	181,37
Mínimo	0,00	0,00
1º quartil	4,65	5,00
2º quartil	10,00	8,00
3º quartil	20,00	14,99

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Tal variação é esperada para aquíferos fraturados, predominantes em ambas as áreas estudadas, e que possui relevante heterogeneidade e anisotropia, com o valor mínimo, em ambas as áreas de 0 m e máximo 62 m (SJQ) e 181,37 m (SLM). Logo, em ambos os cenários resultantes, se tornam mais relevantes a observação dos valores medianos (2º quartil), os quais foram relativamente próximos nas SJQ e SLM de 10 e 8 m, respectivamente (TABELA 7). Sendo que, no 1º quartil, os valores de nível de água, em ambas, foram em torno de 5 m e no 3º quartil os valores de nível estático foram mais profundos na SJQ (20 m) do que na SLM (14,99 m). Os resultados das análises estatísticas apresentadas na Tabela 7, vão de encontro à distribuição espacial do parâmetro D (MAPA 4).

Mapa 4 – Distribuição espacial dos índices do parâmetro D



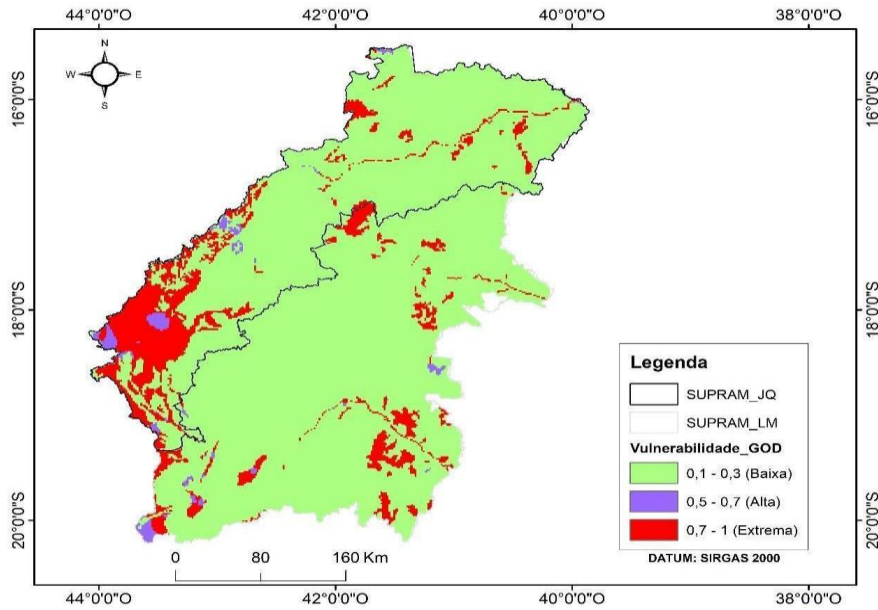
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

É possível observar, em ambas as áreas, predominância do índice 0,8 (Referente a Ne de 5 – 20 m). O índice mencionado abrange cerca de 83% da área da SLM e cerca de 72% da área da SJQ. De forma secundária, ocorreu o índice 0,9, o qual se fez presente nas SLM e SJQ, em 12 e 15 % da área, respectivamente.

4.4 Mapa de vulnerabilidade de GOD

O resultado da multiplicação dos mapas dos índices G, O e D, Equação 1, e reclassificação dos resultados para o índice de vulnerabilidade de GOD, de acordo com a Tabela 4, encontra-se no Mapa 5 apresentado a seguir.

Mapa 5 – Vulnerabilidade aquífera



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

No geral, conforme Mapa 5, em ambas as Suprams, o método apresentou maior ocorrência de índice de vulnerabilidade baixo, sendo este índice presente em mais de 80% da área da SJQ e em mais de 90% da área na SLM (TABELA 8). O índice de vulnerabilidade baixo foi o predominante em ambas as áreas analisadas, principalmente devido à presença representativa dos solos do tipo latossolos e argissolos, os quais são mais favoráveis para a proteção das águas subterrâneas. No entanto, nas duas regiões, ocorreram porções de áreas com vulnerabilidade alta e extrema, que juntas, representaram 18,54% da área na SJQ e 7,67% da área na SLM. Na SJQ, os dois índices mencionados ocorreram de forma mais concentrada na porção sudoeste e sul e de forma mais pontual nas demais porções da área. Já na SLM, de forma geral, os índices menos favoráveis, ocorreram de forma localizada na área, em áreas menores e descontínuas, nas porções sudoeste, nordeste e noroeste, demonstrando uma extensão maior na porção sudeste da área.

Tabela 8 – Índices de vulnerabilidade, por percentual de área, em ambas as Suprams

Vulnerabilidade	% de Área	
	SJQ	SLM
Baixa	81,11	92,33
Média	0,34	0,00
Alta	6,26	0,86
Extrema	12,29	6,81

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Os índices G e O foram determinantes para a ocorrência dos índices alto e extremo de vulnerabilidade, podendo ser constatada essa correlação nos Mapas 2 e 3 desses índices.

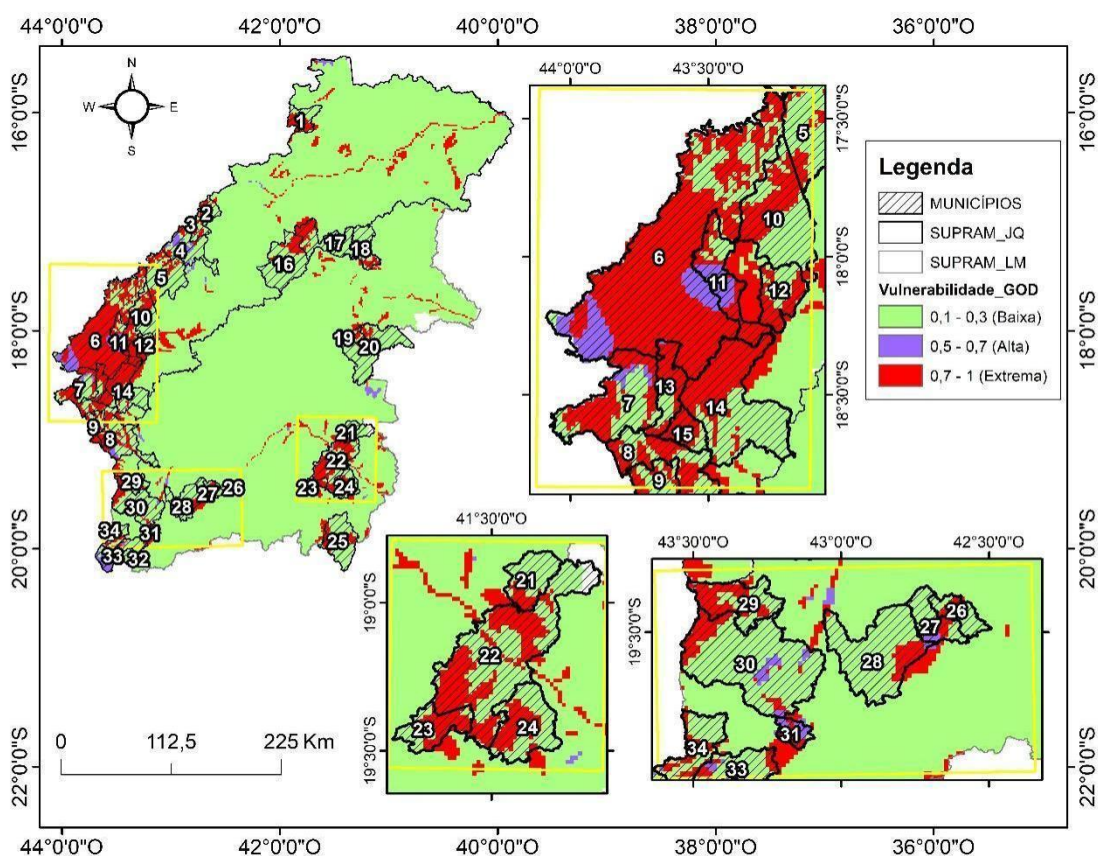
Scolforo, Carvalho e Oliveira (2008), realizaram a análise do potencial de contaminação dos aquíferos correspondente à susceptibilidade de contaminação da água subterrânea por substâncias tóxicas para todo o estado de Minas Gerais, logo, abrangendo a área estudada. No entanto, a metodologia adotada foi outra, considerando fatores como, características litológicas, falhas geológicas, profundidade modal do aquífero, e condutividade elétrica da água subterrânea e presença de metais pesados em concentrações elevadas. Fazendo um recorte apenas da área de estudo, observou-se, na SLM, que no mapa gerado pelos autores predominou o índice de vulnerabilidade muito baixo, resultando em um cenário, no geral, menos crítico do que o encontrado neste estudo com o método de GOD, onde predominou o índice de vulnerabilidade baixo. Assim como neste trabalho, os autores também observaram maior potencial de contaminação próximo às redes de drenagem, com os índices de vulnerabilidades médios e altos, já com a metodologia do trabalho essas regiões apresentaram índices de vulnerabilidade extrema.

Na SJQ, Scolforo, Carvalho e Oliveira (2008), também observaram a predominância do índice de vulnerabilidade baixo, no entanto, com percentual menos representativo do que o método de GOD, sendo verificado o índice de vulnerabilidade médio também, o que não ocorreu neste estudo. Grande parte da porção de área do estudo com o método de GOD com o índice alto e extremo, foi identificada pelos autores em questão, com índice de vulnerabilidade alto apenas. Ao contrário do que ocorreu na SLM, o método GOD na SJQ resultou, no geral, em um cenário menos crítico, se comparado com os resultados obtidos pelos autores supracitados. As diferenças denotadas são oriundas dos diferentes parâmetros considerados em cada metodologia. No entanto, mesmo com as diferenças observadas, notou-

se que há relativa proximidade dos resultados, principalmente da SLM e nas áreas mais críticas da SJQ.

No Mapa 6, é possível observar o mapa da distribuição espacial dos municípios inseridos na maioria das áreas indicadas com índice de vulnerabilidade alto e extremo.

Mapa 6 – Distribuição espacial dos municípios inseridos nas áreas com índice de vulnerabilidade alto e extremo



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Na SJQ há 15 municípios que possuem partes relevantes de suas áreas com índices de vulnerabilidades alto e/ou extremo, merecendo destaque o município de Diamantina (6) e dos seus arredores, municípios 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15 (MAPA 6). Dos municípios mencionados, os que carecem de maior atenção são os municípios de Senador Modestino Gonçalves (10), Feliciano dos Santos (12), Datas (13) e Presidente Kubitschek (15), os quais,

possuem as águas subterrâneas como única (10, 12 e 15) ou principal (13), fonte para abastecimento urbano (QUADRO 1).

Quadro 1 – Dependências por água subterrânea na SJQ

Supram Jequitinhonha		
Nº	Município	*Manancial de abastecimento
1	Santa Cruz de Salinas	Exclusivamente Superficial
2	José Gonçalves de Minas	Preponderantemente Superficial
3	Leme do Prado	Preponderantemente Superficial
4	Turmalina	Exclusivamente Superficial
5	Carbonita	Exclusivamente Superficial
6	Diamantina	Preponderantemente Superficial
7	Gouveia	Exclusivamente Superficial
8	Conceição do Mato Dentro	Exclusivamente Superficial
9	Congonhas do Norte	Exclusivamente Superficial
10	Senador Modestino Gonçalves	Exclusivamente Superficial
11	Couto de Magalhães de Minas	Preponderantemente Superficial
12	Félicio dos Santos	Exclusivamente Subterrâneo
13	Datas	Preponderantemente Subterrâneo
14	Serro	Exclusivamente Subterrâneo
15	Presidente Kubitschek	Exclusivamente Subterrâneo

*Manancial de abastecimento no perímetro urbano

Fonte: ANA (2010)

Na SLM há 19 municípios com porções de área com índice de vulnerabilidade extrema e/ou alta (MAPA 6). Mesmo com um quantitativo de municípios superior aos identificados na SJQ, na SLM as áreas classificadas com os índices mencionados são mais fragmentadas espacialmente, tornando o cenário dos municípios indicados, no geral, mais favorável. A situação mencionada pode ser observada nos municípios de Novo Oriente de Minas (18) e Ipatinga (26), abastecidos exclusivamente por águas subterrâneas e Coronel Fabriciano (27), abastecido preferencialmente por águas subterrâneas (QUADRO 2). As exceções são os municípios 22, 23, 24, 29, 31, 32 e 33, com porções de áreas relevantes com índices de vulnerabilidade alto e/ ou extremo. Sendo que o município de João Monlevade (31), possui quase a totalidade de sua área com índice alto e extremo.

Quadro 2 – Dependências por água subterrânea na SLM

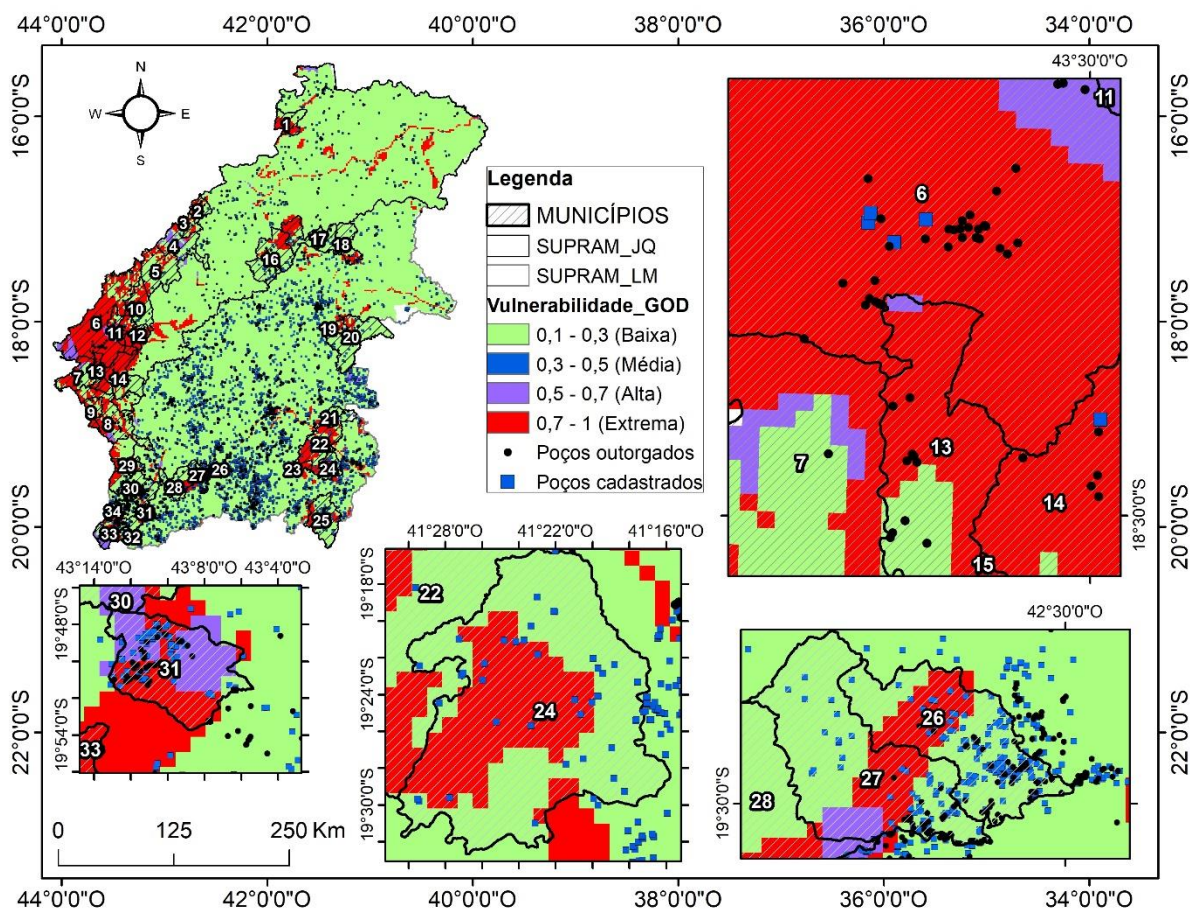
Supram Leste Mineiro		
Nº	Município	*Manancial de abastecimento
16	Novo Cruzeiro	Preponderantemente Superficial
17	Carai	Preponderantemente Superficial
18	Novo Oriente de Minas	Exclusivamente Subterrâneo
19	Ouro Verde de Minas	Preponderantemente Superficial
20	Ataléia	Exclusivamente Superficial
21	São Geraldo do Baixio	Exclusivamente Superficial
22	Conselheiro Pena	Exclusivamente Superficial
23	Alvarenga	Exclusivamente Superficial
24	Santa Rita do Ituelo	Exclusivamente Superficial
25	Mutum	Exclusivamente Superficial
26	Ipatinga	Exclusivamente Subterrâneo
27	Coronel Fabriciano	Preponderantemente Subterrâneo
28	Antônio Dias	Preponderantemente Superficial
29	Itambé do Mato Dentro	Preponderantemente Superficial
30	Itabira	Preponderantemente Superficial
31	João Monlevade	Preponderantemente Superficial
32	Catas Altas	Exclusivamente Superficial
33	Santa Bárbara	Preponderantemente Superficial
34	Barão de Cocais	Exclusivamente Superficial

*Manancial de abastecimento no perímetro urbano

Fonte: ANA (2010)

Quando sobreposamos a malha de poços outorgados e cadastrados sobre o mapa de vulnerabilidade, conforme Mapa 7, observa-se seis municípios que merecem destaque, sendo dois deles localizados na SJQ: Diamantina (6) e Datas (13) e os demais na SLM: Santa Rita do Ituelo (24), Ipatinga (26), Coronel Fabriciano (27) e João Monlevade (31).

Mapa 7 – Distribuição espacial dos poços inseridos nos municípios localizados nas regiões de índices alto e extremo



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Os municípios de Diamantina (6) e João Monlevade (31), mesmo sendo abastecidos preponderantemente por água superficial, apresentam uma concentração considerável de poços e a maioria estão localizados em regiões com vulnerabilidade extrema e/ou alta (MAPA 7). O município de Santa Rita do Itueto (24), abastecido exclusivamente por água superficial em sua zona urbana, também apresenta uma alta concentração de poços, os quais, em muitos casos são as únicas fontes disponíveis na zona rural, não atendida por rede de distribuição de água, justificando o fato da totalidade dos poços serem cadastrados e não outorgados. Neste município há uma distribuição, no geral, homogênea dos poços, sendo que alguns estão inseridos em áreas de vulnerabilidade extrema. Os municípios Datas (13), Ipatinga (26) e Coronel Fabriciano (27) apresentam dependência exclusiva e/ ou preponderante de água subterrânea. Datas (13), não

possui tantos poços, comparados aos outros cinco municípios mencionados, no entanto, a maioria dos poços existentes estão em áreas de vulnerabilidade extrema. O oposto ocorre nos municípios de Ipatinga (26) e Coronel Fabriciano (27), ambos possuem uma quantidade significativa de poços, que em sua maioria, estão situados em regiões de baixa vulnerabilidade, possuindo uma concentração menor em regiões de vulnerabilidade extrema.

5 CONCLUSÃO

O índice de vulnerabilidade baixo foi o predominante em ambas as áreas analisadas, principalmente devido à presença representativa de tipos de solos mais favoráveis para a proteção das águas subterrâneas, os latossolos e argissolos. No entanto, foi constatado que a mediana dos níveis estáticos, nas SJQ e SLM, de 10 e 8 m, respectivamente, é desfavorável para a proteção das águas subterrâneas, frente à metodologia de GOD. As porções de áreas com vulnerabilidade alta e extrema, mesmo não ultrapassando 20% na SJQ e 8% da área na SLM, atingiram 15 municípios na primeira Supram e 19 municípios na segunda. Dos municípios mencionados, carecem de atenção maior, 4 municípios que possuem a água subterrânea como principal fonte de captação (Senador Modestino Gonçalves, Feliciano dos Santos, Datas e Presidente Kubitschek) na SJQ e 3 municípios, que se encontram no mesmo cenário, na SLM (Novo Oriente de Minas, Ipatinga e Coronel Fabriciano). Ao observar a distribuição dos poços existentes nas áreas de estudo, os municípios que apresentaram uma situação mais crítica foram Diamantina na SJQ e Coronel Fabriciano na SLM.

Ao comparar o resultado obtido com os de outros autores na mesma área, mesmo frente a utilização de distintas metodologias, observou-se que há relativa proximidade dos resultados, principalmente da SLM e nas áreas mais críticas da SJQ.

Por fim, mesmo sendo abastecidos preponderantemente por água superficial, esses dois municípios possuem uma concentração considerável de poços localizados em regiões com vulnerabilidade extrema e/ou alta. Mesmo predominando na área de estudo o índice de vulnerabilidade baixa, é importante pontuar que conforme o referencial bibliográfico apresentado, a vulnerabilidade de aquíferos não deve ser negligenciada. O método GOD, apesar da sua simplicidade, é amplamente utilizado e os seus resultados podem nortear a tomada de decisão em prol da proteção das águas subterrâneas.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Atlas Brasil**: abastecimento urbano de água: resultado por estado. Brasília: ANA: Engecorps; Cobrape, 2010. 2v.
- AMARAL, F. C. S. *et al.* **Mapeamento de solos e aptidão agrícola das terras do Estado de Minas Gerais**. Rio de Janeiro: EMRAPA Solos, 2004. 95 p.
- AUGE, M. Vulnerabilidad de acuíferos. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**, Mexico, n.4, p.85-103, 2004.
- BORGES, V. M., ATHAYDE, G. B.; REGINATO, P. A. R. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral no Estado do Paraná – Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 31, n.4, p. 327-337, 2017.
- CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução nº 396, de 7 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 07 abr. 2008. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0396-030408.PDF>. Acesso em: 03 jun. 2024.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 306 p.
- FEITOSA, F. A. C. *et al.* **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 812 p.
- FERRAZ, C. M. L. **A Evolução do relevo adjacente à margem continental passiva brasileira: das “Chapadas” do Jequitinhonha à planície costeira do sul da Bahia**. 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/339658522_A_EVOLUCAO_DO_RELEVO_ADJACENTE_A_MARGEM_CONTINENTAL_PASSIVA_BRASILEIRA_DAS_CHAPADAS_DO_JEQUITINHONHA_A_PLANICIE_COSTEIRA_DO_SUL_DA_BAHIA/link/5e5e5d74299bf1bdb84d3a6a/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7InBhZ2UiOiJwdWJsaWNhdGlvbiIsInByZXZpb3VzUGFnZSI6bnVsbH19. Acesso em: 20 maio 2024.
- FERRAZ, C. M. L. **Inundações e escorregamentos em Teófilo Otoni, Minas Gerais**: uma situação de risco ambiental em continuada construção, segundo indicadores geomorfológicos. 2019. 202f. (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/32543/1/TESE%20CAIO.pdf>. Acesso em: 20 maio 2024.

FERREIRA, J. P. C. L **Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e proteção dos aquíferos de Portugal**. 1998. Disponível em: <http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/023.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2024.

FIUME, B. *et al.* **Mapa hidrogeológico do estado de Minas Gerais**. [Belo Horizonte]: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2022. Mapa. Escala 1:500.000. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/23412?mode=full>. Acesso em: 01 jun.2024.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. Lima, Peru1988. 81 p. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual.

FOSTER, S. *et al.* **Protección de la calidad del agua subterránea: guia para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales**. Washington: Banco Mundial, 2003. 115 p.

HERNANDEZ, P. G. L. *et al.* Efeito da interpolação de dados hidrogeológicos em aquíferos sedimentares: estudo de caso no estado do Paraná. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, v.35, n. 1, p. 1-11, 2020.

HIRATA, R. Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a vulnerabilidade à poluição de aquíferos. *In: SEMINÁRIO-TRALLER PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACION: METODOLOGIA*, 1., 2001, Touca, México. **Anais [...]**. [S.L]: Hidrored, 2001. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/0bbc2ceb-d649-4db8-bd4192d45b3a70c0/1616506.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2024.

HIRATA, R. *et al.* **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil**. São Paulo: Universidade de São Paulo; Instituto de Geociências, 2019. 64 p. Disponível em: https://igc.usp.br/igc_downloads/Hirata%20et%20al%202019%20Agua%20subterranea%20e%20sua%20importancia.pdf. Acesso em: 11 maio 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Folha SE 24 Rio Doce**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial do solo. Rio de Janeiro, 1987. 544 p. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv3613_cd.zip. Acesso em: 02 jun. 2024.

KUCHENBECKER, M. H. A. Evolução geológica dos vales do Jequitinhonha e Mucuri: uma revisão. **Revista Espinhaço**, Diamantina, v. 7, p. 15-26, 2018. Disponível em: <https://revistas.ufvjm.edu.br/revista-espinhaco/article/view/116/127>. Acesso em: 12 jun. 2024.

MARQUES, J. H. S.; OLIVEIRA, I. B. DE. Vulnerabilidade dos Aquíferos do Município de Salvador, Bahia, Brasil, utilizando o Método GOD. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, v.34, n.1, 2020. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29767/19236>. Acesso em: 10 maio 2024.

MINAS GERAIS. **Lei 13.199, de 29 de janeiro de 1999**. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e dá outras providências. Belo Horizonte: Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 1999. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/LEI/13199/1999/?cons=1>. Acesso em: 10 maio 2024.

PARIS, M. *et al.* Hidrogeología urbana: protección de pozos de abastecimiento em la gestión de los recursos hídricos subterráneos. **Revista Serie Correlación Geológica**, Tucumán, v. 13, p. 153-160, 1999.

PEDROSA-SOARES, A. C. **A geologia da Folha de Virgem da Lapa**. Belo Horizonte, IGC; UFMG, 1981. 25 p. Relatório Final da Bolsa de Aperfeiçoamento-CNPq.

PINTO, C. P.; SILVA, M. A. **Mapa geológico do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CODEMIG; CPRM, 2014. Escala 1:1.000.000. Disponível em: <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/>. Acesso em: 03 jun. 2024.

RIBEIRO, D. M.; ROCHA, W. F.; GARCIA, A. J. V. Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do rio Siriri, Sergipe. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 25, n.1, p. 91-102. 2011. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/19366/17666>. Acesso em: 05 jun. 2024.

SCOLFORO, J. R. S.; CARVALHO, L. M. T.; OLIVEIRA, A. D. (ed.). **Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado de Minas Gerais**: componentes geofísico e biótico. Lavras: UFLA, 2008.

SAADI, A. A geomorfologia da Serra do Espinhaço em Minas Gerais e de suas margens. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.3, n. 1, p. 41-63, 1995. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11521/8259>. Acesso em: 22 maio 2024.

STRECK, E. V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER, 2008. 126 p.

STUARD, M.; MILNE, C. Groundwater quality implications of wastewater irrigation in León, México. *In*: CHILTON, J. (ed.). **Groundwater in the urban environment**: problems, processes and management. [S.l]: Balkema, 1997. p. 93-198. v.1. Disponível em: https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/9802/1/Leon_IAH%20MES.pdf . Acesso em: 10 jun. 2024.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da FAPEMIG/IGAM - Edital nº 003/2022 - Proposta APQ01266-22; do Núcleo Estratégico e Interdisciplinar de Engenharia do Mucuri (NEIEMUC); e do Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia (ICET) da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM).