

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geologia

Alice Zupo

**APLICAÇÃO E ADAPTAÇÕES DE MÉTODOS DE VULNERABILIDADE INTRÍNSECA EM
CLIMAS TROPICAIS – QUADRILÁTERO FERRÍFERO, BRASIL**

Belo Horizonte

2024

Alice Zupo

**APLICAÇÃO E ADAPTAÇÕES DE MÉTODOS DE VULNERABILIDADE INTRÍNSECA EM
CLIMAS TROPICAIS – QUADRILÁTERO FERRÍFERO, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula.

Coorientadores: Prof. Dr. Jarbas Lima Dias Sampaio, Prof. Dr. Jorge Geraldo Roncato Júnior e Profa. Dra. Marília Carvalho de Melo.

Belo Horizonte

2024

G963a
2024

Guimarães, Alice Zupo.

Aplicação e adaptações de métodos de vulnerabilidade intrínseca em climas tropicais [manuscrito] : Quadrilátero Ferrífero, Brasil / Alice Zupo Guimarães. – 2024. 102 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Rodrigo Sérgio de Paula.

Co-orientadores: Jarbas Lima Dias Sampaio, Jorge Geraldo Roncato Júnior e Marília Carvalho de Melo.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2024.

Bibliografia: f. 96-102.

1. Águas subterrâneas – Poluição. 2. Águas subterrâneas – Mapeamento – Teses. 3. Recursos hídricos – Administração – Teses. 3. Análise multivariada – Teses. 4. Quadrilátero Ferrífero (MG) – Teses. I. Paula, Rodrigo Sérgio de. II. Sampaio, Jarbas Lima Dias. III. Roncato, Jorge. IV. Melo, Marília Carvalho de. V. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. VI. Título.

CDU: 556.3(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DO IGC/UFMG



FOLHA DE APROVAÇÃO

**APLICAÇÃO E ADAPTAÇÕES DE MÉTODOS DE VULNERABILIDADE INTRÍNSECA
EM CLIMAS TROPICAIS – QUADRILÁTERO FERRÍFERO, BRASIL**

ALICE ZUPO GUIMARÃES

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, do Instituto de Geociências (IGC), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), como **REQUISITO PARCIAL** para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA, pelo Programa de Pós-graduação em Geologia do IGC/UFMG.

Aprovada em 23 de setembro de 2024, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Dr(a). Rodrigo Sérgio de Paula – Orientador(a)
UFMG

Prof(a). Dr(a). Paulo Henrique Ferreira Galvão
UFMG

Documento assinado digitalmente



MARIA ANTONIETA ALCANTARA MOURÃO

Data: 03/10/2024 15:18:35-0300

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

Dr(a). Maria Antonieta Alcântara Mourão
CPRM

Prof(a). Dr(a). Bruno Pirilo Conicelli
USP

Belo Horizonte, 23 de setembro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Aos meus amados pais, Luciana e Renato, sou eternamente grata por terem sonhado mais um sonho comigo, pela paciência nos momentos difíceis e por sempre acreditarem no meu potencial. Seu amor incondicional e incentivos foram fundamentais para que eu pudesse alcançar esta conquista.

Ao meu irmão Rafael e às minhas irmãs Nina, Anna, Giulia e Bruna, por todo suporte emocional nessa longa jornada. Vocês foram minha força e inspiração, e sou profundamente grata por tê-los ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, Rodrigo de Paula, pelos ensinamentos valiosos, pela disponibilidade constante, e pelos conselhos profissionais e pessoais. Sua orientação foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também os meus coorientadores, Marília de Melo (SEMAD), Jarbas Sampaio (UFMG) e Jorge Roncato (UFMG), por todo suporte e dedicação. Sem o apoio de você, esta conquista não seria possível.

Aos órgãos que apoiaram esse trabalho: IGAM e a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), que forneceram dados.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro na forma de concessão de bolsa de estudos.

Ao programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências (IGC), pela oportunidade de desenvolver essa pesquisa e pelo suporte acadêmico e institucional.

“Acabou galinha, acabou resguardo. ”
Em homenagem a minha avó Therezinha

RESUMO

A água é um recurso essencial à vida e desempenha um papel central na maioria das atividades econômicas. No entanto, o crescimento populacional e a expansão das atividades minerárias, quando realizados sem o devido planejamento ambiental, aumentam os riscos de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos. O mapeamento de vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos surge como uma ferramenta importante para identificar áreas com maior susceptibilidade à contaminação e, assim, promover ações de preservação e gestão sustentável da água subterrânea. Embora existam diversos métodos de vulnerabilidade, muitos deles não foram desenvolvidos para climas tropicais e não representam com precisão as condições reais de risco. Este estudo, portanto, propõe o desenvolvimento de um método de vulnerabilidade aplicável em múltiplos aquíferos, levando em consideração a avaliação da vulnerabilidade intrínseca na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero, especificamente no Sinclinal Moeda. Esta região é de grande relevância econômica devido à presença de minas de ouro e ferro, e hidrogeológica, devido aos mananciais que fornecem uma parte significativa da água consumida pela Região Metropolitana de Belo Horizonte. Destaca-se o Aquífero Cauê, considerado o principal reservatório de água subterrânea no Quadrilátero Ferrífero. Este desempenha um papel crucial tanto no abastecimento da população quanto no manejo dos empreendimentos minerários. Para essa avaliação, foram aplicados quatro métodos de vulnerabilidade: DRASTIC, SINTACS, GOD e EPIK, cada um desenvolvido para avaliar diferentes tipos de aquífero, incluindo fissurais, porosos e cársticos. Os métodos originais, quando aplicados ao Sinclinal Moeda, mostram-se pouco eficazes, uma vez que foram elaborados para serem aplicados em outros contextos, sem considerar as características de climas tropicais. Para superar essas limitações, foram introduzidas adaptações considerando as características físicas da área de estudo. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que os métodos específicos para cada tipo de aquífero, com as adaptações propostas, demonstraram maior eficiência em comparação com os métodos originais. O método DRASTIC, embora desenvolvido para todos os tipos de aquíferos, mostrou-se eficaz na identificação dos principais aquíferos suscetíveis à contaminação. Com base na aplicação e adaptação desses quatro métodos, foi desenvolvido o método, denominado GEOGRIC, destinado a avaliar a vulnerabilidade intrínseca à contaminação em múltiplos aquíferos para escalas regionais no Brasil. O método GEOGRIC, derivado do método DRASTIC, é um acrônimo para geologia (G), epicarste (E), uso e ocupação do solo (O), grau de confinamento (G), recarga (R), isópacas (I) e condutividade hidráulica (C). Este método demonstrou eficácia ao ser aplicado no Sinclinal

Moeda, identificando os aquíferos mais vulneráveis à contaminação, com destaque para os aquíferos das coberturas, Cauê e Gandarela.

Palavras-chave: Sinclinal Moeda; álgebra de mapas; estatística multivariada; água subterrânea.

ABSTRACT

Water is an essential resource for life and plays a central role in most economic activities. However, population growth and the expansion of mining activities, when conducted without proper environmental planning, increase the risks of contamination of groundwater resources. Mapping the vulnerability of aquifers to contamination emerges as an important tool to identify areas more susceptible to contamination and thus promote actions for the preservation and sustainable management of groundwater. Although there are several vulnerability assessment methods, many of them were not developed for tropical climates and do not accurately represent actual risk conditions. Therefore, this study proposes the development of a vulnerability method applicable to multiple aquifers, considering the intrinsic vulnerability assessment in the western portion of the Quadrilátero Ferrífero, specifically in the Moeda Syncline. This region is of great economic significance due to the presence of gold and iron mines, and hydrogeologically important because of the water sources that supply a significant portion of the water consumed by the Metropolitan Region of Belo Horizonte. Of particular note is the Cauê Aquifer, considered the main groundwater reservoir in the Quadrilátero Ferrífero. It plays a crucial role in both the water supply for the population and the management of mining enterprises. For this evaluation, four vulnerability methods were applied: DRASTIC, SINTACS, GOD, and EPIK, each developed to assess different types of aquifers, including fractured, porous, and karst aquifers. The original methods, when applied to the Moeda Syncline, proved to be less effective since they were designed for other contexts, without considering the characteristics of tropical climates. To overcome these limitations, adaptations were introduced based on the physical characteristics of the study area. Based on the results obtained, it was concluded that the methods tailored to each type of aquifer, with the proposed adaptations, demonstrated greater efficiency compared to the original methods. The DRASTIC method, although developed for all types of aquifers, proved effective in identifying the main aquifers susceptible to contamination. Based on the application and adaptation of these four methods, a new method, named GEOGRIC, was developed to assess the intrinsic vulnerability to contamination in multiple aquifers for regional scales in Brazil. The GEOGRIC method, derived from the DRASTIC method, is an acronym for geology (G), epikarst (E), land use and occupation (O), degree of confinement (G), recharge (R), isopachs (I), and hydraulic conductivity (C). This method proved effective when applied to the Moeda Syncline, identifying the most vulnerable aquifers to contamination, particularly the aquifers of the cover layers, Cauê, and Gandarela.

Keywords: Moeda Syncline; map algebra; multivariate statistics; ground water.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ARTIGO 1

- Figura 1 - Mapa de localização do Sinclinal Moeda, situado na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero. Destaque para as altitudes elevadas nos flancos com coloração avermelhada, onde estão localizados a Serra da Moeda (oeste) e Serra de Itabirito (leste).----- 27
- Figura 2 - Mapa de geologia da área de estudo, apresentando as unidades e estruturas presentes.----- 31
- Figura 3 – a) Mapa de hidrogeologia da área de estudo apresentando as seis unidades aquíferas e os quatro aquíferos. b) Mapa diferenciando as unidades de acordo com o tipo de aquífero. ----- 33
- Figura 4 – Aplicação do método SINTACS no Sinclinal Moeda. O índice final é representado na imagem inferior da direita, nota-se a predominância de classes de vulnerabilidade média e moderadamente alta. ---- 44
- Figura 5 – Modificação do método SINTACS no Sinclinal Moeda. Observa-se a mudança nos parâmetros tipo de cobertura (T) e topografia (S). No índice final, na imagem inferior a direita, foram observados aumento da classificação alta vulnerabilidade.----- 46
- Figura 6 - Método EPIK original com predominância da classificação de alta vulnerabilidade nas rochas da Formação Gandarela. ----- 47
- Figura 7 - Mapa de vulnerabilidade do método EPIK Modificado. Nota-se o incremento da classificação moderada e alta nessa adaptação.----- 49
- Figura 8 – Aplicação do método GOD no Sinclinal Moeda. O índice final é representado na última imagem inferior a direita, nota-se a predominância de classe de vulnerabilidade baixa.----- 50
- Figura 9 – Modificação do método GOD no Sinclinal Moeda. No índice final, na última imagem inferior a direita, foram observados aumento da classificação alta e extrema vulnerabilidade. ----- 52
- Figura 10 – Aplicação do método DRASTIC na área de estudo, com ênfase no mapa de vulnerabilidade final, na última imagem inferior direita, com predominância de classes alta e médio. ----- 53
- Figura 11 – Modificação do método DRASTIC, onde foram alterados os parâmetros Nível d'água (D), Recarga (R), Solos (S) e Condutividade Hidráulica (C). ----- 55
- Figura 12 – Gráfico comparativo do método GOD, SINTACS, EPIK e DRASTIC original e modificado das porcentagens de área de cada classificação. Ressalta-se que as classificações de vulnerabilidade são diferentes para cada método. ----- 56
- Figura 13 – Nova escala de classificação propostas para os quatro métodos utilizados na área de estudo, representando a localização de cada tipo de aquífero e o método de vulnerabilidade utilizado.----- 57

ARTIGO 2

- Figura 1 – Mapa de localização do Quadrilátero Ferrífero, com destaque para a megaestrutura do Sinclinal Moeda.----- 70
- Figura 2– Um dos trinta perfis elaborados para a área de estudo, onde a linha azul representa o nível de água subterrâneo.----- 76
- Figura 3 – Gráfico de loading com os sete parâmetros aplicados no método proposto. ----- 83

Figura 4– Aplicação do método GEOGRIC no Sinclinal Moeda. O último mapa inferior à esquerda representa o índice final de vulnerabilidade, indicando classes muito alta e alta nos aquíferos das coberturas, Cauê e Gandarela.----- 85

Figura 5 – a) Mapa de índice final de vulnerabilidade no Sinclinal Moeda utilizando o método GEOGRIC. b) Mapa das unidades aquíferas propostas por Zupo et al. (2024).----- 87

Figura 6 – a) Mapa de índice final de vulnerabilidade no Sinclinal Moeda utilizando o método GEOGRIC. b) Mapa de vulnerabilidade do método DRASTIC modificado. ----- 88

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

Tabela 1 – Fonte de dados dos parâmetros utilizados nos métodos de vulnerabilidade empregados nesta pesquisa.-----	34
Tabela 2 – Principais métodos de vulnerabilidade intrínseca, apresentando suas aplicações, além dos parâmetros dos métodos utilizados nesta pesquisa.-----	37
Tabela 3 – Detalhamento dos parâmetros utilizados no método GOD. Fonte: Modificado de Foster & Hirata (1988).-----	38
Tabela 4 – Detalhamento dos parâmetros utilizados no método SINTACS, a fórmula já apresenta os pesos definidos para aquíferos fissuras. Fonte: Modificado de Civita & De Maio (2000).-----	39
Tabela 5– Detalhamento dos parâmetros utilizados no método EPIK. Fonte: Modificado de Doerfliger, Jeannin & Zwahlen (1998).-----	40
Tabela 6– Detalhamento dos parâmetros utilizados no método DRASTIC. Fonte: Modificado de Aller <i>et al.</i> (1987).-----	42
Tabela 7– Porcentagem de área de cada método adaptado do seu tipo de aquífero, SINTACS (Aquífero Fissural), EPIK (Aquífero Cárstico), GOD (Aquífero Poroso) com a área representativa destes tipos de aquífero com o método DRASTIC modificado.-----	58
Tabela 8– Estatística descritiva, utilizando variância e desvio padrão para comparação entre os métodos e os tipos de aquíferos da área de estudo.-----	58

ARTIGO 2

Tabela 1 – Descrição das unidades hidrogeológicas presentes no Sinclinal Moeda.-----	72
Tabela 2 – Fonte de dados dos parâmetros aplicados no método proposto.-----	75
Tabela 3 – Variação e avaliação do parâmetro geologia.-----	79
Tabela 4 – Variação e avaliação do parâmetro epicarste.-----	79
Tabela 5 – Variação e avaliação do parâmetro uso e ocupação do solo.-----	80
Tabela 6 – Variação e avaliação do parâmetro grau de confinamento.-----	80
Tabela 7 – Variação e avaliação do parâmetro recarga.-----	80
Tabela 8– Variação e avaliação do parâmetro isópacas.-----	81
Tabela 9 – Variação e avaliação do parâmetro condutividade hidráulica.-----	81
Tabela 10 – Área em porcentagem de cada avaliação/parâmetro.-----	82
Tabela 11 – Autovalores e suas respectivas porcentagens do conjunto de dados de todos os parâmetros.----	82
Tabela 12 – Matriz das sete componentes principais.-----	82

Tabela 13 – Pesos definidos para os parâmetros utilizados no método proposto. -----	84
Tabela 14 – Equação final do método GEOGRIC e classes de vulnerabilidade. -----	84

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Justificativa.....	16
1.2	Objetivos.....	17
1.3	Apresentação do Trabalho	18
1.4	Revisão Bibliográfica	19
2	ARTIGO I – APLICAÇÃO E ADAPTAÇÃO DOS MÉTODOS DE VULNERABILIDADE INTRÍNSECA NO SISTEMA AQUÍFERO DA PORÇÃO OESTE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, BRASIL.....	22
2.1	Introdução.....	25
2.2	Caracterização da Área de Estudo	26
2.3	Caracterização Geológica e Hidrogeológica.....	29
2.4	Materiais e Métodos.....	34
2.4.1	Banco de Dados	34
2.4.2	Métodos de Vulnerabilidade.....	37
2.4.2.1	Método GOD	38
2.4.2.2	Método SINTACS	38
2.4.2.3	Método EPIK.....	40
2.4.2.4	Método DRASTIC.....	41
2.4.3	Análise Estatística.....	42
2.5	Resultados e Discursões	43
2.5.1	Método SINTACS	43
2.5.1.1	SINTACS Original	43
2.5.1.2	SINTACS Modificado	45
2.5.2	Método EPIK.....	46
2.5.2.1	EPIK Original	47
2.5.2.2	EPIK Modificado.....	48
2.5.3	Método GOD	49
2.5.3.1	GOD Original	50

2.5.3.2	GOD Modificado	51
2.5.4	Método DRASTIC	53
2.5.4.1	DRASTIC Original	53
2.5.4.2	DRASTIC Modificado.....	54
2.5.5	Comparação dos métodos	56
2.6	Conclusões e Recomendações	58
2.7	Referências Bibliográficas	60
3	ARTIGO II – GEOGRIC: MÉTODO PARA AVALIAR A VULNERABILIDADE INTRÍNSECA DE AQUÍFEROS EM REGIÕES TROPICAIS – BRASIL	66
3.1	Introdução	68
3.2	Localização	69
3.3	Contexto Geológico	70
3.4	Contexto Hidrogeológico.....	71
3.5	Materiais e Métodos	72
3.5.1	Seleção dos Parâmetros	72
3.5.2	Definição dos Pesos da Equação	74
3.5.3	Banco de Dados	75
3.6	Resultados e Discussões	78
3.6.1	Formulação dos Parâmetros.....	78
3.6.2	Definição dos Pesos	81
3.6.3	Aplicação Experimental.....	84
3.6.4	Comparação com o método GEOGRIC.....	87
3.7	Conclusões e Recomendações	89
3.8	Referências Bibliográficas.....	90
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
5	REFERÊNCIAS.....	96

1 INTRODUÇÃO

A contaminação dos aquíferos é uma ameaça crescente em escala global, resultante da urbanização acelerada, do desenvolvimento industrial, das atividades agrícolas e a falta de um planejamento territorial adequado. Esses fatores contribuem para o uso ineficiente dos recursos hídricos, impactando negativamente tanto o meio ambiente quanto a economia (Miranda *et al.*, 2015).

Dada a importância das águas subterrâneas para diversos usos, especialmente o abastecimento público, e considerando os crescentes impactos causados pela superexploração e pela degradação da qualidade da água por atividades antrópicas, torna-se essencial o desenvolvimento de instrumentos de planejamento e gestão adequados para o uso sustentável desses recursos (Francisco, 2018).

O mapeamento da vulnerabilidade constitui uma ferramenta fundamental nesse processo, permitindo identificar áreas mais suscetíveis à contaminação com base nas características físicas regionais. Conforme Foster *et al.* (2002), o mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos é frequentemente o primeiro passo na avaliação do risco de contaminação da água subterrânea e na proteção de sua qualidade.

Atualmente, diversos métodos estão disponíveis para avaliar a vulnerabilidade ao risco de contaminação dos aquíferos, sendo que muitos deles foram desenvolvidos em contextos de clima temperado (Azevedo, 2018). Dessa forma, os métodos tradicionais de avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos apresentam limitações significativas quando aplicados em regiões de clima tropical, como no Brasil, especialmente em relação às características hidrogeológicas específicas dessas áreas.

A presente pesquisa foca na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero, onde o Sinclinal Moeda se destaca pela sua importância hidrológica regional. Esta área abriga reservas subterrâneas e zonas de grande relevância para a recarga de mananciais que alimentam as bacias dos rios Paraopeba e das Velhas, cruciais para o abastecimento das populações e para o suporte de atividades econômicas na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) e em municípios adjacentes (Formoso, 2014). O Sinclinal Moeda também inclui a principal unidade aquífera do Quadrilátero Ferrífero, o Aquífero Cauê (Mourão, 2007).

Atualmente, mais de 20 empreendimentos de extração de minério de ferro operam no Sinclinal Moeda, demandando grandes volumes de água tanto para o beneficiamento do minério quanto para o rebaixamento do nível do aquífero (Magalhães *et al.*, 2024).

Considerando a potencialidade dos recursos hídricos nesta região, o objetivo deste

estudo é identificar as áreas mais suscetíveis à contaminação por meio de técnicas de mapeamento da vulnerabilidade intrínseca do sistema aquífero do Sinclinal Moeda.

1.1 Justificativa

A gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos representa um desafio significativo para os órgãos governamentais e a comunidade científica. Com a crescente demanda por água e a pressão antrópica sobre os recursos naturais, torna-se imprescindível aplicar métodos de vulnerabilidade para identificar áreas susceptíveis à contaminação.

O desenvolvimento de um método de avaliação de vulnerabilidade visa preencher uma lacuna existente na literatura e nas práticas de gestão de recursos hídricos no Brasil. A maioria dos métodos de avaliação de vulnerabilidade disponíveis foram desenvolvidos em contextos diferentes do clima tropical brasileiro e não consideram adequadamente todos os parâmetros relevantes para esse ambiente específico. Assim, os resultados obtidos por meio dos métodos tradicionais podem não refletir com precisão as condições da região de estudo.

Além disso, a escolha dos parâmetros para o método de vulnerabilidade foi realizada com o intuito de facilitar futuras pesquisas. As variáveis foram selecionadas com base em sua relevância para o contexto local e na facilidade de obtenção dos dados, garantindo que o método proposto seja não apenas cientificamente robusto, mas também prático e aplicável.

Este trabalho foca especificamente na região do Sinclinal Moeda, um importante manancial para o abastecimento de água da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). O Sinclinal Moeda desempenha um papel crucial no fornecimento de água devido ao seu elevado potencial hídrico. No entanto, as alterações antrópicas, como a urbanização e os empreendimentos minerários, podem comprometer significativamente a capacidade de produção de água desse sistema, com graves consequências para a segurança hídrica da RMBH. Portanto, este trabalho pretende identificar e mapear as áreas mais vulneráveis, garantindo a proteção e a sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos.

1.2 Objetivos

O objetivo geral é desenvolver um método para avaliar e propor a vulnerabilidade intrínseca à contaminação, aplicável para múltiplos aquíferos do Brasil.

Como objetivos específicos destacam-se:

- Definir os métodos de vulnerabilidade de aquíferos para serem aplicados no sistema aquífero do Sinclinal Moeda;
- Aplicação dos métodos selecionados para cada tipo de aquífero na área de estudo;
- Comparar como os métodos que determinam a vulnerabilidade se comportam com os diferentes tipos de unidades aquíferas da região de interesse;
- Identificar as potenciais limitações dos métodos utilizados;
- Realizar as adaptações necessárias para que se adequem às características físicas da área de estudo;
- Analisar as regiões onde predominam os maiores graus de vulnerabilidade associados ao mapa de uso e ocupação do terreno;

1.3 Apresentação do Trabalho

A dissertação está organizada de modo a apresentar os resultados em formato de artigos científicos. No primeiro artigo, é detalhada a aplicação e adaptação de métodos de avaliação da vulnerabilidade intrínseca à contaminação do sistema aquífero do Sinclinal Moeda. Foram selecionados quatro métodos para essa avaliação, considerando os diferentes tipos de aquíferos: DRASTIC, SINTACS, GOD e EPIK.

O método DRASTIC foi desenvolvido para ser aplicado em diversos tipos de aquífero, enquanto o método SINTACS foi desenvolvido para aquífero fissurais. O método GOD é direcionado a aquíferos porosos, e o método EPIK é destinado a aquíferos cársticos. Além da aplicação desses métodos, foram feitas adaptações para ajustar as características físicas da região, levando em conta os parâmetros que se mostram menos eficientes para as condições locais.

Os métodos originais apresentaram resultados pouco significativos, uma vez que foram elaborados para serem aplicados em contextos diferentes, sem considerar as características dos climas tropicais. Para superar essa limitação, foram introduzidas adaptações nos métodos, considerando a geologia e hidrogeologia específica da área de estudo. Como os métodos aplicados neste estudo não foram desenvolvidos considerando as características físicas do Brasil, recomenda-se a elaboração de um método especificamente projetado para ser aplicado a múltiplos aquíferos.

O segundo artigo propõe o desenvolvimento de um método para avaliar a vulnerabilidade intrínseca à contaminação, aplicável a sistemas aquíferos do Brasil. Este método visa preencher uma lacuna existente na literatura e nas práticas de gestão de recursos hídricos no país. A maioria dos métodos disponíveis não foram elaborados para aplicação em regiões de climas tropicais, resultando em avaliações que podem não representar fielmente as condições de vulnerabilidade. O método proposto busca abordar essa deficiência, incorporando variáveis relevantes para o contexto local e facilitando futuras pesquisas e aplicações práticas.

Por fim, o capítulo final da dissertação apresenta recomendações para a continuidade dos estudos e as conclusões gerais do trabalho. Este capítulo discute as implicações dos resultados e sugere direções para pesquisas futuras, com o objetivo de aprimorar ainda mais a gestão sustentável dos recursos hídricos na região do Sinclinal Moeda e em outras áreas de similar relevância hidrogeológica.

1.4 Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma síntese das principais definições, métodos e componentes relacionados ao estado da arte sobre a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos, com base em uma revisão bibliográfica.

A água subterrânea é um recurso natural essencial para o fornecimento seguro e sustentável de água potável em áreas urbanas e rurais, desempenhando um papel crucial para o bem-estar humano e para manutenção de diversos ecossistemas. Entretanto, esses recursos hídricos estão cada vez mais ameaçados por processos de contaminação decorrente da urbanização, desenvolvimento industrial, atividades agrícolas e empreendimentos minerários (Foster *et al.*, 2002).

Conforme destacado por Beato, Monsore & Bertachini (2006), as atividades antrópicas têm intensificado os conflitos entre os usuários dos recursos hídricos, especialmente devido à inadequação na disposição de resíduos sólidos, lançamentos de efluentes, rebaixamento dos níveis de água em empreendimentos minerários, e a captação excessiva dos mananciais. Esses fatores têm comprometido o escoamento de base e a integridade dos ecossistemas ciliares.

O mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos é uma ferramenta essencial para a gestão dos recursos hídricos, fornecendo uma base para o planejamento e controle das atividades humanas, a fim de prevenir a contaminação de aquíferos (Souza *et al.*, 2011). O conceito de vulnerabilidade das águas subterrâneas foi inicialmente explorado por Le Grand (1964) e Margat (1968), ganhando maior relevância a partir da década de 1980, com os estudos de Aller *et al.* (1987), Foster *et al.* (1987), Foster & Hirata (1988), consolidando-se com diversas interpretações ao longo do tempo.

Foster (1987) define a vulnerabilidade do aquífero como o conjunto de características intrínsecas das camadas que separam o aquífero saturado da superfície, determinando sua suscetibilidade à contaminação. Vrba & Zaporotec (1994), por sua vez, definiram que vulnerabilidade é uma propriedade intrínseca que reflete a sensibilidade do aquífero à alteração da qualidade das águas em decorrência de impacto antrópicos ou naturais.

Neste contexto, destacam-se duas principais abordagens: a vulnerabilidade intrínseca e vulnerabilidade específica (Maia, 2011). Doerfliger, Jeannin & Zwahlen (1988) diferenciam a vulnerabilidade intrínseca, que reflete a vulnerabilidade relacionada às características geológicas, da vulnerabilidade específica, que é definida para um contaminante particular considerando suas propriedades específicas, além de fatores hidrogeológicos e geológicos.

De acordo com Foster *et al.* (2006), esses métodos podem ser classificados em três

categorias principais, conforme a abordagem proposta por Vrba e Zaporozec (1994):

a) Ambientes hidrogeológicos: baseiam-se na avaliação qualitativa da vulnerabilidade com base nas características gerais do ambiente, utilizando mapas temáticos como suporte (Albinet & Margat, 1970).

b) Modelos análogos: empregam expressões matemáticas para os parâmetros-chave, como o tempo médio de trânsito na zona vadosa, que servem como indicadores do grau de vulnerabilidade (Monkhouse, 1983).

c) Sistemas paramétricos: utilizam parâmetros específicos como indicadores de vulnerabilidade e aplicam seus valores e interações para gerar um índice de vulnerabilidade, seja relativo ou absoluto. Exemplos desse método incluem os métodos DRASTIC e GOD.

Diversos métodos têm sido desenvolvidos e aplicados de forma sistemática para avaliar a vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas, cada um com suas vantagens e limitações. Nenhum método, contudo, pode ser considerado o mais adequado para todas as situações (Foster *et al.*, 2002). Segundo Auge (2007), a escolha do método mais adequado para avaliar a vulnerabilidade em uma determinada região depende de fatores como o nível de conhecimento e a disseminação desses métodos nas comunidades científicas, a disponibilidade de informações, o alcance da avaliação e a validação de resultados.

Os mapas de vulnerabilidade do aquífero oferecem uma primeira avaliação dos riscos potenciais de contaminação da água subterrânea, auxiliando profissionais de regulação, planejamento e desenvolvimento territorial na análise de propostas de desenvolvimento e estabelecimento de prioridades para o controle de contaminação e monitoramento da qualidade da água subterrânea (Maia, 2011).

A identificação de áreas sensíveis à contaminação de aquíferos é crucial para aprimorar o planejamento e apoiar a tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos. Nesse contexto, os mapas de vulnerabilidade são ferramentas essenciais para a proteção ambiental, prevenindo a contaminação (Miranda *et al.*, 2015).

A área de estudo localiza-se no Quadrilátero Ferrífero (QF), uma região onde o avanço do conhecimento hidrogeológico tem se intensificado nas últimas décadas, impulsionado pela necessidade de entender o funcionamento das rochas armazenadoras e produtoras de água, especialmente para as atividades minerárias e abastecimento humano (Ramos, Cordeiro & Fernandes, 2020). Consequentemente, órgãos e entidades ambientais têm demandado ações para compreender a hidrodinâmica dos aquíferos em razão da importância estratégica para o abastecimento público e para a manutenção de ecossistemas (Beato, Monsorens & Bertachini (2006).

O principal aquífero da região, o Aquífero Cauê, está associado à unidade geológica hospedeira dos corpos de minérios de ferro. Este aquífero possui significativo potencial hidrogeológico, sendo essencial para o abastecimento de parte da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), além de desempenhar um papel crucial na manutenção das condições ambientais locais (Ramos, Cordeiro & Fernandes, 2020).

A RMBH, que atualmente abriga cerca de 6 milhões de habitantes e apresentou um crescimento populacional de aproximadamente 11% entre 2010 e 2020 (IBGE 2020), é abastecida pelas bacias hidrográficas dos rios das Velhas e Paraopeba, os quais são significativamente alimentados pelo Aquífero Cauê (Magalhães *et al.*, 2023).

Embora o Quadrilátero Ferrífero represente uma das áreas mais investigadas, em termos geológicos e de exploração mineral no território nacional, a hidrogeologia ainda carece de estudos mais detalhados e de aspecto integrado tendo em vista que as avaliações existentes tratam especificamente da área no entorno das minas de ferro (Mourão, 2007).

2 ARTIGO I – APLICAÇÃO E ADAPTAÇÃO DOS MÉTODOS DE VULNERABILIDADE INTRÍNSECA NO SISTEMA AQUÍFERO DA PORÇÃO OESTE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, BRASIL.

Resumo

O mapeamento de vulnerabilidade ao risco de contaminação é uma ferramenta fundamental para a gestão eficiente dos recursos hídricos subterrâneos. A vulnerabilidade intrínseca refere-se à avaliação da suscetibilidade dos aquíferos à contaminação, considerando as características geológicas e hidrogeológicas específicas da região. Este estudo pretende avaliar a vulnerabilidade intrínseca do Sinclinal Moeda, localizado na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero no Estado de Minas Gerais. Esta região destaca-se por abrigar importantes minas de ouro e minério de ferro, sendo alvo de estudos geológicos devido à sua complexidade estrutural e sua importância econômica. O Sinclinal Moeda é responsável por contribuir e alimentar nascentes e importantes afluentes nas bacias hidrográficas dos rios das Velhas e Paraopeba, contribuindo assim com boa parte da água consumida pela população da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). As principais ameaças para o uso sustentável da água no Sinclinal Moeda são a expansão urbana e os empreendimentos minerários. Assim, a partir do mapeamento de vulnerabilidade à contaminação é possível identificar as áreas que necessitam receber um tratamento prioritário. Para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos foram selecionados quatro métodos de acordo com os tipos de aquíferos, a saber: DRASTIC, SINTACS, GOD e EPIK. O método DRASTIC foi desenvolvido para ser utilizado em qualquer tipo de aquífero, o método SINTACS foi desenvolvido para aquífero fissurais, o método GOD para aquíferos porosos e o método EPIK para aquíferos cársticos. Além da aplicação dos métodos propostos foram realizadas modificações, afim de adequar o método para as características físicas da região, levando em consideração os parâmetros menos eficientes. No método SINTACS, foram elaboradas novas classificações para os parâmetros de infiltração e superfície topográfica. No EPIK, o parâmetro camada de proteção foi substituído pela profundidade do nível d'água. No GOD, ocorreram alterações nos parâmetros grau de confinamento e profundidade do nível d'água. Já no DRASTIC, novas classificações foram aplicadas aos parâmetros de profundidade do nível d'água, recarga e condutividade hidráulica. A partir dos resultados obtidos, constatou-se que os métodos mais adequados para avaliar a vulnerabilidade da área de estudo são aqueles específicos para cada tipo de aquífero, considerando que as adaptações propostas se mostraram mais eficientes do que os métodos

originais. Entretanto, observou-se que o método DRASTIC demonstra igualmente eficácia ao indicar que os principais aquíferos suscetíveis à contaminação são os das coberturas, Cauê e Gandarela.

Palavras-chave: contaminação; álgebra de mapas; água subterrânea; Sinclinal Moeda.

Abstract

The mapping of vulnerability to contamination risk is a fundamental tool for the efficient management of groundwater resources. Intrinsic vulnerability refers to the assessment of aquifers' susceptibility to contamination, considering the specific geological and hydrogeological characteristics of the region. This study aims to assess the intrinsic vulnerability of the Moeda Syncline, located in the western portion of the Quadrilátero Ferrífero in the state of Minas Gerais. This region stands out for hosting significant gold and iron ore mines, making it the target of geological studies due to its structural complexity and economic importance. The Moeda Syncline plays a crucial role in supplying water to springs and major tributaries within the Rio das Velhas and Paraopeba watersheds, contributing substantially to the water consumed by the population of the Belo Horizonte Metropolitan Region (RMBH). The main threats to the sustainable use of water in the Moeda Syncline are urban expansion and mining enterprises. Thus, through vulnerability mapping, it is possible to identify areas that require prioritized treatment. To assess aquifer vulnerability, four methods were selected based on aquifer types: DRASTIC, SINTACS, GOD, and EPIK. The DRASTIC method was developed to be applied to any type of aquifer, the SINTACS method was designed for fractured aquifers, the GOD method for porous aquifers, and the EPIK method for karst aquifers. In addition to applying these proposed methods, modifications were made to adapt them to the region's physical characteristics, considering less efficient parameters. In the SINTACS method, new classifications were developed for infiltration and topographic surface parameters. In the EPIK method, the protective layer parameter was replaced by water table depth. In the GOD method, changes were made to the confinement degree and water table depth parameters. In the DRASTIC method, new classifications were applied to the water table depth, recharge, and hydraulic conductivity parameters. The results indicated that the most suitable methods for assessing the vulnerability of the study area are those specific to each aquifer type, as the proposed adaptations proved more efficient than the original methods. However, it was observed that the DRASTIC method also demonstrated effectiveness in identifying the main aquifers susceptible to contamination, notably the coverings, Cauê, and Gandarela aquifers.

Keywords: contamination; map algebra; ground water; Moeda Syncline.

2.1 Introdução

A água subterrânea é um recurso precioso, limitado e vulnerável à intervenção humana no ambiente. Os principais problemas associados aos sistemas de água subterrânea são a contaminação e a exploração excessiva (superexploração). O primeiro passo para identificar áreas suscetíveis à contaminação é através do mapeamento de vulnerabilidade de águas subterrâneas.

O conceito de vulnerabilidade de acordo com Hirata & Suhogusoff (2004), implica na sua maior ou menor susceptibilidade de ser afetado por uma carga de contaminante. A vulnerabilidade de um sistema aquífero depende das suas propriedades físicas bem como de sua sensibilidade a impactos naturais e aqueles causados por seres humanos (Guiguer & Kohnke, 2002).

De acordo com Auge (2007), ao longo dos anos têm surgido inúmeras definições e métodos sobre a vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos. Neste sentido existem duas grandes vertentes: vulnerabilidade intrínseca, que considera a vulnerabilidade como uma propriedade referente ao meio e vulnerabilidade específica que considera, além do comportamento do meio aquífero, o contaminante.

A área de estudo em foco nesta pesquisa é o Sinclinal Moeda, localizado na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero (QF), uma das maiores províncias minerais do Brasil, internacionalmente reconhecida por seus importantes terrenos pré-cambrianos com significativos recursos minerais, especialmente ouro e ferro (Azevedo *et al.*, 2012). O Sinclinal Moeda destaca-se por sua importância econômica, por ser um destacado vetor de expansão urbana e pelo potencial hidrogeológico, assinalado pela existência de inúmeras nascentes e importantes áreas de recarga de mananciais de abastecimentos, que contribuem com boa parte da água consumida pela população da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) (Formoso, 2014).

Neste contexto, destaca-se o Aquífero Cauê, caracterizado por suas formações ferríferas e considerado um dos melhores aquíferos da região, que desempenha um papel crucial tanto no abastecimento da população quanto no manejo dos empreendimentos minerários (Mourão, 2007; Dantas *et al.*, 2017).

De acordo com o último censo do IBGE de 2022 a RMBH apresenta uma população de aproximadamente 6 milhões de habitantes, distribuídas em de 34 municípios. No entanto, as alterações antrópicas, uso e ocupação do terreno e atividades minerárias, no Sinclinal Moeda produzirão efeitos que irão comprometer inevitavelmente a produção de água, com graves

consequências para a segurança hídrica da RMBH (CBH Rio das Velhas, 2016).

As principais ameaças à conservação dos recursos hídricos subterrâneos no Sinclinal Moeda são os empreendimentos minerários e a expansão urbana. A RMBH tem direcionado uma de suas vertentes de expansão para o Sinclinal Moeda, resultando em um aumento no número de condomínios fechados desde os anos 90. Simultaneamente, os empreendimentos minerários é a atividade econômica mais relevante em todo o Sinclinal (Oliveira, 2012; Formoso, 2014). Contudo, surgem conflitos de uso nos empreendimentos minerários que impactam significativamente a disponibilidade dos recursos hídricos. A operação de rebaixamento da área de lavra, por meio do bombeamento constante, causa a redução ou até mesmo a eliminação do fluxo de água em córregos e nascentes, podendo também afetar a qualidade das águas devido ao carreamento de partículas para os corpos d'água aumentando a turbidez e assoreando o leito dos córregos (Paula *et al.*, 2018).

A gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos representa um desafio significativo para os órgãos governamentais e para a comunidade científica. Diante da potencialidade de recursos hídricos existentes na região de estudo, este trabalho busca identificar as áreas mais susceptíveis a vulnerabilidade intrínseca do sistema aquífero do Sinclinal Moeda, visando garantir a segurança dos mananciais subterrâneos. O Sinclinal Moeda desempenha um papel crucial no abastecimento de água para a RMBH devido ao seu elevado potencial hídrico. No entanto, as alterações antrópicas podem comprometer inevitavelmente a produção de água, com graves consequências para a segurança hídrica da RMBH.

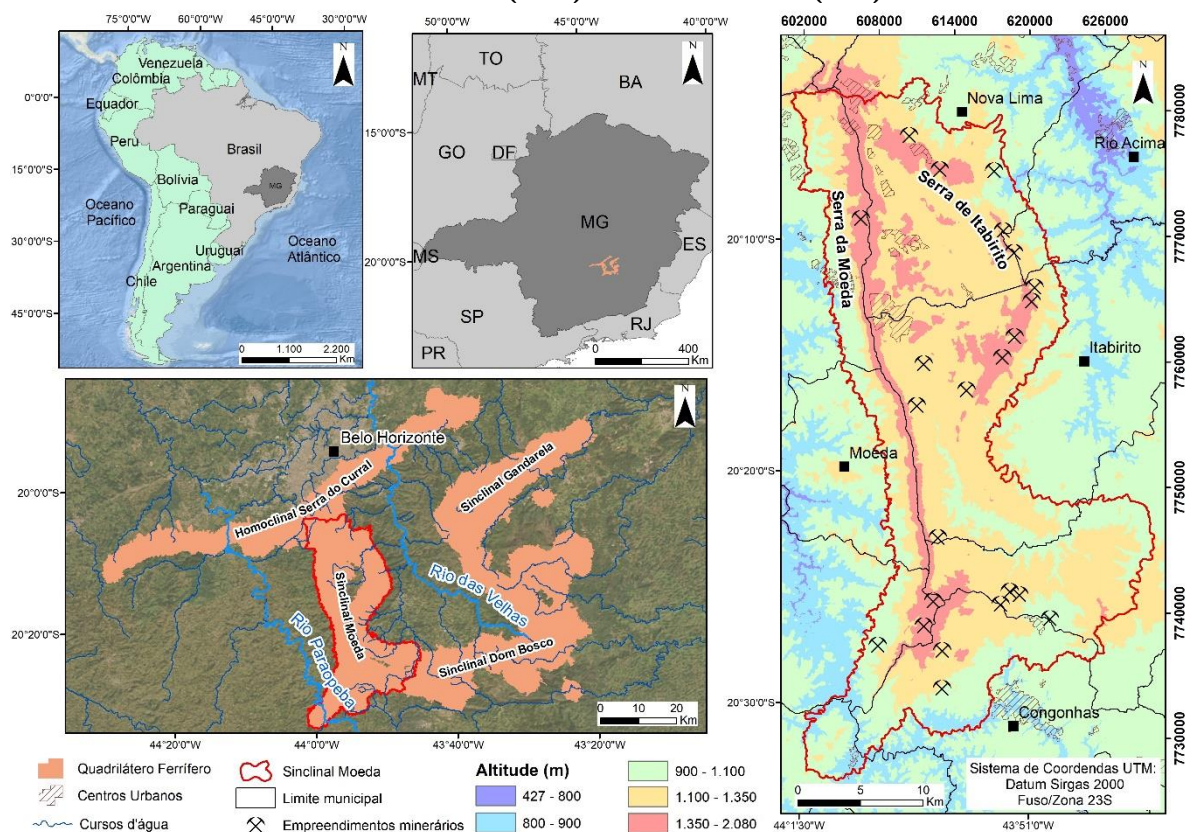
O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar a vulnerabilidade intrínseca ao risco de contaminação do Sistema Aquífero do Sinclinal Moeda, com o intuito de comparar como os métodos que determinam a vulnerabilidade se comportam com os diferentes tipos de unidades aquíferas da região de interesse. Propõe-se também a identificar as potenciais limitações dos métodos utilizados e realizar as adaptações necessárias para que se adequem às características físicas da área de estudo.

2.2 Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo encontra-se situada no contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero, na porção centro-sul do estado de Minas Gerais, Brasil. O Sinclinal Moeda, corresponde ao limite oeste do QF e está localizada na porção sul da Região metropolitana de Belo Horizonte. Parte dos municípios que integram o Sinclinal Moeda incluem Belo Horizonte, Belo Vale, Brumadinho, Congonhas, Ibirité, Itabirito, Moeda, Nova Lima, Ouro Preto e Rio Acima (Figura 1). No interior do Sinclinal Moeda encontram-se diversos empreendimentos minerários,

destaca-se que a área não apresenta alta densidade urbana, com exceção da presença de condomínios residenciais localizadas na porção setentrional da região, mas é reconhecidamente um importante vetor de expansão urbana, denominado de Vetor Sul da RMBH.

Figura 1 - Mapa de localização do Sinclinal Moeda, situado na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero. Destaque para as altitudes elevadas nos flancos com coloração avermelhada, onde estão localizados a Serra da Moeda (oeste) e Serra de Itabirito (leste).



A pedologia da área de estudo foi descrita com base no mapeamento de solos realizado por Shinzato & Filho (2005), na região da APA Sul RMBH. No Sinclinal Moeda são encontrados quatro tipos de solo: Argissolos, Cambissolos, Latossolos e Neossolos. Destacam-se também alguns tipos de terrenos classificados como afloramentos rochoso, exposição de canga e áreas degradadas.

Os Cambissolos e Neossolos apresentam textura média ou argilosa, baixa fertilidade natural e profundidade efetiva, e encontram-se sob campos cerrados altimontanos e são solos bastante intemperizados (Costa, 2003). Os Cambissolos apresentam baixo grau de desenvolvimento com forte influência dos materiais de origem, já os Neossolos são poucos espessos, com menos de 20 cm e não apresentam nenhum tipo de horizonte B (Santos *et al.*, 2018).

Os Argissolos compreendem solos minerais, não hidromórficos, que apresentam horizonte B textural, com baixa atividade da fração argila, subjacente a horizonte A ou E. São

solos em geral profundos e bem drenados, com sequência de horizontes A, Bt, C ou A, E, Bt, C. Apresentam ocorrência bastante restrita e distribuem-se em condições ambientais bastante diversas (Santos *et al.*, 2018).

Os Latossolos apresentam alto grau de intemperização e são muito evoluídos, condição resultante de enérgicas transformações no material constitutivo. São normalmente muito profundos, com espessura do solo, em geral, superior a dois metros, de elevada permeabilidade e, comumente, bem acentuadamente drenados (Shinzato & Filho, 2005). Em geral, relacionados às rampas coluvionares, apresentam estrutura granular e cores em geral avermelhadas (Filho, 2008).

O nome “Quadrilátero Ferrífero deve-se ao arranjo definido por um conjunto de serras lineares com altitude, em média, variando entre 1.100 e 1.600 metros (Chemale Jr, Rosière & Endo, 1991; Noce, 1995).

A análise dos aspectos morfológicos do Sinclinal Moeda insere-se no contexto morfoestrutural dos Crátons Neoproterozoicos, representados pelo Cráton do São Francisco. A região geomorfológica é representada pelo Quadrilátero Ferrífero, caracterizada por cristas altas e irregulares, cadeias de montanhas alongadas em hogback, platôs elevados, canyons profundos e suaves vales abertos (Dorr, 1969).

O modelado regional é controlado pela estrutura geológica e por processos erosivos diferenciais. São definidos três domínios distintos: terras altas compostas principalmente por quartzitos e itabiritos; substrato de altitude mediana, que engloba xistos e filitos; e terras baixas que são moldadas por granito-gnaisses (Harder & Chamberlin, 1915). A geomorfologia do Quadrilátero Ferrífero está relacionada ao controle estrutural, à inclinação das vertentes e, principalmente, às variações nas litologias presentes na região. A resistência diferenciada das litologias ao intemperismo e erosão exercem um papel fundamental na evolução da paisagem (Varajão, 1991).

O relevo do Quadrilátero Ferrífero pode ser classificado em dois tipos. O primeiro é associado a elevadas altitudes e relacionados a processos estruturais de elaboração do relevo, tais como as falhas normais e de empurrão e fatores litológicos (canga, itabiritos e quartzitos). O segundo tipo é evidenciado por relevos de dissecação homogênea, situado na parte central e no entorno do Quadrilátero Ferrífero, abrangendo colinas um pouco alongadas e de topos convexos e tabulares dos complexos metamórficos granítico-gnáissicos (Radambrasil, 1983).

No que se refere às cavidades naturais presentes no Sinclinal Moeda, essas se desenvolvem principalmente nas formações ferríferas bandadas da Formação Cauê e nas cangas. No entanto, tais cavidades podem ser encontradas também nos quartzitos da Formação

Moeda e nos dolomitos da Formação Gandarela. As cavidades estão dispostas principalmente em encostas formadas por itabiritos com cobertura de canga, e de modo secundário, se desenvolvem diretamente sobre os itabiritos (Hilário, 2018).

2.3 Caracterização Geológica e Hidrogeológica

Geologicamente, a área de estudo está situada no contexto do Quadrilátero Ferrífero (QF), localizado no extremo sudeste do Cráton São Francisco e abrangendo uma área de aproximadamente 7.000 km².

De acordo com Endo *et al.* (2020) o QF é constituído por unidades litodêmicas e litoestratigráficas correspondentes aos períodos do Arqueano, Paleo-Mesoproterozoico e Cenozoico, a saber (Figura 2): Complexos Metamórficos, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas, Supergrupo Estrada Real e Unidades Sedimentares. Ainda, com relação a geologia do QF, também são observadas as suítes intrusivas máficas/ultramáficas Paraopeba, Santa Cruz, Santa Rita de Ouro Preto, Catas Altas da Noruega, Córrego dos Boiadeiros e Pedro Lessa (ENDO *et al.*, 2020).

Os complexos metamórficos que compõem o QF são caracterizados por terrenos granito-gnáissicos (TGG's) (Chemale Jr, Rosière & Endo, 1992). São constituídos por ortognaisses bandados, contendo localmente corpos de anfibolitos, ortognaisses finamente laminados, migmatitos, corpos intrusivos de granitoides leucocráticos, e diques máficos de diferentes gerações (ENDO *et al.*, 2020).

Conforme resumido por Júnior *et al.* (2015), Roncato *et al.* (2020) e Roncato *et al.* (2023), a subdivisão estratigráfica do cinturão do Rio das Velhas baseada em associações litológicas de Zucchetti & Baltazar (2000) e Baltazar Zucchetti (2007), da base ao topo: (i) vulcânicas máfica-ultramáficas; (ii) vulcânicas químico-sedimentar; (iii) sedimentar clasto-químicas; (iv) vulcaniclástica; (v) ressedimentada, amplamente distribuída no QF, compreendendo principalmente grauvas, quartzo-grauvas e siltitos, com indicação de que foi depositado por correntes de turbidez de alta e baixa densidade; (vi) e (vii) associações costeiras e não costeiras. A área de estudo é constituída por rochas dos grupos Quebra Osso e Nova Lima. O Grupo Quebra Osso é constituído principalmente por rochas máficas e ultramáficas (Gaidukas, 2016). Já o Grupo Nova Lima é constituído por xistos, xistos cloríticos e filitos (Endo *et al.*, 2020).

O Supergrupo Minas é composto, da base para o topo, pelos grupos Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba (Endo *et al.*, 2020) (Figura 2). O Grupo Tamanduá é dividido em duas unidades: a Formação Cambotas (basal) e a Formação Morro Grande (topo) (Dorr, 1969). O

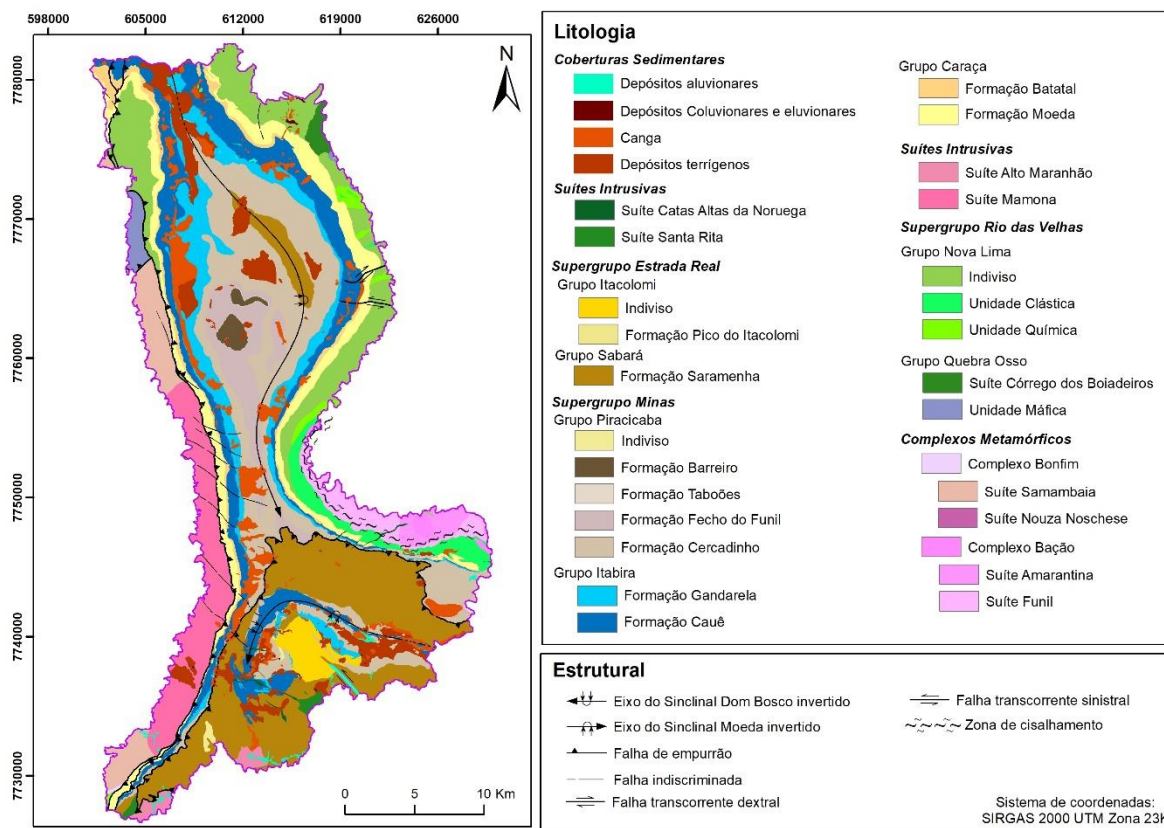
Grupo Caraça é constituído da Formação Moeda (inferior) composta por quartzitos, quartzitos sericíticos, filitos e metaconglomerados e a Formação Batatal (superior) é composta de filitos e, subordinadamente, por formações ferríferas bandadas, metacherts, filitos grafitosos e mármore dolomíticos (Dorr, 1969). O Grupo Itabira é dividido em duas unidades, as formações, Cauê na base e Gandarela no topo. A Formação Cauê consiste em itabiritos, itabiritos dolomíticos, itabiritos anfíbolíticos e, subordinadamente, de filitos, quartzitos e mármore (Endo *et al.*, 2020). A Formação Gandarela possui predominantemente dolomitos, mas também ocorrem calcários dolomíticos, calcários, pelitos, formação ferrífera e conglomerados contendo fragmentos de cherts, carbonatos e formação ferrífera (Alkmim & Noce, 2006). O Grupo Piracicaba consiste em quatro formações, apresentadas em ordens cronológicas: Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. A Formação Cercadinho é constituída de quartzitos ferruginosos, filitos prateados e, subordinadamente, por dolomitos, xistos sericíticos e metaconglomerados. A Formação Fecho do Funil é composta por filitos, filitos dolomíticos, metassiltitos, dolomitos quartzosos e argilosos. Completam o grupo os ortoquartzitos da Formação Taboões e os filitos grafitosos, filitos e xistos da Formação Barreiro (Endo *et al.*, 2020).

O Supergrupo Estrada Real (Endo *et al.*, 2020) é composto pelos grupos Sabará e Itacolomi. O Grupo Sabará é composto, da base para o topo, pelas formações Saramenha, Córrego do Germano e Catarina Mendes. A Formação Saramenha é constituída, principalmente, por clorita xistos, mica xistos com intercalações de metagrauvacas, quartzitos e formações ferríferas bandada. A formação Córrego do Germano é constituída essencialmente de formação ferrífera lenticular com laminação mal definida, interpretada como metachert ferruginoso. A Formação Catarina Mendes é constituída por biotita-quartzo xistos, quartzitos e filitos (Endo *et al.*, 2020). O Grupo Itacolomi compõe-se das formações Florália (inferior) e Pico do Itacolomi (superior).

Os principais depósitos sedimentares de idade cenozoica do Quadrilátero Ferrífero (QF) são os depósitos terrígenos, semelhantes a Formação Cata Preta. Esta formação é constituída de arenitos maciços de coloração avermelhada, pelitos, conglomerados e diamictitos com matriz argilosa avermelhada. As cangas são depósitos de coberturas detrítico-lateríticas com concentrações de hidróxido de ferro. A componente detrítica é derivada em grande parte da Formação Cauê, e o ferro proveniente do cimento limonítico que foi dissolvido a partir do intemperismo dessa mesma formação. Os depósitos coluvionares e eluvionares ocorrem especialmente nas regiões elevadas suportadas pela presença de formações ferríferas e quartzitos. São constituídos de depósitos de talús com matriz areno-argilosa e solos com

fragmentos de rochas. Os depósitos aluviais contêm areias, argilas e cascalhos tanto no leito ativo dos rios, quando em terraços antigos (Endo *et al.*, 2020) (Figura 2).

Figura 2 - Mapa de geologia da área de estudo, apresentando as unidades e estruturas presentes.



Fonte: Elaborada pela autora baseado em Endo *et al.* (2019).

No contexto hidrogeológico deste estudo, adotou-se os conceitos estabelecidos por Miller (2000) que diferencia Unidades Aquíferas e Unidades Não Aquíferas, no qual são consideradas como aquíferos as unidades geológicas que produzem quantidades significativas de água por meio de poços ou nascentes. Dessa maneira, o sistema aquífero da área de estudo foi subdividido em seis unidades aquíferas e quatro unidades não aquíferas. Das unidades não aquíferas citam-se Aquitardo complexos TTG, Aquitardo Rio das Velhas, Aquitardo Batatal e Aquitardo suítes intrusivas. As unidades aquíferas compreendem o Aquífero Moeda, o Aquífero Cauê, o Aquífero Gandarela, o Aquífero Piracicaba, o Aquífero Estrada Real e os Aquíferos depósitos sedimentares.

O Aquitardo complexos TTG é composto pelos complexos Bonfim e Bação. Esses aquíferos apresentam recarga de 290,3 mm/ano e condutividade hidráulica de $2,64 \times 10^{-6}$ m/s (Freitas & Bacellar, 2013). São fissurais que tem como peculiaridade o espesso manto de intemperismo, que contribui para a recarga das fraturas na rocha sã e também é responsável por uma parte significativa das restituições para os cursos d'água (Mourão, 2007). São

descontínuos, anisotrópicos, heterogêneos e fraturados (Beato, Monsore & Bertachini, 2006).

O Aquitardo Supergrupo Rio das Velhas, constituído pelos Grupo Quebra Osso e Grupo Nova Lima, apresenta recarga em torno de 412,9 mm/ano e condutividade hidráulica de $1,63 \times 10^{-6}$ m/s (Freitas & Bacellar, 2013). São fissurais, descontínuos, fortemente anisotrópicos heterogêneos (Beato, Monsore & Bertachini, 2006).

A Unidade aquífera Moeda é formada por quartzitos da Formação Moeda. Esses aquíferos são fissurais, variam de livres a confinados e apresentam porosidade secundária, condicionada pelas fraturas nas rochas. A recarga dessa unidade é em torno de 323,48 mm/ano e a condutividade hidráulica varia de $1,93 \times 10^{-6}$ a $4,73 \times 10^{-6}$ m/s (Magalhães *et al.*, 2022).

O Aquitardo Batatal compreende as rochas da Formação Batatal, com predominância de filitos. Essas rochas não têm capacidade de transmitir água, apenas de armazená-la, desempenhando um papel importante ao confinar outras unidades produtoras de água e são considerados aquitardos fissurais (Beato, Monsore & Bertachini, 2006). As taxas de recarga para essa unidade, de acordo com Magalhães *et al.* (2022), são de aproximadamente 64,70 mm/ano, com a condutividade hidráulica variando de $5,2 \times 10^{-8}$ a $7,73 \times 10^{-8}$ m/s.

A Unidade aquífera Cauê corresponde ao principal aquífero do Sinclinal Moeda, apresentando porosidade granular e fissural. Devido à diversidade litológica, complexidade estrutural e diferentes intensidades no intemperismo, exibe uma elevada heterogeneidade e anisotropia (Mourão, 2007). As taxas de recarga para essa unidade estão em torno de 452,87 e 485,22 mm/ano e condutividade hidráulica variando de $1,5 \times 10^{-5}$ a $8,33 \times 10^{-6}$ m/s (Magalhães *et al.*, 2022). Nos ensaios realizados por Mesquita *et al.* (2017), os valores de transmissividade variaram desde 0,5 até 159,8 m²/dia, com média de 68,7 m²/dia.

A Unidade aquífera Gandarela é representada pelas rochas dolomíticas da formação homônima. São aquíferos cársticos, que variam de livres a confinados, e possuem porosidade e permeabilidade secundária, condicionadas pelas fraturas nas rochas e condutos de dissolução dos carbonatos. Apresentam taxas de recarga que oscilam entre 258,79 a 323,48 mm/ano e a condutividade hidráulica variável de $1,2 \times 10^{-6}$ a $7,67 \times 10^{-6}$ m/s (Magalhães *et al.*, 2022).

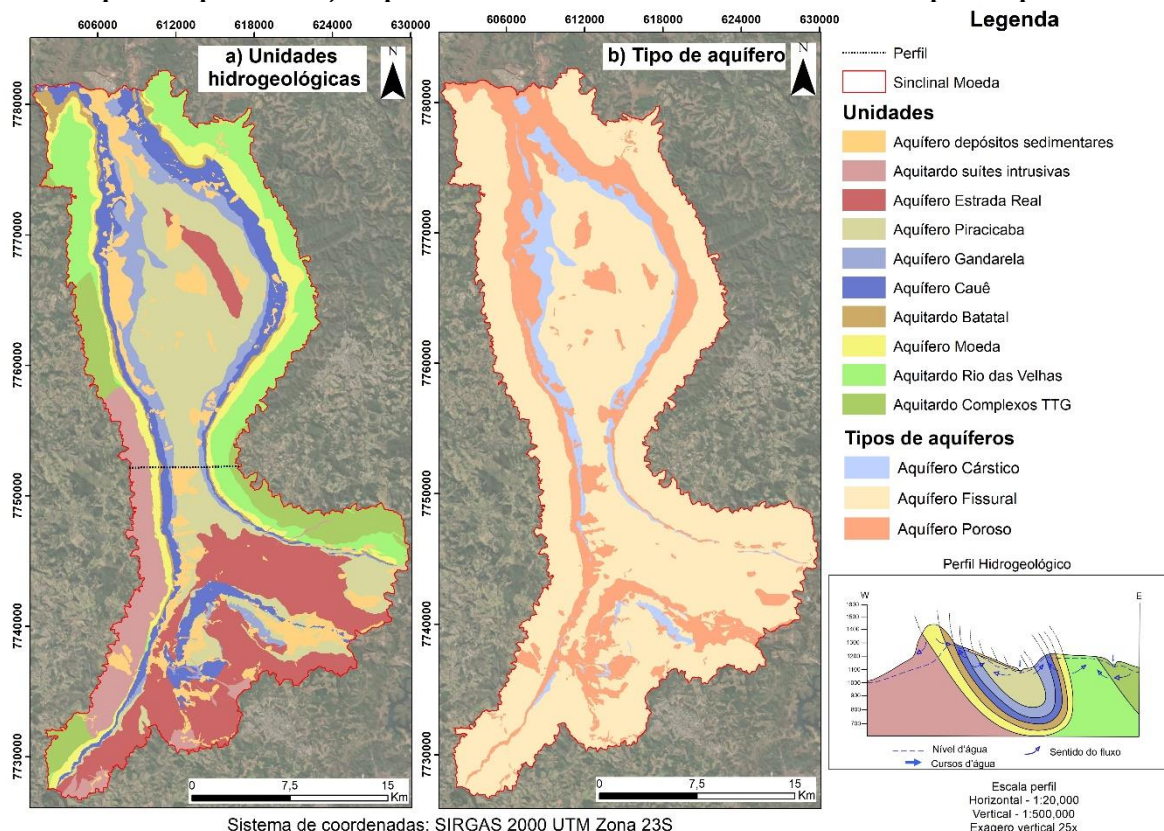
A Unidade aquífera Piracicaba é formada pelas rochas da unidade indivisa do Grupo Piracicaba e pelas formações Barreiro, Taboões, Fecho do Funil e Cercadinho. Essa unidade é caracterizada por conter aquíferos fissurais, que variam de livres a confinados, apresentam taxa de recarga de 204,88 mm/ano (Andrade, 2022) e uma condutividade hidráulica variando de $5,05 \times 10^{-6}$ a $5,05 \times 10^{-9}$ m/s (CBH Rio das Velhas, 2013).

A Unidade aquífera Estrada Real é constituída pelas rochas dos Grupos Itacolomi e Sabará. Apresenta recarga variando de 236,4 a 220,64 mm/ano (Andrade, 2022) e uma

condutividade hidráulica de $5,05 \times 10^{-6}$ m/s (CBH Rio das Velhas, 2013). Tratam-se de aquíferos fissurais, condicionados pelas fraturas nas rochas, podem variar de livres a confinados. O Aquitardo suítes intrusivas engloba as rochas das Suíte Catas Altas da Noruega, Suíte Santa Rita, Suíte Alto Maranhão, Suíte Mamona, Suíte Córrego dos Boiadeiros, Suíte Samabaia, Suíte Souza Noschese, Suíte Amarantina e Suíte Funil. Formam aquíferos fissurais, caracterizados por uma porosidade e permeabilidade secundária, condicionada pelas fraturas nas rochas.

A Unidade aquífera depósitos sedimentares estão relacionados às formações superficiais cenozóicas, composta por depósitos aluvionares, coluvionares, eluvionares, cangas e depósitos terrígenos. Esses aquíferos em geral, constituem aquíferos livres, descontínuos, heterogêneos e anisotrópicos, com porosidade e permeabilidade primárias. Possuem boa capacidade de armazenamento possibilitando a manutenção de escoamento de base durante o período de estiagem (Mourão, 2007). Essa unidade apresenta comumente elevadas porosidades, com uma condutividade hidráulica média em torno de $2,52 \times 10^{-4}$ m/s (CBH Rio das Velhas, 2013), desempenhando um papel fundamental na recarga dos aquíferos subjacentes, contribuindo com aproximadamente 485,22 mm/ano (Magalhães *et al.*, 2022).

Figura 3 – a) Mapa de hidrogeologia da área de estudo apresentando as seis unidades aquíferas e os quatro aquíferos. b) Mapa diferenciando as unidades de acordo com o tipo de aquífero.



2.4 Materiais e Métodos

2.4.1 Banco de Dados

Para a interpretação dos quatro métodos utilizados neste estudo, SINTACS, EPIK, GOD e DRASTIC foi desenvolvido um banco de dados no formato raster para cada um dos parâmetros empregados. A construção do banco de dados foi possível com o levantamento de dados do Sistema de Informações de Água subterrânea (SIAGAS), do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), do Sistema Integrado de Informações Ambientais (SIAM), do IDE Sisema (Infraestrutura de Dados Espaciais da SEMAD/DEAM/IEF/IGAM), do CECAV (Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas), e dos estudos de Magalhães *et al.* (2022), Freitas & Bacellar (2010), Andrade (2022), CBH rio das velhas (2013), Endo *et al.* (2019), Shinzato & Filho (2005) e ALOS (2016) (Tabela 1).

Tabela 1 – Fonte de dados dos parâmetros utilizados nos métodos de vulnerabilidade empregados nesta pesquisa.

Parâmetros	Métodos	Metodologia ou Técnica Aplicada	Fonte de dados
Profundidade do Nível d'água	DRASTIC, SINTACS e GOD	Bibliografia	IGAM, SIAM, SIAGAS e IDE Sisema
Recarga	DRASTIC e SINTACS	Bibliografia	Freitas & Bacellar (2010), CBH rio das Velhas (2013), Andrade (2022) e Magalhães <i>et al.</i> (2022)
Condutividade Hidráulica	DRASTIC e SINTACS	Bibliografia	Freitas & Bacellar (2010), CBH rio das Velhas (2013) e Magalhães <i>et al.</i> (2022)
Solo	DRASTIC SINTACS e EPIK	Mapa pedológico	Shinzato & Filho (2005)
Camada de Proteção	EPIK	Mapa pedológico	Shinzato & Filho (2005)
Meio Aquífero	DRASTIC e SINTACS	Mapa geológico	Endo <i>et al.</i> (2019)
Desenvolvimento da Rede Cárstica	EPIK	Mapa geológico	Endo <i>et al.</i> (2019)
Litologia da Zona Vadosa	DRASTIC, SINTACS e GOD	Mapa potenciométrico e geológico	Endo <i>et al.</i> (2019)
Grau de Confinamento	GOD	Mapa potenciométrico e geológico	Endo <i>et al.</i> (2019)
Epicarste	EPIK	Mapa geológico e shapefile de cavidades	Endo <i>et al.</i> (2019) e CEVAC
Topografia	DRASTIC e SINTACS	Modelo Digital de Elevação	ALOS (2016)
Condição de Infiltração	EPIK	Modelo Digital de Elevação e shapefile de cavidades	ALOS (2016) e IDE Sisema

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

No que se refere à profundidade do nível da água, foram compilados dados existentes de poços tubulares, piezômetros e INAs (Indicadores de Nível d'água) do banco de dados do SIAGAS, IGAM e SIAM totalizando 153 instrumentos. As informações coletadas foram selecionadas para os meses de baixa precipitação, de maio até agosto, dos anos de 2011 até 2020. Nas áreas onde não havia informações suficientes, pontos de nascentes foram selecionados para caracterização, com base em *shapefiles* de cursos d'água obtidos por meio do site IDE Sisema, totalizando 37 amostras.

A obtenção dos parâmetros Recarga e Condutividade Hidráulica baseou-se em consultas às fontes bibliográficas disponíveis sobre a área de estudo, tais como os estudos de Freitas & Bacellar (2010), CBH rio das Velhas (2013), Andrade (2022) e Magalhães *et al.* (2022).

A interpretação do parâmetro Solo e Camada de proteção foi em grande parte embasada em interpretações realizadas a partir do mapa pedológico da APA Sul RMBH, de autoria de Shinzato & Filho (2005), além dos trabalhos de EMBRAPA (2007), Filho (2008) e Coelho *et al.* (2017).

O parâmetro Meio Aquífero e Desenvolvimento do sistema cárstico foi classificado com base em dados secundários, subsidiados por trabalhos de mapeamentos geológicos realizados pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), durante a elaboração do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero (QF), conforme apresentado por Endo *et al.* (2019).

Para a obtenção dos parâmetros de litologia da zona vadosa e grau de confinamento, foram elaborados 30 perfis geológicos na área de estudo com base no mapa geológico do QF (Endo *et al.*, 2019). Utilizando os dados de profundidade do nível da água proveniente de poços, piezômetros, INAs e nascentes, foi gerado um mapa potenciométrico para determinar o nível da água subterrânea. Os perfis integrados geologia e nível d'água permitiram a classificação da litologia da zona vadosa e o grau de confinamento com base na análise do tipo de rocha ou cobertura sedimentar e suas características.

A técnica de interpolação, utilizando a ferramenta “*Topo to Raster*” disponível no ArcGIS 10.8.2 possibilitou a extrapolação de valores para áreas com informações dispersas, gerando assim os mapas de profundidade do nível d'água, litologia da zona vadosa e grau de confinamento. Esta interpolação permite a criação de modelos digitais de elevação (DEM) hidrologicamente corrigidos, impõe restrições ao processo de interpolação resultando em uma estrutura de drenagem conectada, possibilitando também a representação de cristas e vales. Esta condição de drenagem imposta produz superfícies com maior precisão e exigindo menor quantidade de dados de entrada (Esri, 2024).

O parâmetro Epicarste foi desenvolvido com base no mapa geológico do QF e nos dados

de cavidades obtidos através da plataforma IDE Sisema, com informações do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), totalizando 352 cavidades.

O parâmetro topografia foi gerado a partir de um modelo digital de elevação (MDE) construído através da imagem do sensor Alos Palsar (2016), com resolução espacial de 12,5 metros. Posteriormente, a ferramenta *Slope*, disponível no ArcGIS 10.8.2 foi utilizada para gerar o mapa de declividade que por sua vez foi reclassificado em classes representando os intervalos determinados pelos métodos.

Para a confecção do mapa de Condição de infiltração foi gerado, por geoprocessamento, o mapa de declividade, a partir de imagens Alos Palsar (2016), com resolução de 12,5 metros. Os dados de cavidades, foram obtidos por meio da plataforma IDE Sisema, compilado de informações disponíveis no Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV).

O mapeamento da vulnerabilidade do aquífero pelos métodos SINTACS, GOD, EPIK e DRASTIC foram realizados através do cruzamento dos mapas gerados em cada parâmetro, avaliados por meio de técnicas de álgebra de mapas no ArcGIS 10.8.2, por meio da ferramenta denominada *Raster Calculator*.

A seguir serão descritos como cada parâmetro foi alterado para a adaptação dos quatro métodos utilizados nessa pesquisa. Para os parâmetros numéricos, como recarga, condutividade hidráulica, profundidade do nível d'água, foi realizada uma nova categorização com base na média aritmética. Quanto ao parâmetro topografia, a classificação seguiu os critérios estabelecidos pelo IBGE (2009) no manual técnico de geomorfologia. Adicionalmente, para o parâmetro grau de confinamento, foi implementada a inclusão de um *buffer*.

Para a padronização da escala utilizada nos métodos, procedeu-se ao cálculo da proporção de área, de acordo com sua classificação. As operações foram conduzidas com o auxílio do software ArcGIS 10.8.2, empregando as seguintes ferramentas: “*Reclassify*” para reclassificar dos valores obtidos no índice final, “*Raster to polygon*” para converter o *raster* final em polígonos (*shapefiles*), “*Dissolve*” para unir os polígonos de mesmo valor, e por último, a ferramenta “*Calculate Geometry*” foi utilizada para calcular a área de cada classificação em metros quadrados. Após o cálculo das áreas, a porcentagem foi calculada utilizando o software Excel. Para normalizar as escalas foram utilizando o método de análise de cluster, ou agrupamento de dados de vizinhos próximos. Análise de cluster busca agrupar elementos de dados baseando-se na similaridade entre eles (Doni, 2004).

2.4.2 Métodos de Vulnerabilidade

Existem vários métodos para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos. Com o intuito de entender a vulnerabilidade e quantificar os métodos disponíveis, foram realizadas consultas às referências bibliográficas. Nesse processo, foram identificados sessenta métodos de vulnerabilidade, dos quais trinta são de vulnerabilidade intrínseca e vinte e um são de vulnerabilidade específica. Notou-se que nove métodos não foram especificamente classificados quanto ao tipo de vulnerabilidade. Dentre esses, optou-se por selecionar os métodos de vulnerabilidade intrínseca, uma vez que não houve distinção entre os tipos de contaminantes presentes na área de interesse.

Dos trinta métodos de vulnerabilidade intrínseca, identificaram-se vinte e um que podem ser utilizados para diferenciar a permeabilidade do aquífero. Dentre esses, constatou-se a existência de oito métodos distintos para a avaliação de aquíferos cársticos, três métodos para os aquíferos fissurais, quatro métodos específicos de aquíferos porosos, um método para aquíferos fissurais e cársticos e cinco métodos para todos os tipos de aquíferos (Tabela 2).

Tabela 2 – Principais métodos de vulnerabilidade intrínseca, apresentando suas aplicações, além dos parâmetros dos métodos utilizados nesta pesquisa.

Métodos de vulnerabilidade intrínseca		
Geral	DRASTIC (Aller <i>et al.</i> , 1987); EPPNA (Plano Nacional da Água, 1998; Artuso <i>et al.</i> , 2004); MAIA (Maia, 2011); RIVA (Vrouhakis <i>et al.</i> , 2022); GLA (Holting <i>et al.</i> , 1995)	
Poroso	AVI (Van Stempvoort <i>et al.</i> , 1993); GATNEK (Morais, 2016); GOD (Foster & Hirata, 1988); EKV (Auge, 1995)	
Fissural	VULTRAC (Fernandes, 2003); DISCO (Pochon <i>et al.</i> , 2003); Vulnerability assessment method (Lubianetzky <i>et al.</i> , 2015); SINTACS (Civita <i>et al.</i> , 1990);	
Cárstico	SINTACS (Civita <i>et al.</i> , 1990); REKS (Malik & Svasta, 1999); PaPRIKa (Kavouri <i>et al.</i> , 2011); Slovene Approach (Ravbar, 2007; Ravbar & Goldscheider, 2007); COP (Vías <i>et al.</i> , 2006); EPIK (Doerfliger & Zwalhen, 1997); PI (Goldscheider <i>et al.</i> , 2000); KAVA (Biondic <i>et al.</i> , 2021); Irish Method (Daly & Drew,1999).	
Métodos selecionados		
Métodos	Parâmetros	Aplicação
DRASTIC	Profundidade do nível d’água (D); Recarga (R); Meio Aquífero (A); Solo (S); Topografia (T); Impacto da zona vadosa (I); Condutividade hidráulica (C)	Geral
GOD	Grau de confinamento (G); Ocorrência do estrato de cobertura (O); Distância até o lençol freático (D)	Aquíferos porosos
SINTACS	Profundidade do Aquífero (S); Infiltração (I); Zona não saturada (N); Tipo de Cobertura (T); Aquífero (A); Condutividade Hidráulica (C); Superfície Topográfica (S)	Aquíferos fissurais
EPIK	Epicarste (E); Cobertura de Proteção (P); Condição de Infiltração (I); Desenvolvimento da rede cárstica (K)	Aquíferos Cársticos

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A escolha do método mais adequado depende de alguns fatores entre os quais se destacam: a divulgação da metodologia e as informações disponíveis. Desta forma, fazem-se

necessárias a seleção e aplicação dos métodos compatíveis com a área de estudo. De acordo com a disponibilidade de dados no Sinclinal Moeda e o alcance das metodologias no Brasil, foram selecionados quatro métodos: Três de acordo com o tipo de porosidade do aquífero (fissural, poroso e cárstico) e um adotado para qualquer tipo de sistema aquífero sendo respectivamente: GOD, SINTACS, EPIK e DRASTIC. A seguir, serão descritos os quatro métodos escolhidos para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos.

2.4.2.1 Método GOD

O método GOD foi desenvolvido por Foster & Hirata (1988) e é amplamente utilizado em aquíferos porosos (Maia, 2011). O índice de vulnerabilidade GOD leva em consideração três parâmetros, a saber (Tabela 3):

- G- Confinamento hidráulico de águas subterrânea no aquífero em questão;
- O - Estratos de cobertura (zona vadosa ou camada confinante), em termos da característica hidrogeológica e do grau de consolidação que determinam sua capacidade de atenuação do contaminante;
- D - Profundidade até o nível freático ou até o topo do aquífero confinado

O índice final é o produto dos três índices desses parâmetros, como representado na equação da Tabela 3.

Tabela 3 – Detalhamento dos parâmetros utilizados no método GOD.

PARÂMETROS	VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS				
Grau de confinamento (G)	Nenhum e fluxo ascendente jorrante $G = 0$	Confinado $G = 0,2$	Semiconfinado $G = 0,4$	Não confinado (coberto) $G = 0,6$	Não confinado $G = 1,0$
Ocorrência do estrato de cobertura (O)	Argila lacustrina, estuarina e solos residuais $O = 0,4$	Silte, loess, till glacial $O = 0,5$	Areia eólica $O = 0,6$	Areia aluvial e fluvioglacial $O = 0,7$	Cascalho de leques aluviais $O = 0,8$
	Lamito e xisto $O = 0,5$	Siltito e tufo vulcânico $O = 0,6$	Arenito $O = 0,7 - 0,8$	Calcário e calcarenito $O = 0,9$	
	Rochas magmáticas, metamórficas e vulcânicas $O = 0,6 - 0,7$		Lava vulcânica recente $O = 0,8$	Calcrete e calcário cárstico $O = 0,9 - 1,0$	
Distância até o lençol freático (D)	> 50 metros $D = 0,6$	20 – 50 metros $D = 0,7$	5 – 20 metros $D = 0,8$	< 5 metros $D = 0,9$	Todas as profundidades $D = 1,0$
EQUAÇÃO	Índice GOD = $G * O * D$				
Vulnerabilidade	Insignificante $0 - 0,1$	Baixa $0,1 - 0,3$	Média $0,3 - 0,5$	Alta $0,5 - 0,7$	Extrema $0,7 - 1,0$

Fonte: Elaborada pela autora baseado em Foster & Hirata (1988).

2.4.2.2 Método SINTACS

O método SINTACS desenvolvido para aquíferos fissurais e cársticos por Civita & De Maio (2000), baseia-se no modelo DRASTIC, utilizando também sete parâmetros para

obtenção do índice de vulnerabilidade. A sigla deriva dos nomes dos parâmetros que são levados em consideração (Maio *et al.*, 2011) (Tabela 4):

- Profundidade do Aquífero (S): definida como a profundidade da superfície piezométrica medida em relação ao nível do solo;
- Infiltração (I): calculado a partir da precipitação efetiva e das condições hidrogeológicas e superficiais que são incorporadas no índice de infiltração;
- Zona não saturada (N): Litologia da zona insaturada;
- Tipo de Cobertura (T): a tipologia dos solos;
- Aquífero (A): características hidrogeológicas do aquífero, os processos que ocorrem abaixo da superfície piezométrica;
- Condutividade Hidráulica (C): capacidade de deslocamento das águas subterrâneas no meio saturado;
- Superfície Topográfica (S): declividade da superfície topográfica.

O índice final de vulnerabilidade é definido pela somatória de cada parâmetro, ponderados por um peso (Maio *et al.*, 2011). A Tabela 4 apresenta os pesos utilizados na aplicação desse método para aquíferos fissurais.

Tabela 4 – Detalhamento dos parâmetros utilizados no método SINTACS, a fórmula já apresenta os pesos definidos para aquíferos fissurais.

PARÂMETROS	VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS								
Profundidade do aquífero (S)	0-10 m S=10-5	10-20m S=5-3,5	20-30m S=3,5-2,5	30-40m S=2,5-2	40-50m S=2	50-60m S=2-1,5	60-80m S=1,5	>80m S=1	
Infiltração (I) mm/ano	<50 I=1-2	50-100 I=2-4,5	100-150 I=4,6-6,5	150-250 I=5,5-9	250-300 I=9,5	300-350 I=9,5-8	350-400 I=8-6	400-450 I=6-5	450-550 I=5-5,5
Zona não saturada (N)	Aluvião Grosseiro N=6-9	Calcário Cárstico N=8-10	Calcário fraturado N=4-9	Dolomito fissurado N=2-5	Aluvião médio e fino N=3-6	Complexos arenosos N=4-7	Arenito e conglomerado N=5-8	Areia e cascalho N=4-9	Rocha plutônica N=3-5
	Sequência turbidítica N=2-6	Rocha vulcânica N=5-10	Margas/argilitos N=1-2	Moreia Grosseira N=4-6	Moreia fina e média N=2-4	Argila, silte e turfa N=1-2	Rocha piroclástica N=2-5	Rochas metamórficas N=2-6	
Tipo de cobertura (T)	Fino ou ausente e Cascalho T=10	Areia limpa T=9	Arenoso e turfa T=8	Argila arenosa T=7	Franco arenoso T=6	Franco argiloso T=5			
	Marga T=5-4	Silte marga T=4	Argila siltosa T=4-3	Marga argilosa T=3-2	Silte Argila, Solo húmifero e Argila T=2-1				
Aquífero (A)	Aluvião Grosseiro A=8-9	Calcário Cárstico A=9-10	Calcário fraturado A=6-9	Dolomito fissurado A=4-7	Aluvião médio e fino A=6-8	Complexos arenosos A=7-9	Arenito e conglomerado A=4-9	Rocha plutônica A=2-4	Sequência turbidítica A=5-8
	Rocha vulcânica A=8-10	Marga e argila A=1-3	Moreia Grosseira A=6-8	Moreia fina e média A=4-6	Argila, silte e turfa A=1-3	Rocha piroclástica A=4-8	Rochas metamórficas A=2-5		
Condutividade Hidráulica (C) m/s	$10^{-10} - 10^{-8}$ C=1	10-8 - 10-7 C=1,5-2	$10^{-7} - 10^{-6}$ C=2-3	10-6 - 10-5 C=3-5	$10^{-5} - 10^{-4}$ C=5-7	$10^{-4} - 10^{-3}$ C=7-9	$10^{-3} - 10^{-1}$ C=9-10		
Superfície Topográfica (S)	0 - 2 % S=10	3 - 4 % S=9 16 - 18 % S=4	5 - 6 % S=8	7 - 9 % S=7 19 - 21 % S=3	10 - 12 % S=6	13 - 15 % S=5 22 - 25 % S=2	13 - 15 % S=5 26 - 30 % S=1		
EQUAÇÃO	Índice SINTACS = 3*S + 3*I + 3*N + 4*T + 4*A + 5*C + 4*S								
Vulnerabilidade	Muito baixa 0 – 80	Baixa 80 – 105	Média 105 – 140	Moderadamente Alta 140 – 186	Alta 186 – 210	Muito Alta >210			

Fonte: Elaborada pela autora baseado em Civita & De Maio (2000).

2.4.2.3 Método EPIK

O EPIK é um método para determinar a vulnerabilidade em aquíferos cársticos, desenvolvido por Doerfliger, Jeannin & Zwahlen (1998). É um acrônimo para Epikarst (E), Capa Protetora (P), Condição de infiltração (I) e desenvolvimento da rede cárstica (K) (Tabela 5):

- Epikarst (E): Representa o grau de evolução do epikarste com o seu respectivo grau de permeabilidade na superfície e subsuperfície. Estas zonas são, indiretamente, caracterizadas por aspectos geomorfológicos que podem ser facilmente mapeados.
- Capa protetora (P): Inclui o solo e demais coberturas geológicas como depósitos quaternários e outras camadas não cársticas.
- Condição de Infiltração (I): está relacionado ao tipo de recarga para o aquífero cárstico. São diferenciadas quatro classes de infiltração: concentrada, difusa, classe intermediária onde o escoamento pode ser importante e o resto da bacia onde não identificadas as demais classes.
- Desenvolvimento da rede cárstica (K): Desenvolvimento da rede cárstica e seu grau de organização.

De acordo com Doerfliger, Jeannin & Zwahlen (1998) as classificações para cada classe de determinado atributo são multiplicadas pelo peso de cada parâmetro e então os produtos são somados para chegar a um valor. Quanto maior este valor, maior o grau de proteção, ou seja, menos vulnerável é a área.

Tabela 5– Detalhamento dos parâmetros utilizados no método EPIK.

PARÂMETROS	VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS			
Epicarste (E)	Alto desenvolvimento E1 = 1	Moderado desenvolvimento E2 = 3		Pequeno ou ausente E3 = 4
Cobertura de Proteção (P)	0 – 20 cm de solo P1 = 1	20 – 100 cm de solo P2 = 2	100 – 200 cm de solo P3 = 3	> 200 cm de solo P4 = 4
	0 – 20 cm de solo sobre camadas com espessura de menos de 1 metro P1 = 1	20 – 100 cm de solo sobre camadas com espessura de menos de 1 metro P2 = 2	< 100 cm de solo ou > 100 cm de solo e > 100 cm de camada com baixa permeabilidade P3 = 3	> 100 cm de solo e espessa camada de detrito com baixa condutividade hidráulica ou mais ou > 8 m de argila ou material argilosito P4 = 4
Condição de Infiltração (I)	Drenagens perenes ou temporárias I1 = 1	Áreas de captação de córregos em I1 com declividade superior a 10% para áreas cultivadas e 25% para prados e pastagens I2 = 2	Áreas de captação de água da ribeira I1 com declividade inferior a: 10% para áreas cultivadas e 25% para pastagens I3 = 3	O resto da área de captação I4 = 4
Rede Cárstica (K)	Sistema Cárstico bem desenvolvido K1 = 1	Sistema Cárstico mal desenvolvido K2 = 2	Aquífero fissural ou misto K3 = 3	
EQUAÇÃO	Índice EPIK = (3*Ei) + (1*Pi) + (3* li) + (2*ki)			
Vulnerabilidade	Muito Alta 0 – 19	Alta 19 – 25	Moderada >25	Baixa >25 com P4

Fonte: Elaborada pela autora baseado em Doerfliger, Jeannin & Zwahlen (1998).

2.4.2.4 Método DRASTIC

O DRASTIC foi desenvolvido por Aller *et al.* (1987) e é descrito como uma metodologia que permite definir o potencial de poluição de qualquer ambiente hidrogeológico a ser sistematicamente avaliado em qualquer lugar nos Estados Unidos. É baseado na atribuição de índices que variam de 1 a 10, de acordo com as características e o comportamento das variáveis consideradas nas iniciais que compõem o nome DRASTIC (Tabela 6):

- D – Profundidade da água: A profundidade da água é importante porque determina o quanto o contaminante deve se deslocar antes de atingir o aquífero.
- R – Recarga: A recarga representa a quantidade de água por unidade de área que penetra na superfície do solo e atinge o nível freático
- A – Meio Aquífero: O meio aquífero refere-se à rocha consolidada que serve como um aquífero
- S – Solo: O solo refere-se à porção mais alta da zona vadosa caracterizada por atividade biológica significativa
- T – Topografia (Declividade): A topografia refere-se à variabilidade de inclinação dos terrenos
- I – Impacto da Zona Vadosa: A zona vadosa é definida como aquela zona acima do nível freático que é insaturada ou descontinuamente saturada.
- C – Condutividade Hidráulica: A condutividade hidráulica refere-se à capacidade dos materiais do aquífero de transmitir água.

Para obtenção do índice DRASTIC os valores das variáveis são multiplicados pelos pesos e em seguida, são somados os sete resultados, cujos extremos são de 23 a 230.

Tabela 6– Detalhamento dos parâmetros utilizados no método DRASTIC.

PARÂMETRO	VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS							
Profundidade do nível d'água (D)	0 – 1,5 m D = 10	1,5 – 4,5 m D = 9	4,5 – 9,0 m D = 7	9,0 – 15,0 m D = 5	15,0 – 22,5 m D = 3	22,5 – 30,0 m D = 2	> 30,0 m D = 1	
Recarga (R) mm/ano	< 51 R = 1	51 – 102 R = 3	102 – 178 R = 6	178 – 254 R = 8	> 254 R = 9			
Meio Aquífero (A)	Folhelho A = 1 - 3	Ígneas e metamórficas A = 2 - 5	Ígneas e metamórficas intemperizadas A = 3 - 5	Till glacial A = 4 -6	Arenito, calcário e folhelho A = 5 - 9	Arenito maciço A = 4 - 9		
	Calcário maciço A = 4 - 9	Areia e cascalho A = 4 - 9	Basalto A = 2 - 10	Calcário Cárstico A = 9 - 10				
Solo (S)	Fino ou ausente S = 10	Cascalho S = 10	Arenoso S = 9	Turfoso S = 8	Argila agregada e/ou contraída S = 7			Marga arenosa S = 6
	Marga S = 5	Silte margoso S = 4	Argila Margosa S = 3	Argila desagregada e não expansível S = 1				
Topografia (T)	0 -1 % T =10	1 – 6 % T = 9		6 – 12 % T = 5	12 -18 % T = 3	> 18 % T = 1		
Impacto da Zona Vadosa (I)	Camada confinante I = 1	Silte e argila I = 2 - 6		Folhelho I = 2 - 5	Calcário I = 2 - 7	Arenito I = 4 - 8	Calcário, arenito, folhelho I = 4 - 8	
	Areia e cascalho com silte e argila I = 4 - 8	Ígnea e metamórficas I = 2 - 8		Areia e cascalho I = 6 - 9	Basalto I = 2 - 10	Calcário cárstico I = 8 - 10		
Condutividade Hidráulica (C) m/dia	0 – 4,1 C = 1	4,1 – 12,2 C = 2		12,2 – 28,5 C = 4	28,5 – 40,7 C = 6	40,7 – 81,7 C = 8	> 81,5 C = 10	
EQUAÇÃO	Índice DRASTIC = 5*Dw+ 4*Rw+ 3*Aw+ 2*Sw+ 1*Tw+ 5*Iw+ 3*Cw							
VULNERABILIDADE	Baixo 28 – 71		Médio 71 – 126		Alto 126 – 180		Muito Alto 180 – 226	

Fonte: Elaborada pela autora baseado em Aller *et al.* (1987).

2.4.3 Análise Estatística

A análise estatística foi conduzida com o objetivo de comparar o desempenho dos métodos específicos para diferentes tipos de aquífero em relação ao método generalista DRASTIC. A estatística descritiva de uma amostra de dados constitui o padrão de distribuição da variável em análise. Essas estatísticas podem ser categorizadas em três tipos distintos: medidas de tendência central, medidas de dispersão e medidas de assimetria e curtose (Naghetini & Pinto, 2007).

Para a análise mais aprofundada dos resultados dos métodos de vulnerabilidade, foram empregadas neste trabalho, estatística descritiva por meio de medidas de dispersão. As principais medidas de dispersão incluem o desvio médio absoluto, a variância e o desvio padrão.

A variância, por sua vez, leva em consideração tanto os valores extremos quanto os valores intermediários, proporcionando uma representação mais refinada dos resultados obtidos. A variância relaciona os desvios em torno da média, ou, mais especificamente, a média aritmética dos quadrados dos desvios (Sampaio, Assumpção & Fonseca, 2018).

O desvio padrão é a medida mais utilizada na comparação de diferenças entre conjuntos

de dados desvio à sua alta precisão. O desvio padrão determina a dispersão dos valores em relação à média sendo calculado por meio da raiz quadrada da variância (Sampaio, Assumpção & Fonseca, 2018).

2.5 Resultados e Discursões

Primeiramente, apresentam-se os mapas de vulnerabilidade à contaminação gerados pelos quatro métodos distintos conforme originalmente concebidos. Para aprimorar a análise de vulnerabilidade na região de estudo, foram efetuadas adaptações nesses métodos, que serão apresentados como métodos modificados, além disso desenvolveu-se uma nova escala classificatória de vulnerabilidade, categorizando-a em insignificante, baixa, média e alta. Posteriormente, com base na nova classificação, foi realizado uma análise comparativa utilizando estatísticas para avaliar, de uma forma integrada, o desempenho dos métodos na área de estudo.

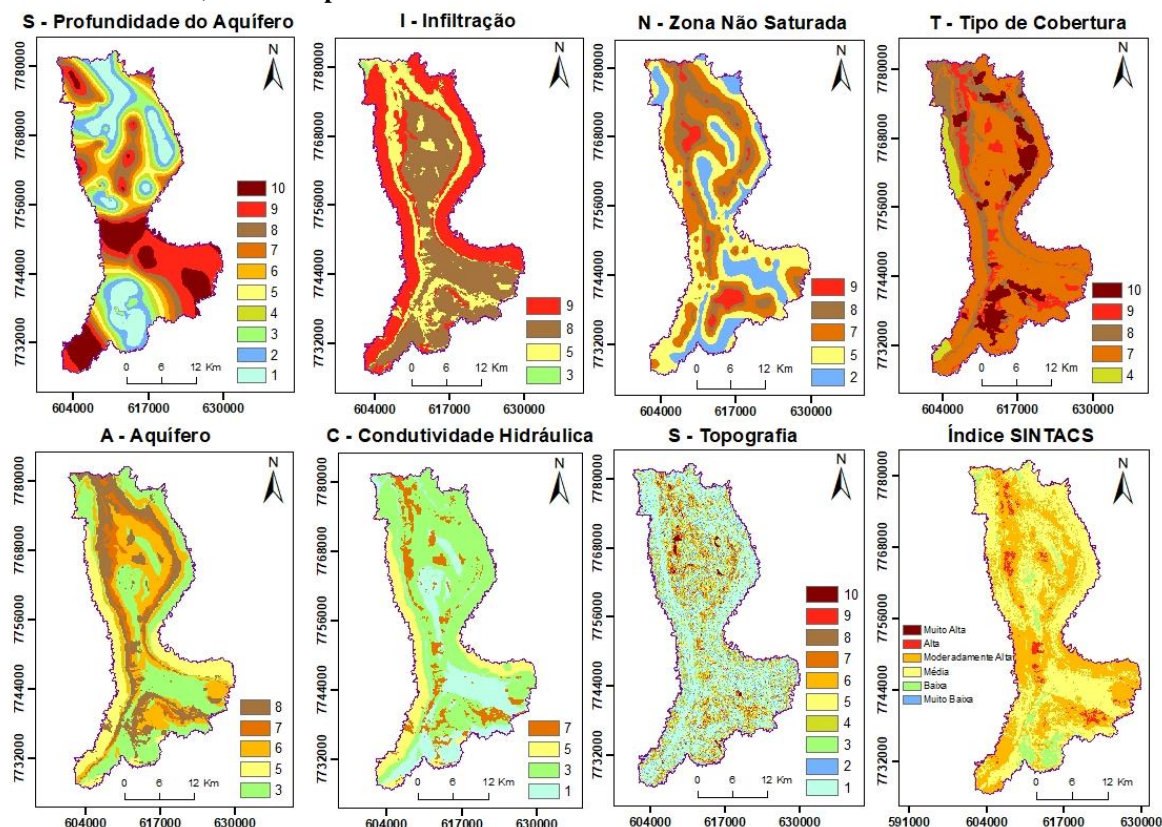
2.5.1 Método SINTACS

O método SINTACS (Civita & De Maio, 2000) consiste em sete parâmetros, a saber: Profundidade do aquífero (S), Infiltração (I), Zona não saturada (N), Tipo de cobertura (T), Aquífero (A), Condutividade Hidráulica (C) e Superfície topográfica (S), com uma escala variando de 1 a 10, onde 10 indica maior vulnerabilidade. O índice final de vulnerabilidade é determinado pela soma ponderada de cada parâmetro, utilizando pesos específicos, os quais neste estudo foram empregados para aquíferos fissurais. Esses pesos são, respectivamente, 3, 3, 3, 4, 4, 5 e 4. A classificação final pode variar de muito baixa (0-80), baixa (80 a 105), média (105 a 140), moderadamente alta (140 a 186), alta (186 a 210) e muito alta (> 210).

2.5.1.1 SINTACS Original

A aplicação do método SINTACS destaca a significativa influência dos parâmetros como o aquífero e a infiltração, sendo seguidos pela condutividade hidráulica em ordem de importância (Figura 4).

Figura 4 – Aplicação do método SINTACS no Sinclinal Moeda. O índice final é representado na imagem inferior da direita, nota-se a predominância de classes de vulnerabilidade média e moderadamente alta.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

O parâmetro aquífero incorpora considerações geológicas específicas da área de estudo, destacando que as áreas com maior grau de vulnerabilidade estão situadas nos dolomitos da Formação Gandarela e nas formações ferríferas da Formação Cauê. Os dolomitos são rochas particularmente suscetíveis à contaminação devido à sua alta solubilidade, enquanto as formações ferríferas exibem uma elevada porosidade, o que aumenta o risco de contaminação.

Por outro lado, a infiltração apresenta valores menores nos filitos da Formação Batatal pois caracterizam-se por baixa permeabilidade e porosidade. As áreas classificadas como classe 9, indicando maior probabilidade de contaminação, localizam-se predominantemente nas rochas cristalinas das suítes e nos complexos metamórficos. Esse padrão decorre do princípio adotado pelo método SINTACS, no qual uma taxa de infiltração elevada está associada a uma maior probabilidade de dissolução do contaminante, ou seja, menor chance de contaminação. Nesse sentido, regiões com maior taxa de infiltração, como na Formação Cauê e nas coberturas, tendem a receber uma classificação inferior (classe 5).

Os valores mais elevados de condutividade hidráulica são evidenciados nas coberturas sedimentares permitindo uma maior mobilidade da água de atravessar os poros. Isso se reflete no índice final do método SINTACS, onde prevalecem predominantemente classes de vulnerabilidade alta, coincidindo com as áreas onde essas coberturas sedimentares estão

situadas.

É relevante observar que os parâmetros aquífero e zona não saturada produzem resultados idênticos, embora tenham pesos distintas na fórmula, devido à utilização do mesmo mapa geológico como conjunto de dados de entrada.

Por outro lado, a profundidade do nível d'água não demonstra significância, mesmo quando atribuída com um peso de 3, uma vez que a região é predominantemente composta por aquíferos profundos, que possuem menor suscetibilidade à contaminação. Da mesma forma, a topografia não proporciona resultados satisfatórios devido à inadequação de sua classificação em relação à elevação do Sinclinal Moeda. Isso se evidencia pelo fato de que relevos íngremes, presentes nas serras da Moeda e Serra do Itabirito, tem pouca representatividade no mapa.

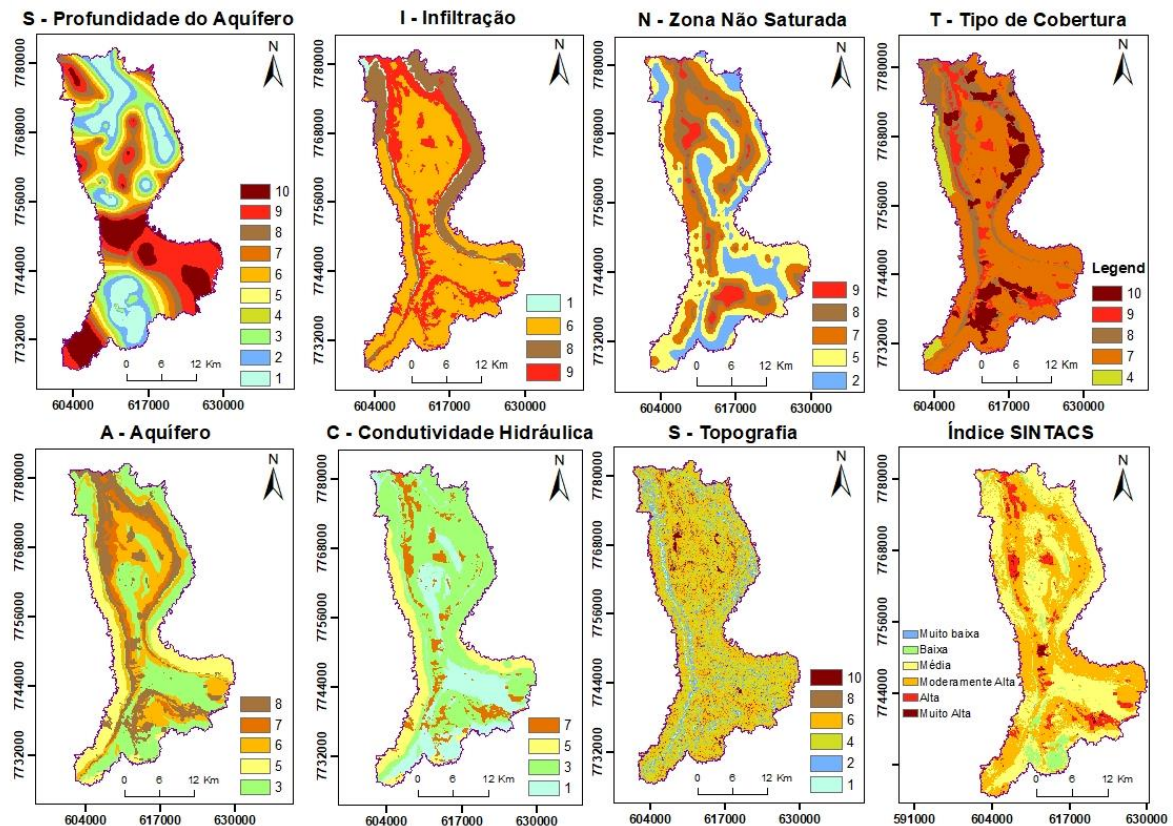
A cartografia de vulnerabilidade, empregando o método SINTACS, revela uma predominância de classes média e moderadamente alta. As classificações de vulnerabilidade muito alta e alta são observadas nas áreas onde ocorrem rochas da cobertura cenozoica, enquanto a classificação moderadamente alta é associada às formações Cauê e Gandarela. O mapa de vulnerabilidade indica que os aquíferos fissurais estão concentrados principalmente nas áreas classificadas como médias. Esse resultado contrasta com as expectativas estabelecidas para o método, que sugere que os aquíferos fissurais deveriam ser identificados como os mais suscetíveis à contaminação.

2.5.1.2 SINTACS Modificado

Para a adaptação do método SINTACS foram elaboradas novas classificações dos parâmetros infiltração e superfície topográfica (Figura 5). O parâmetro infiltração considera que quanto maior a pluviometria maior a capacidade de diluição e dispersão dos contaminantes. Na adaptação proposta, não se contemplou essa premissa, ou seja, estipula que quanto maior a pluviometria, maior o valor atribuído. Para a adaptação, os valores foram reclassificados em: De 0 a 100 mm/ano recebem peso 1; entre 100 e 200 mm/ano, peso 2; entre 200 a 300 mm/ano, peso 6; entre 300 e 400 mm/ano, peso 8; e acima de 400 mm/ano, peso 9.

No que diz respeito ao parâmetro superfície topográfica, a reclassificação estabelecida foi baseada no manual técnico de geomorfologia do IBGE (2009), onde: relevos planos são caracterizados por inclinação até 3%, relevos suave-ondulados possuem declividade entre 3 e 8%, relevos ondulados exibem inclinações de 8 a 20%, relevos forte-ondulados apresentam declividade variando entre 20 e 45%, relevos montanhosos são caracterizados por declividade entre 45 e 75%, e relevos escarpados excedem inclinações acima de 75%. Para cada uma dessas categorias, foram definidos pesos correspondentes, que são, respectivamente, 10, 8, 6, 4, 2 e 1.

Figura 5 – Modificação do método SINTACS no Sinclinal Moeda. Observa-se a mudança nos parâmetros tipo de cobertura (T) e topografia (S). No índice final, na imagem inferior a direita, foram observados aumento da classificação alta vulnerabilidade.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A adaptação do método SINTACS revelou-se eficaz, resultando em um mapa mais homogêneo, com o aumento das áreas classificadas como vulnerabilidade alta, especialmente nas regiões onde ocorrem as coberturas cenozoicas. Além disso, observa-se um aumento significativo nas áreas classificadas como moderadamente alta, onde os aquíferos fissurais estão localizados.

A alteração dos parâmetros apresentou variações significativas no resultado, indicando, portanto, que esses parâmetros desempenham um papel representativo e influente nesse método adaptado. O método SINTACS modificado demonstrou resultados satisfatórios quando aplicado aos aquíferos fissurais, mostrando-se mais eficiente para este contexto hidrogeológico do que o método original.

2.5.2 Método EPIK

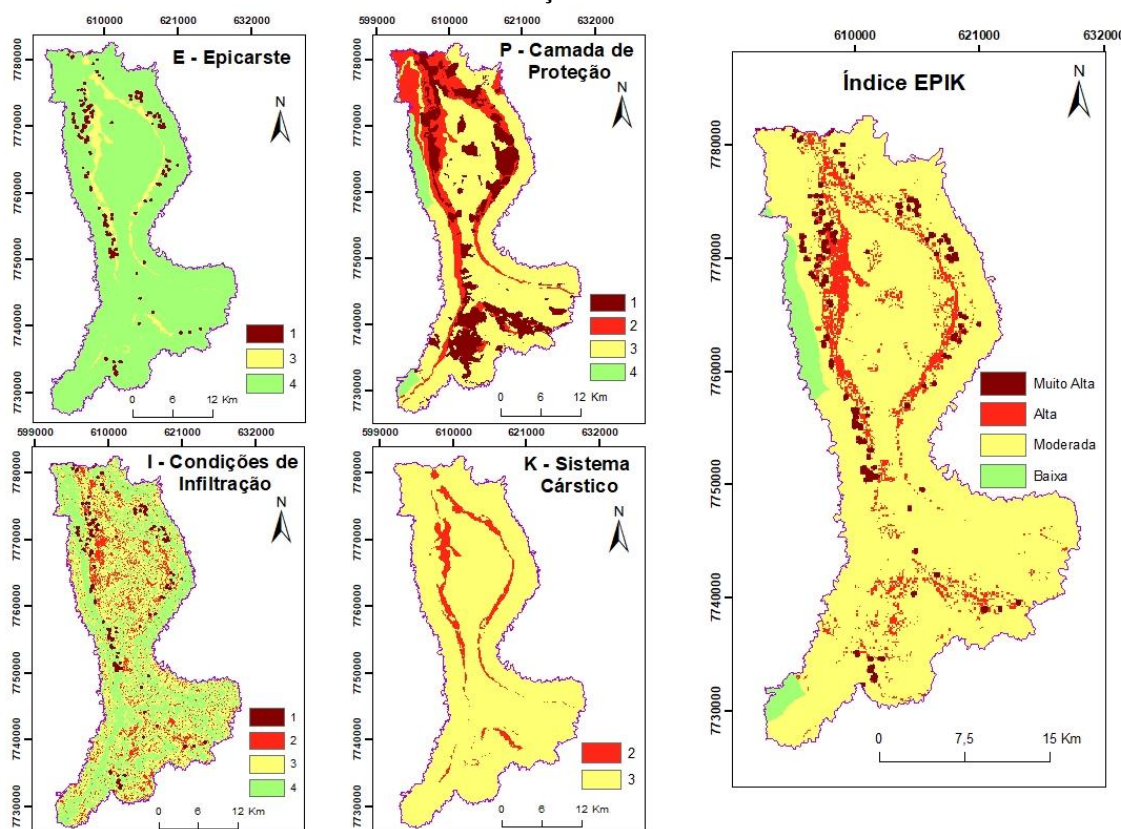
O método EPIK (Doerfliger, Jeannin & Zwahlen, 1998) consiste em quatro parâmetros, a saber: Epicarste (E), Camada de Proteção (P), Condição de Infiltração (I) e Sistema Cárstico (K), com uma escala variando de 1 a 4, onde 1 indica maior vulnerabilidade. O índice final de vulnerabilidade é determinado pela soma ponderada de cada parâmetro, utilizando pesos

específicos que são, respectivamente, 3, 1, 3 e 2. A classificação final pode variar de muito alta (0-19), alta (19 a 25), moderada (>25), baixa (>25 com P4). O método EPIK foi desenvolvido para ser utilizado exclusivamente em aquíferos cársticos.

2.5.2.1 EPIK Original

A elaboração dos mapas temáticos pelo método EPIK destaca a importância significativa do parâmetro epicarste (Figura 6).

Figura 6 - Método EPIK original com predominância da classificação de alta vulnerabilidade nas rochas da Formação Gandarela.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

No parâmetro epicarste, as cavidades foram designadas como classe 1, a Formação Gandarela como classe 3 e o restante da área como classe 4. Essa classificação indica uma vulnerabilidade muito alta no índice final EPIK para as cavidades e a Formação Gandarela. Esse cenário se deve as características específicas das cavidades e dos dolomitos, que apresentam elevada porosidade e permeabilidade. Consequentemente, essas formações geológicas possibilitam a infiltração rápida da água e de contaminantes, o que aumenta significativamente o risco de contaminação do aquífero.

Por outro lado, os parâmetros condição de infiltração e sistema cárstico são considerados de menor significância nesse contexto. Isso ocorre porque a condição de infiltração leva em

consideração a declividade do terreno, mesmo apresentando peso 3 na equação final, sua classificação é inadequada em relação à elevação do Sinclinal Moeda. Essa inadequação é evidenciada pelo fato de não ser considerar a ocorrência de relevos íngremes, como acontece nas serras da Moeda e do Itabirito, e, portanto, não foram realçados no mapa.

Em relação ao sistema cárstico, sua contribuição é limitada, pois utiliza o mesmo mapa geológico que o parâmetro epicarste, resultando em informações redundantes que não acrescentam dados significativos ao método de avaliação de vulnerabilidade. Essa limitação ocorre devido à ausência de um epicarste característico na área de estudo, o que impede a diferenciação adequada dos elementos cársticos na análise.

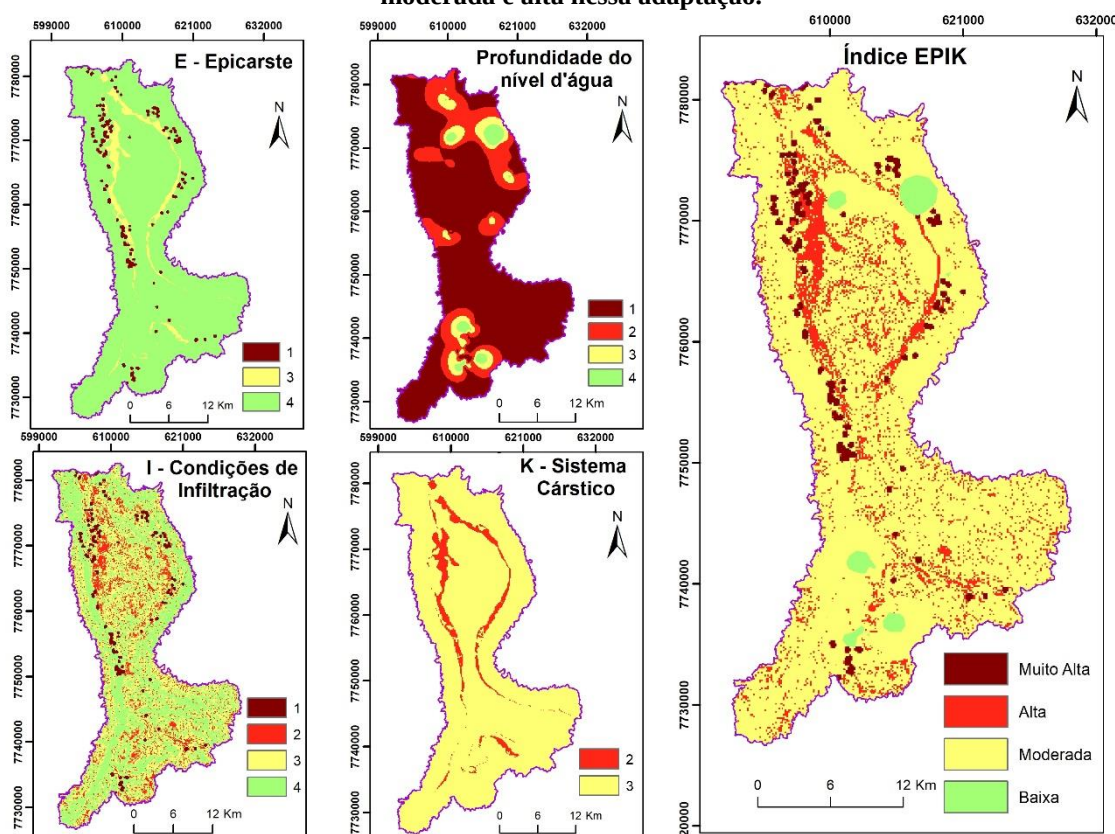
A integração dos mapas temáticos dos quatro parâmetros do método EPIK resultou em um mapa de vulnerabilidade, onde a classe predominante é a moderada. Destaca-se que as classificações, muito alta e alta estão concentradas nas cavidades e na formação Gandarela, conforme esperado para métodos desenvolvidos para aquíferos cársticos.

2.5.2.2 EPIK Modificado

Para a adaptação do método EPIK, realizou-se uma modificação substancial, envolvendo a substituição do parâmetro camada de proteção pela profundidade do nível d'água. Assim, as profundidades foram classificadas em quatro categorias, conforme a média aritmética: menores que 50 metros foram classificados com peso 1, de 50 a 100 metros com peso 2, de 100 a 150 metros foram classificados com peso 3, e por fim, profundidade do nível d'água maiores que 150 metros foram definidos com peso 4.

Essa adaptação resultou em variações notáveis no resultado, o que sugere que o parâmetro originalmente utilizado não é representativo para este método (Figura 7).

Figura 7 - Mapa de vulnerabilidade do método EPIK Modificado. Nota-se o incremento da classificação moderada e alta nessa adaptação.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A modificação efetuada no método demonstrou ser eficaz, uma vez que houve um aumento nas áreas classificadas como de alta vulnerabilidade, proporcionando um mapa mais heterogêneo. A introdução do parâmetro profundidade do nível d'água permitiu uma melhor compreensão da influência da profundidade na vulnerabilidade da área. O método EPIK modificado mostrou-se mais eficiente para o aquífero cárstico com maior presença de vulnerabilidade alta e muito alta.

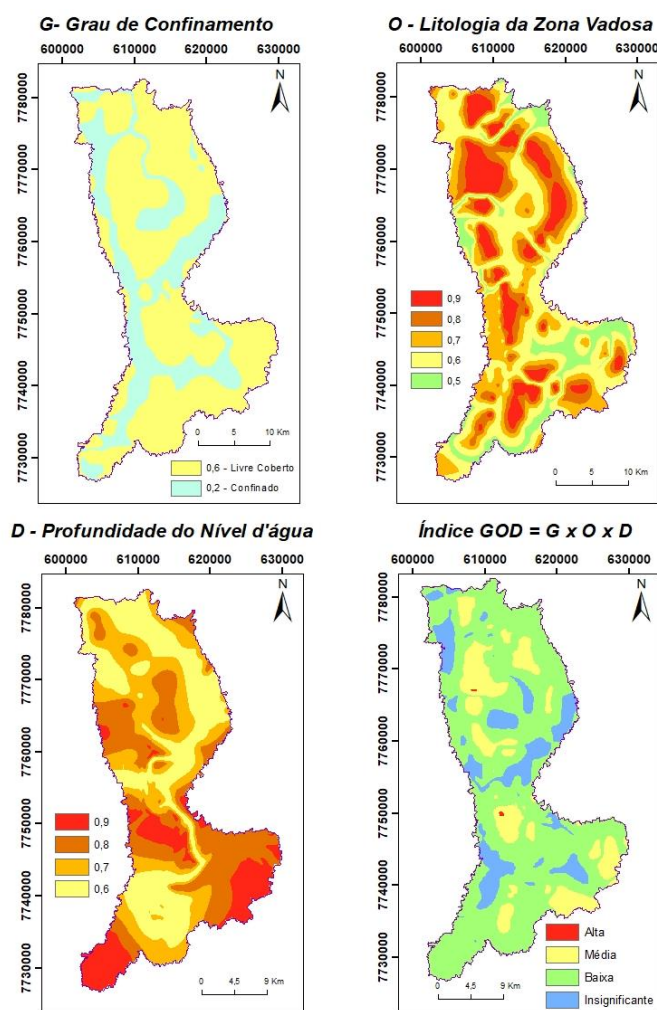
2.5.3 Método GOD

O método GOD (Foster & Hirata, 1988) consiste em três parâmetros, a saber: Grau de confinamento (G), Litologia da zona vadosa (O), Profundidade do nível d'água (D), com uma escala variando de 0,6 a 0,9, onde 0,9 indica maior vulnerabilidade. O índice final de vulnerabilidade é determinado pela multiplicação de cada parâmetro. A classificação final pode variar de insignificante (0-0,1), baixa (0,1 a 0,3), média (0,3 a 0,5), alta (0,5 a 0,7) e extrema (0,7 a 1,0). O método GOD foi desenvolvido para ser utilizado em aquíferos porosos.

2.5.3.1 GOD Original

A integração dos mapas temáticos referentes aos parâmetros do método GOD resultou em um mapa de vulnerabilidade, onde o parâmetro grau de confinamento é o parâmetro mais relevante, seguido da litologia da zona vadosa (Figura 8).

Figura 8 – Aplicação do método GOD no Sinclinal Moeda. O índice final é representado na última imagem inferior a direita, nota-se a predominância de classe de vulnerabilidade baixa.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

O parâmetro do grau de confinamento assume um papel importante na avaliação da vulnerabilidade, identificando áreas onde o aquífero está confinado, indicando baixa probabilidade de contaminação, e áreas onde os aquíferos são livres, apresentam maior risco de contaminação. Essas distinções são claramente identificadas no mapa do índice final de vulnerabilidade, onde as áreas classificadas como insignificante vulnerabilidade são identificadas.

Por sua vez, o parâmetro da litologia da zona vadosa considera a geologia da região em estudo, destacando as áreas das coberturas cenozoicas e da Formação Cauê como as mais

suscetíveis à contaminação, devido à alta porosidade e permeabilidade de seus aquíferos. Tais áreas são identificadas no índice final de vulnerabilidade, sendo classificadas como de média vulnerabilidade.

Contrariamente, a profundidade do nível d'água é considerada o parâmetro menos influente neste método, uma vez que a área de estudo é primordialmente composta por aquíferos profundos.

O método GOD resultou em um mapa de vulnerabilidade, onde a classe predominante é a baixa vulnerabilidade. É importante ressaltar que, embora este método tenha sido desenvolvido para avaliar a vulnerabilidade em aquíferos porosos, não é claramente evidenciado no mapa do índice final de vulnerabilidade as áreas com vulnerabilidade alta, conforme seria esperado para este tipo específico de aquífero.

2.5.3.2 GOD Modificado

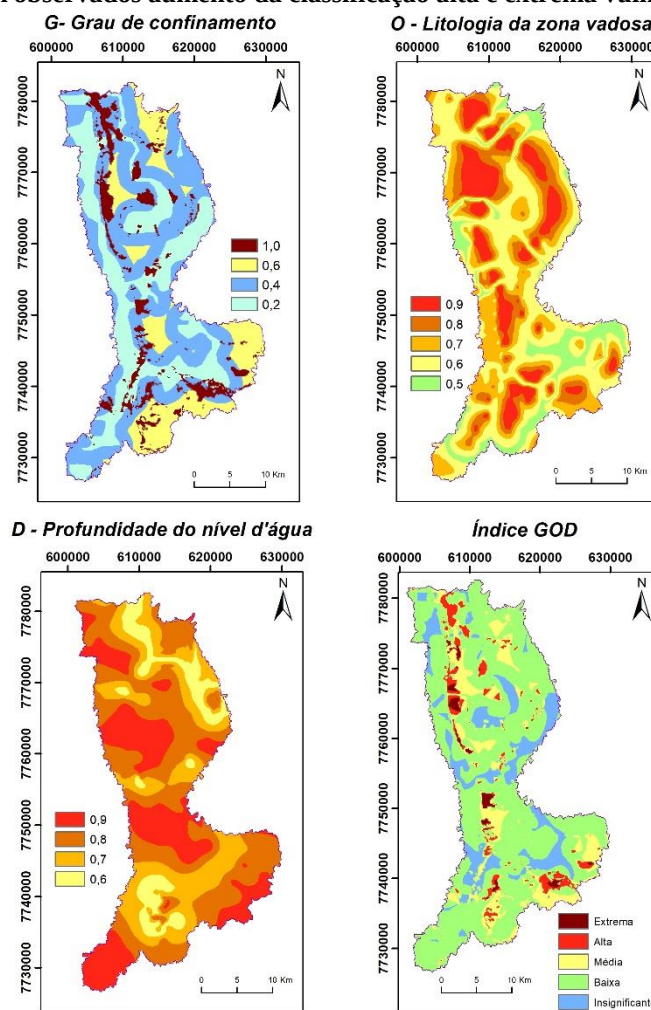
No método GOD foram efetuadas modificações nos parâmetros grau de confinamento e profundidade do nível d'água (Figura 9). No que se refere à classificação do grau de confinamento os aquíferos foram classificados em aquíferos de cobertura, livres, influência de confinamento e confinados.

Os aquíferos livres e de cobertura são aqueles cujo limite superior é representado pela superfície freática. Para diferenciá-los, os aquíferos de cobertura compreendem às coberturas sedimentares, enquanto os demais, onde todos os pontos estão à pressão atmosférica, foram designados como aquíferos livres.

Por outro lado, os aquíferos confinados são delimitados por camadas de rochas impermeáveis ou semipermeáveis, apresentando pressão confinante. Considerando as incertezas na análise do contato entre aquíferos livres e confinados, optou-se por definir os aquíferos com influência de confinamento como um *buffer* de 20% dos aquíferos confinados.

No que tange à profundidade do nível da água, realizou-se uma reclassificação onde os aquíferos com profundidade superior a 90 metros receberam um peso de 0,6, aqueles com profundidade entre 60 e 90 metros foram atribuídos peso 0,7, os aquíferos com profundidade entre 30 e 60 metros receberam peso 0,8, e os aquíferos com profundidade inferior a 30 metros foram ponderados com 0,9.

Figura 9 – Modificação do método GOD no Sinclinal Moeda. No índice final, na última imagem inferior a direita, foram observados aumento da classificação alta e extrema vulnerabilidade.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

O método GOD modificado mostrou-se mais adequado para o Sinclinal Moeda, entretanto, é importante destacar que a modificação no método não resultou em variações significativas no índice final relacionado à profundidade do nível d'água. Tal constatação afirma a presença predominante de aquíferos profundos na área de estudo, conferindo-lhes uma maior proteção contra potenciais fontes de contaminação.

Este método adaptado demonstrou ser particularmente mais eficaz para a avaliação de aquíferos porosos do que o método original, resultando em um aumento substancial nas áreas identificadas com vulnerabilidade alta e extrema. É notável que a eficácia deste método modificado é mais pronunciada em regiões onde as coberturas sedimentares são predominantes, coincidindo com a localização dos aquíferos livres na área de estudo. Embora o método GOD modificado tenha se mostrado eficiente para aquíferos porosos, é importante observar que na Formação Cauê foi identificada uma vulnerabilidade média e baixa.

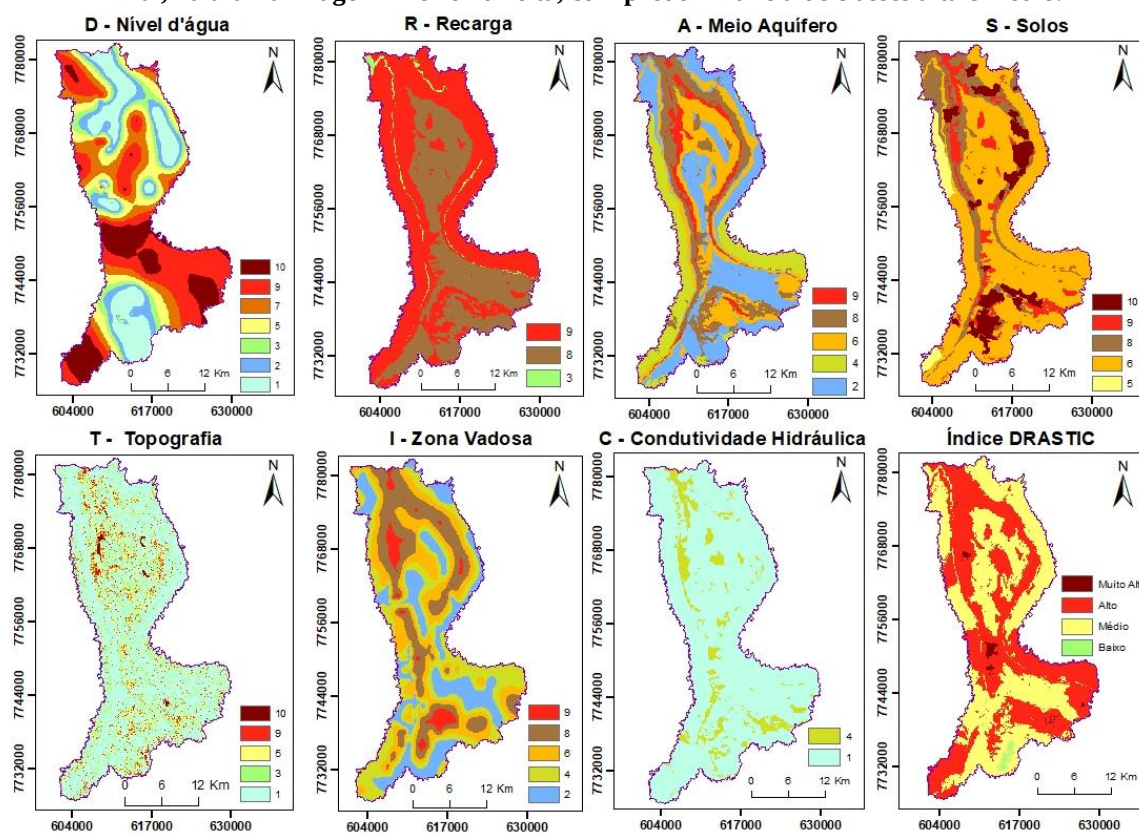
2.5.4 Método DRASTIC

O método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) consiste em sete parâmetros, a saber: Nível d'água (D), Recarga (R), Meio aquífero (A), Solos (S), Topografia (T), Zona vadosa (I) e Condutividade hidráulica (C), com uma escala variando de 1 a 10, onde 10 indica maior vulnerabilidade. O índice final de vulnerabilidade é determinado pela soma ponderada de cada parâmetro, utilizando pesos específicos. Esses pesos são, respectivamente, 5, 4, 3, 2, 1, 5 e 3. A classificação final pode variar de baixa (26-71), médio (71-126), alto (126-180) e muito alto (180-226). O método DRASTIC foi desenvolvido para ser utilizado em todos os tipos de aquíferos.

2.5.4.1 DRASTIC Original

O mapeamento de vulnerabilidade, empregando o método DRASTIC, demonstra que os parâmetros mais influentes são o meio aquífero e a recarga, sendo seguido pela condutividade hidráulica (Figura 10).

Figura 10 – Aplicação do método DRASTIC na área de estudo, com ênfase no mapa de vulnerabilidade final, na última imagem inferior direita, com predominância de classes alta e médio.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

O parâmetro meio aquífero considera a geologia da área de estudo, destacando que as áreas com maior vulnerabilidade estão situadas nos dolomitos da Formação Gandarela. O

aquífero Gandarela é particularmente suscetível à contaminação devido à alta solubilidade de suas rochas.

Quanto à recarga, esta apresenta uma taxa menor nos filitos da Formação Batatal, os quais exibem baixa permeabilidade e porosidade. A condutividade hidráulica demonstra valores elevados nas coberturas sedimentares, atribuídos à maior permeabilidade desses sedimentos.

Por outro lado, a profundidade do nível d'água não demonstra significância, mesmo quando atribuída com um peso de 5, o que se assemelha ao resultado obtido pelo método GOD e SINTACS. Da mesma forma, a topografia não proporciona resultados satisfatórios devido à inadequação de sua classificação em relação aos aspectos do relevo no Sinclinal Moeda. Isso se evidencia pelo fato de que relevos íngremes, presentes nas serras da Moeda e Serra do Itabirito, não são destacados no mapa.

É relevante observar que os parâmetros meio aquíferos e litologia da zona vadosa produzem resultados idênticos, apesar de possuírem ponderações distintas na fórmula, devido à utilização do mesmo mapa geológico como entrada de dados.

No mapa de índice final gerado, nota-se a predominância de classes médias e altas de vulnerabilidade. Destaca-se a classe alta, associada aos aquíferos Gandarela e Cauê, enquanto a classe média prevalece nos aquíferos fissurais.

2.5.4.2 DRASTIC Modificado

Para a adaptação do método DRASTIC, foram elaboradas novas classificações dos seguintes parâmetros: profundidade do nível d'água, recarga e condutividade hidráulica (Figura 11).

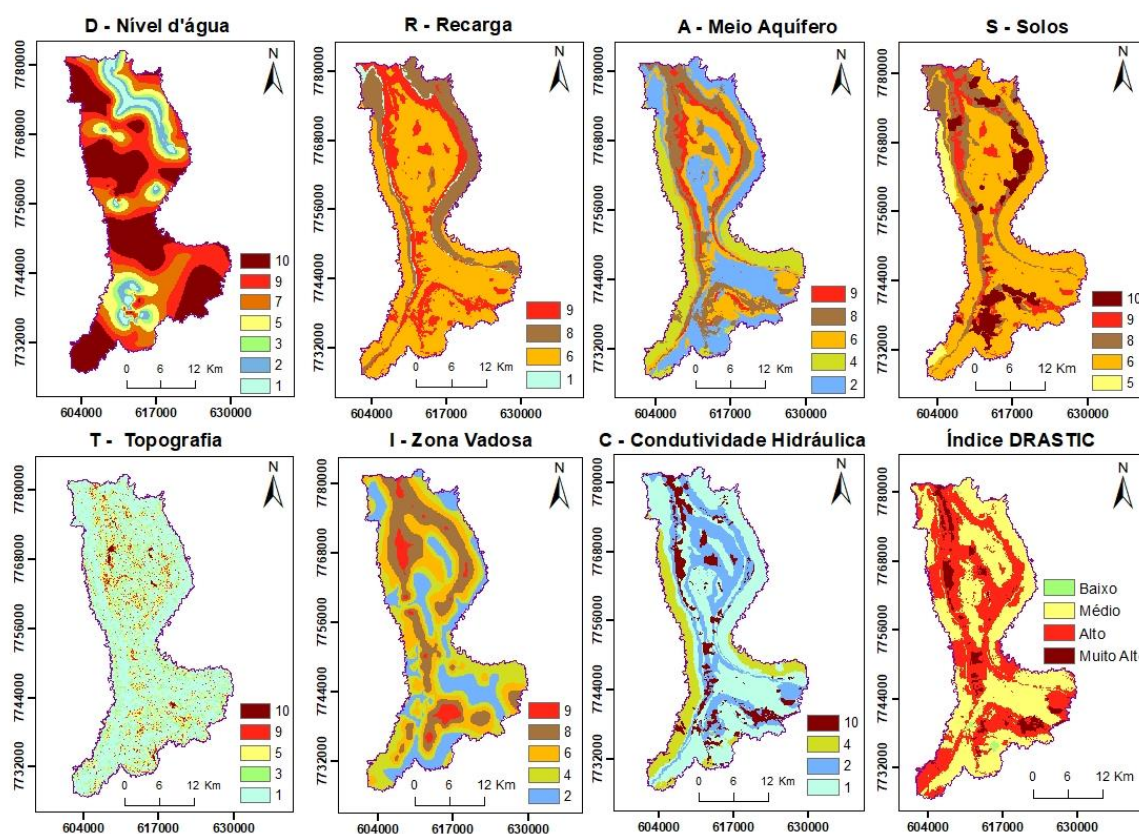
Aos aquíferos com profundidade de nível d'água superior a 90 metros foram atribuídos um peso de 1, aqueles com profundidade entre 75 e 90 metros receberam peso 2, enquanto os aquíferos com profundidade entre 60 e 75 metros foram classificados com peso 3. Da mesma forma, aquíferos com profundidade entre 45 e 60 receberam peso 5, aqueles entre 30 a 45 metros foram ponderados com peso 9, enquanto os aquíferos com profundidade variando de 15 a 30 metros foram atribuídos peso 9, e, por fim, os aquíferos com profundidade inferior a 15 metros foram ponderados com 10.

No caso da recarga, as faixas foram definidas da seguinte forma: de 0 a 100 mm/ano recebeu peso 1, de 100 a 200 mm/ano foi classificada com peso 3, de 200 a 300 mm/ano com peso 6, de 300 a 400 mm/ano com peso 8, e valores acima de 400 mm/ano foram ponderados com peso 9.

Por fim, no que se refere a condutividade hidráulica a reclassificação consistiu em:

valores menores que 0,41 m/dia foram ponderados com peso 1, aqueles na faixa de 0,41 a 1,22 m/dia receberam peso 2, de 1,22 a 2,85 m/dia foram classificados com peso 4, de 2,85 a 4,07 m/dia receberam peso 6, de 4,07 a 8,15 foram ponderados com peso 8 e valores superiores a 8,15 m/dia receberam peso 10.

Figura 11 – Modificação do método DRASTIC, onde foram alterados os parâmetros Nível d'água (D), Recarga (R), Solos (S) e Condutividade Hidráulica (C).



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

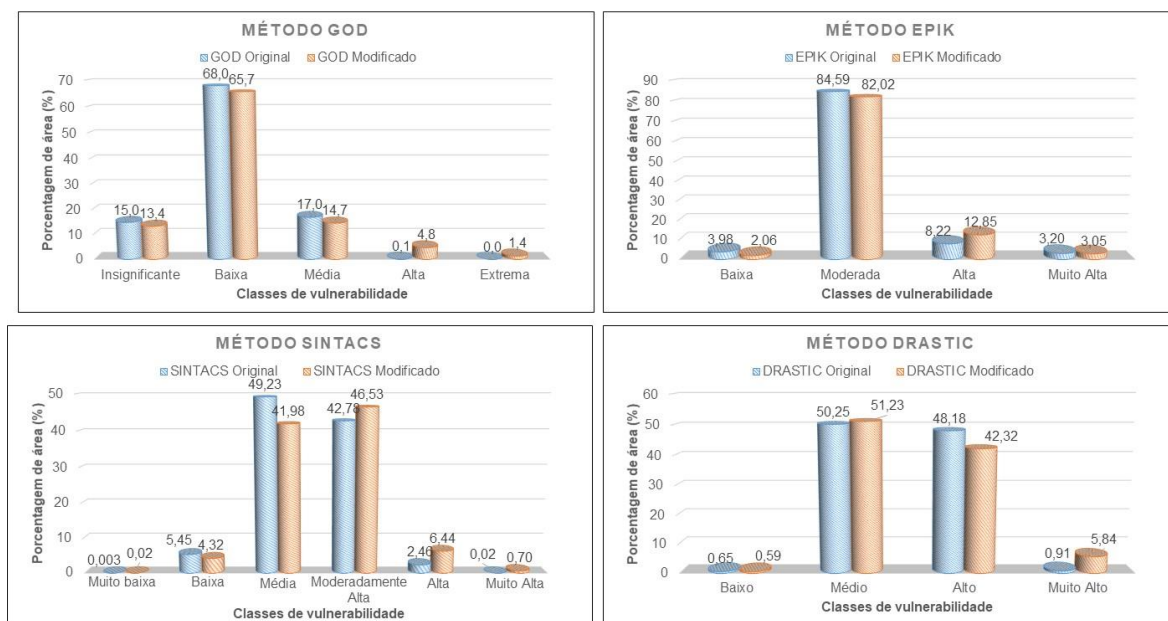
A adaptação do método DRASTIC revelou-se eficaz, resultando no aumento das áreas de classificadas como vulnerabilidade muito alta. A alteração do parâmetro recarga e condutividade hidráulica apresentou variações significativas no resultado, indicando, portanto, que esses parâmetros desempenham um papel representativo e influente nesse método adaptado. Por outro lado, a modificação do parâmetro profundidade do nível d'água não produziu alterações significativas no resultado, sendo assim esse parâmetro não desempenha um papel representativo neste contexto.

O método DRASTIC adaptado mostrou-se mais eficiente para os todos os tipos de aquífero. Nota-se um aumento da vulnerabilidade muito alta onde estão localizados os aquíferos porosos. A vulnerabilidade alta permanece nas áreas de aquíferos cársticos das rochas da Formação Gandarela e aquíferos porosos da Formação Cauê, enquanto a classificação média está distribuída de maneira irregular nos aquíferos fissurais.

2.5.5 Comparação dos métodos

Com o propósito de obter uma comparação mais apropriada entre os quatro métodos utilizados nessa pesquisa, foi elaborado uma nova escala de classificação dos métodos de vulnerabilidade. Essa classificação foi realizada com base na análise da porcentagem de área associada a cada categoria. No gráfico da Figura 12 são observadas as porcentagens de área de cada classificação para os métodos utilizados.

Figura 12 – Gráfico comparativo do método GOD, SINTACS, EPIK e DRASTIC original e modificado das porcentagens de área de cada classificação. Ressalta-se que as classificações de vulnerabilidade são diferentes para cada método.

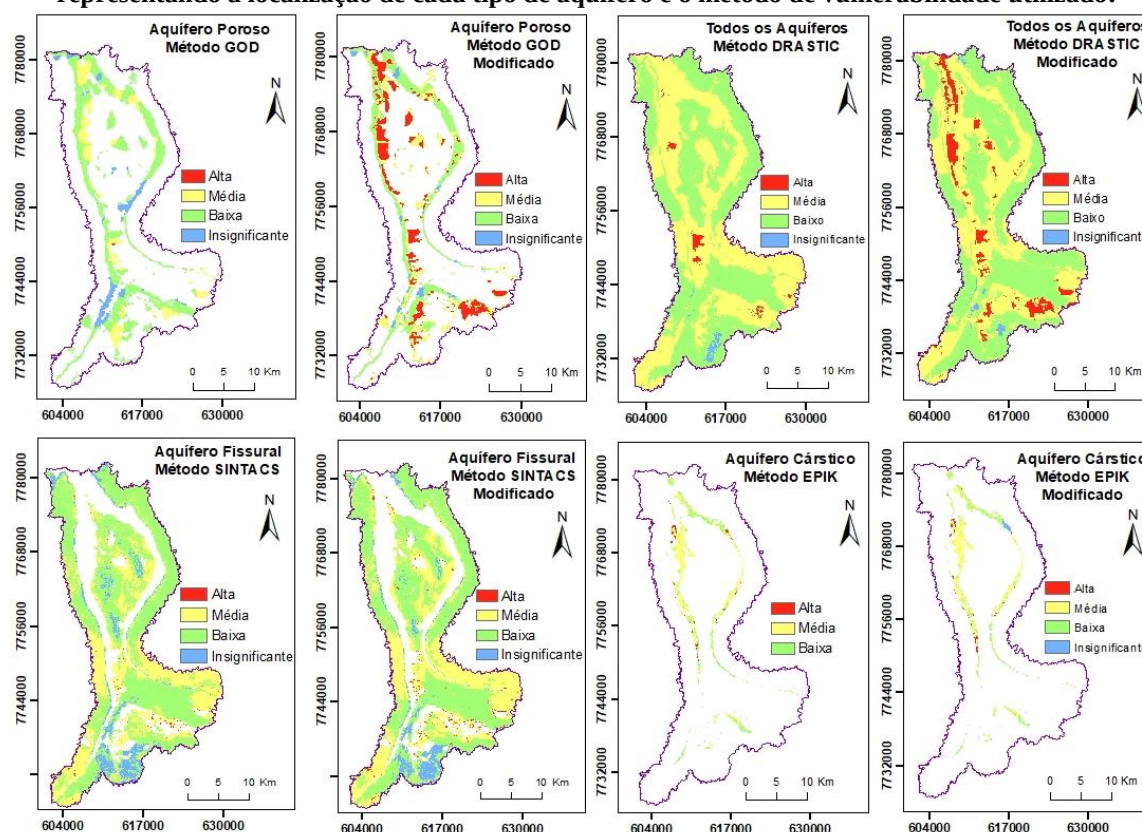


Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Nesse contexto, foram identificados os valores próximos que poderiam ser agrupados em quatro classes, alinhando-se com a estrutura de classificação empregada em dois métodos distintos neste estudo (DRASTIC e EPIK). Consequentemente, a reclassificação resultou em quatro níveis: Alta, Média, Baixa e Insignificante. No método SINTACS, foram agrupadas as classificações muito baixa com baixa, assim como o agrupamento das classificações alta com muito alta. Por sua vez, no método GOD as classificações alta e extrema foram combinadas em uma única categoria.

Nos métodos EPIK e DRASTIC, não houve agrupamento de classificações, uma vez que esses métodos já apresentam quatro classes predefinidas, embora tenham ocorrido alterações em suas nomenclaturas. A Figura 13 ilustra os aquíferos de acordo com a permeabilidade e mostra os métodos com suas reclassificações de acordo com o tipo de aquífero.

Figura 13 – Nova escala de classificação propostas para os quatro métodos utilizados na área de estudo, representando a localização de cada tipo de aquífero e o método de vulnerabilidade utilizado.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Após a normalização da escala de classificação, foi possível constatar que o método GOD adaptado demonstrou eficácia na avaliação de aquíferos porosos, evidenciando que os aquíferos das coberturas apresentam maior vulnerabilidade, seguidos pelo aquífero Cauê. Por outro lado, o método SINTACS não se revelou representativo na área de estudo, visto que deveria evidenciar maior vulnerabilidade nos aquíferos fissurais representados pelos aquíferos Piracicaba, seguido pelos aquíferos complexos TTG e suítes intrusivas, o que não é refletido no mapa do índice final.

O método EPIK demonstrou eficácia ao revelar que as vulnerabilidades altas são primeiramente encontradas nas cavidades, seguidas por uma vulnerabilidade média no aquífero Gandarela. Enquanto isso, o método DRASTIC mostrou-se eficiente para todos os tipos de aquíferos, confirmando a premissa de que os aquíferos das coberturas, Cauê e Gandarela são os mais suscetíveis à contaminação.

A análise estatística foi conduzida com base na nova escala de classificação proposta, comparando as áreas correspondentes às diferentes classes de vulnerabilidade identificadas para cada tipo de aquífero nos métodos modificados GOD, SINTACS e EPIK. Essas áreas foram comparadas com aquelas obtidas pelo método generalista modificado DRASTIC, conforme apresentado na Tabela 7. Em síntese, os métodos específicos para cada tipo de aquífero foi

comparado com a área no método generalista (DRASTIC). Essa abordagem sistemática permite uma avaliação comparativa abrangente da eficácia dos métodos em diferentes tipos de aquíferos.

Tabela 7– Porcentagem das áreas das classes de vulnerabilidade, para cada tipo de aquífero reveladas pelos métodos modificados SINTACS (Aquífero Fissural), EPIK (Aquífero Cárstico), GOD (Aquífero Poroso) comparativamente com aquelas apontadas pelo método DRASTIC modificado.

MÉODOS MODIFICADOS	CLASSES DE VULNERABILIDADE			
	Alta	Média	Baixa	Insignificante
SINTACS	0,39%	38,15%	55,72%	5,72%
DRASTIC Fissural	0,30%	32,72%	66,21%	0,75%
EPIK	2,62%	35,50%	57,79%	4,02%
DRASTIC Cárstico	1,40%	80,82%	17,74%	0%
GOD	29,25%	26,11%	40,47%	4,11%
DRASTIC Poroso	27,31%	65,54%	6,90%	0,15%

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A comparação das proporções de área entre os métodos específicos modificados e o método generalista evidencia que os métodos específicos são mais apropriados. Esta relação é sustentada pela avaliação dos resultados da variância e o desvio padrão, conforme apresentados no Quadro 8. Valores inferiores dessas estatísticas indicam uma distribuição mais concentrada dos dados em torno da média, o que implica em estimativas mais precisas e menos variáveis.

A constatação de uma dispersão reduzida nos métodos específicos de cada tipo de aquífero, reforça a eficácia desses métodos na análise das características individuais de cada aquífero. Essa consistência nos resultados sugere que os métodos específicos oferecem uma abordagem mais apropriada para a estimativa da vulnerabilidade da região de estudo. Apesar disso, é importante destacar que o método DRASTIC, desenvolvido para todos os tipos de aquíferos gerou resultados que podem ser considerados satisfatórios.

Tabela 8– Estatística descritiva, utilizando variância e desvio padrão para comparação entre os métodos e os tipos de aquíferos da área de estudo.

Estatística	SINTACS	DRASTIC Fissural	GOD	DRASTIC Poroso	EPIK	DRASTIC Cárstico
Variância	523,45	738,9	173,83	648,56	531,51	1172,64
Desvio Padrão	22,88	27,18	13,18	25,47	23,05	34,24

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

2.6 Conclusões e Recomendações

A análise da vulnerabilidade à contaminação das unidades aquíferas no Sinclinal Moeda por meio dos quatro métodos propostos, SINTACS, EPIK, GOD e DRASTIC, proporcionou a identificação das regiões mais susceptíveis à contaminação, levando em consideração as

características intrínsecas da área de estudo.

De modo geral, os métodos originais revelaram resultados pouco significativos, uma vez que foram elaborados para serem aplicados em outros contextos, sem considerar as características de climas tropicais. Em contrapartida, adaptações foram introduzidas nos métodos, considerando a geologia, hidrogeologia e geomorfologia específica da área de estudo.

Para adaptar o método SINTACS, foram desenvolvidas novas classificações para os parâmetros infiltração e superfície topográfica. No método EPIK, uma modificação foi realizada substituindo o parâmetro camada de proteção pela profundidade do nível d'água. No método GOD, alterações foram implantadas nos parâmetros grau de confinamento e profundidade do nível d'água. Quanto ao método DRASTIC, novas classificações foram elaboradas para os parâmetros de profundidade do nível d'água, recarga e condutividade hidráulica.

Os métodos adaptados demonstraram eficácia na identificação de áreas mais susceptíveis a maior vulnerabilidade, bem como na determinação dos parâmetros mais relevantes nas equações. No método SINTACS, os parâmetros mais importantes são o aquífero (A), a infiltração (I) e a condutividade hidráulica (C). No método EPIK, destacam-se o epicarste (E) e a profundidade do nível d'água (P). Já no método GOD, os parâmetros como grau de confinamento (G) e litologia da zona vadosa (O) são de particular importância. Por fim, no método DRASTIC, são fundamentais o meio aquífero (A), a recarga (R) e a condutividade hidráulica.

Através da modificação da escala de classificação, constatou-se que o método GOD adaptado se mostrou eficaz na avaliação de aquíferos porosos, indicando que os aquíferos das coberturas apresentam maior vulnerabilidade, seguidos pelo aquífero Cauê. Por outro lado, o método SINTACS não revelou representatividade na área de estudo, uma vez que deveria evidenciar maior vulnerabilidade nos aquíferos fissurais, o que não é refletido no mapa do índice final.

O método EPIK demonstrou eficácia ao afirmar que as vulnerabilidades altas e médias são encontradas nas cavidades e no aquífero Gandarela. Enquanto isso, o método DRASTIC mostrou-se eficiente para todos os tipos de aquíferos, confirmando a premissa de que os aquíferos das coberturas, Cauê e Gandarela são os mais suscetíveis à contaminação.

A comparação das proporções de área entre os métodos específicos modificados e o método generalista, evidencia a superioridade dos métodos específicos. Tal relação é sustentada pela avaliação dos resultados das estatísticas aplicadas. No entanto, o método DRASTIC não deve ser desconsiderado, pois apresentou resultados satisfatórios para a aplicação em todos os

tipos de aquíferos.

A avaliação da vulnerabilidade à risco de contaminação é fundamental para a gestão dos recursos hídricos de uma região. A partir dos métodos de vulnerabilidade, é possível identificar áreas com maior probabilidade de contaminação. No Sinclinal Moeda, torna-se evidente que os aquíferos das coberturas, Cauê e Gandarela, são as áreas mais suscetíveis. É importante ressaltar que alguns parâmetros, tais como solo, desenvolvimento do sistema cárstico e litologia da zona vadosa não foram tão eficazes devido à falta de dados da região. Para uma análise mais precisa, seria necessário um banco de dados mais abrangente da área de estudo.

Como os métodos aplicados neste estudo não foram desenvolvidos considerando as características físicas do Brasil, recomenda-se a utilização de um método especificamente projetado para ser aplicado a todos os tipos de aquíferos, levando em conta as particularidades da geológicas e hidrogeológicas presentes em regiões de clima tropical.

2.7 Referências Bibliográficas

- Alkmim, F. F. & Marshak, S. (1998), Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, Amsterdam, n.90, p.29-58.
- Alkmim, F.F. & Noce, C.M. (2006), The Paleoproterozoic Record of the São Francisco Craton. IGCP 509 Field workshop, Bahia e Minas Gerais, Brasil. *Field Guide & Abstracts*, 114p.
- Aller, L.; Bennett, T.; Lehr, J. H.; Petty, R. J.; Hackett, G. (1987), *Drastic: A Standardized System For Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*. National Water Well Association. Dublin, Ohio 43017.
- Andrade, I.B. (2023), *Modelo Hidrogeológico de Fluxo do Flanco Oeste do Sinclinal Moeda: Passado, Presente e Futuro do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais, Brasil*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais.
- Auge, M. (2007), *Vulnerabilidad de Acuíferos Conceptos y Métodos*. Servicio Geológico Minero Argentino, Buenos Aires, v. 7, p. 1-35, 7.
- Azevedo, U.R.; Machado, M.M.M.; Castro, P.T.A.; Renger, F.E.; Trevisol, A.; Beato, D.A.C. (2012). *Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG): proposta*. CPRM. Belo Horizonte -MG, v1.
- Barazzuoli, P.; Capacci, F.; Migliorini, J.; Mocenni, B.; Rigati, R.; Salleolini, M. (2005), *La Vulnerabilità Degli Acquiferi All'inquinamento Nell'ambito Dello Schema Metropolitano Dell'area Senese*. *Giornale di Geologia Applicata* 2. 151–157.
- Beato, D.A.C.; Monsore, A.M. & Bertachini, A.C. (2006), *Potencial Aquífero nos Metassedimentos do Quadrilátero Ferrífero – Região da Apa Sul RMBH – MG*. XIV Congresso Brasileiro de Geologia.
- Biondić, R.; Meaški, H.; Biondić, B.; Loborec, J. (2021), *Karst Aquifer Vulnerability Assessment (KAVA) Method—A Novel GIS-Based Method for Deep Karst Aquifers*. *Sustainability*, 13, 3325. <https://doi.org/10.3390/su13063325>.

- Castro, P. T. A.; Endo, I.; Gandini, A. L. (2020), *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. [S. l.]: 3i Editora. 482 p.
- CBH Rio das Velhas. (2013), *Produto 3 - Estudos Hidrológicos E Hidrogeológicos Da Bacia Do Rio Itabirito E Dos Cenários De Outorgas De Recursos Hídricos (Bacia Do Rio Itabirito)*. Ato Convocatório Nº 018/2012.
- CBH Rio das Velhas. (2016), *Dois lados da Moeda – Carta dos comitês de bacia dos rios das Velhas e Paraopeba sobre o Sinclinal Moeda*. Ato Convocatório Nº 018/2012
- Chemale JR, F.; Rosière, C. A.; Endo, I. (1991), *Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - Um Modelo*. *Pesquisas em Geociências*, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 104–127, doi: 10.22456/1807-9806.21350.
- Civita, M. & Maio, M. (2004), *Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian “combined” approach*. *Geofísica Internacional*. Vol. 43, Num. 4, pp. 513-532.
- Dantas, J.C.M.; Mesquita, D.C.; De Paula, R.S.; Guerra, K.J. (2017). *Correlação entre dados de perfilagem geofísica e potencial de bombeamento de poços em litotipos da Formação Cauê no sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG*. *Águas Subterrâneas*, v.31, n.4, p.373-383, doi: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v31i4.28910>.
- De Maio, M.; Civita, M. Farina, M. Zavatti, A. (2001), *Linee-guida per la redazione e l’uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all’inquinamento*. *Manuali e linee guida* 4/2001.
- Doerfliger, N.; Jeannin, P.Y. & Zwahlen, F. (1999), *Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method)*. *Environmental Geology*. 39 (2).
- Doni, M.V. (2004), *Análise de Cluster: Métodos Hierárquicos e de Particionamento*. Trabalho de Graduação - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo.
- Dorr, J.V.N. (1969), *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 641-A. U.S. Geological Survey, pp. 1-110.
- Endo I.; Galbiattih, F.; Delgadoc, E. R.; Oliveira, M. M. F.; Zapparolia, C.; Moura, L. G. B.; Peresg, G.; Oliveira, A. H.; Zavaglia, G.; Gomes, C. J. S.; Carneiro, M. A.; Nalini, J. H. A.; Castro, P. T. A.; Suita, M. T. F.; Tazava, E.; Lana C. C.; Martins-Neto, M. A.; Martins, M. S.; Ferreira, F. F. A.; Franco, A. P.; Almeida, L. G.; Rossi, D. Q.; Angeli, G.; Madeira, T. J. A.; Piassa, L. R.A.; Mariano, D.F.; Carlos, D. U. (2019), *Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. Escala 1:150.000. Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP -Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero.
- Endo, I.; Machado, R.; Galbiatti, H.F.; Rossi, D.Q.; Zapparoli, A.C.; Delgado, C.E.R.; Castro, P.R.A.; Oliveira, M.M.F. (2020), *Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. In: *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero.
- Feitosa, F.A.C., Manoel Filho J., Feitosa E.C., Demetrio J.G.A. (2008), *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Rio de Janeiro: CPRM; Recife: LABHID, 812 p.
- Filho, A. C.; Shinzato, E. (2005), *APA Sul RMBH - Estudos do Meio Físico – Pedologia*.

Projeto APA Sul da RMBH, Estudos do Meio Físico Escala 1:50.000.

- Filho, A.C. (2008). Solos e ambientes do Quadrilátero Ferrífero (MG) e aptidão silvicultural dos tabuleiros costeiros. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras.
- Formoso, D. (2014), Identificação e estudo das áreas prioritárias para conservação da biodiversidade no Sinclinal Moeda (MG) com base nos serviços ecossistêmicos. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais.
- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M.; Paris, M. (2002), Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Servmar – Serviços Técnicos Ambientais Ltda, p. 1-101.
- Foster, S.S.D.; Hirata, R.C. & Rocha, G.A. (1988), Riscos de poluição de águas subterrâneas: Uma proposta metodológica de avaliação regional. Águas Subterrâneas.
- Francisco, R. F. (2013), Avaliação Da Vulnerabilidade Natural À Contaminação Do Sistema Aquífero Bauru, Na Região Centro-Sul Do Estado De São Paulo. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro – SP.
- Freitas, S. M. A. C. & Bacellar, L. A. P. (2013), Avaliação da recarga de aquíferos em microbacias do alto rio das Velhas, Minas Gerais. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 18 n.2 –31-39.
- Freitas, S. M. A. C. (2010), Quantificação da infiltração e da recarga de aquíferos do alto rio das Velhas (M.G.). Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto.
- Gaidukas, G. (2016), Contribuição à Geologia do Distrito de Antônio Pereira, Ouro Preto, MG. Monografia (Graduação em Geologia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- Godoy, F. E.; García, J. T. S.; Estrada, S. O. Estrada, R. M.; Cruz-Cárdenas, G.; Barragán, F. V.; Leal, A. R.; Velázquez, J. N. (2013), Aplicación Del Método Sintacs Para La Determinación De La Vulnerabilidad Acuífera En La Cuenca Del Río Duero, Michoacán, México. Rev. Int. Contam. Ambie. 29 (4) 235-248.
- Goldscheider, N. & Ravbar, N. (2007), Proposed Methodology of Vulnerability and Contamination Risk Mapping for the Protection of Karst Aquifers in Slovenia. Acta Carsologica.
- Goldscheider, N.; Klute, M.; Sturm, S.; Hötzl, H. (2000), The PI method - A GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. Zeitschrift fur Angewandte Geologie. 46. 157-166.
- Gomes, J; Kishi, R. T.; Milek, C. B. (2011), Avaliação De Incertezas Geológicas Na Determinação Do Índice De Vulnerabilidade Sintacs Em Uma Área Do Aquífero Carste Em Almirante Tamandaré. XIX Simpósio Brasileiro de Recurso Hídricos.
- Guerra, K. J. (2010), Aplicação de método geofísico em estudo hidrogeológico no município de Nova Lima – MG: caracterização de aquíferos em área urbana. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais.
- Guiguer, N.; Kohnke, M.W. (2002). Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos. Águas Subterrâneas, (1).
- Hilário, C.C. (2018). Estudos comparativos dos métodos de classificação de cavidades propostos pelas intrusões normativas MMA 02/2009 e 02/2017 na relevância física e histórico-cultural aplicados em cavidades da Fazenda Gogo – Mariana, MG. Dissertação

- (Mestrado em Geologia Ambiental e Conservação de Recursos Naturais). Universidade Federal de Ouro Preto.
- Hirata, R. & Fernandes, A.J. (2008), Vulnerabilidade à poluição de aquíferos. In: Hidrogeologia Conceitos e Aplicações, 3ª ed. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil - CPRM.
- Hirata, R.C.A.; Suhogusoff, A.V. (2004). A proteção dos recursos hídricos subterrâneos no estado de São Paulo. *Águas Subterrâneas*, (1).
- Júnior, J.G.R.; Lobato, L.M.; Lima, L.C.; Porto, C.G.; Figueiredo e Silva, R.C. Metaturbidite-hosted gold deposits, Córrego do Sítio lineament, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, v. 45, p. 5-22, 2015.
- Kavouri, K.; Plagnes, V.; Tremoulet, J.; Dörfliger, N; Rejiba, F.; Marchet, P. (2011), PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability—application to the Ouyse karst system (southwest France). *Hydrogeology Journal*.
- Lott, D. & Polignano, M. V. (2016), Dois Lados Da Moeda – Carta dos comitês de bacia do Velhas e Paraopeba sobre o Sinclinal Moeda, CBH – Rio das Velhas. Belo Horizonte-MG.
- Magalhães, C. C. C; Melo, M. C.; Guiger, N.; Paula, R. S. (2022), The Cauê Aquifer on the eastern limb of Moeda Syncline: characterization, impacts, and flow in an area west of Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero) – MG, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 52 (4). <https://doi.org/10.1590/2317-4889202220220005>.
- Maia, P. H. P. (2011), Um Novo Método Para Avaliar A Vulnerabilidade Dos Aquíferos. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador - BA.
- Malík, P. & Svasta, J. (1999), REKS - An alternative Method of Karst Groundwater Vulnerability Estimation. Svasta, Jaromir, 79-85. 10.13140/2.1.2919.7766.
- Margane, A. (2003), Guideline for Groundwater Vulnerability Mapping and Risk Assessment for the Susceptibility of Groundwater Resources to Contamination. Federal Ministry for Economic Cooperation and Developente, Damascus, v.4.
- Mesquita, D. C; Dantas, J. C. M.; De Paula, R. S.; Guerra, K. J. (2018), Estudo dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos em ensaios de campo em itabiritos brandos da porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. *Geonomos, CPMTC*. 25(2), p12-19.
- Miller, J. A. (1999), Ground Water Atlas of the United States 2000. Groundwater Atlas of the United States: introduction and national summary. United States Geological Survey Publication HA 730-A, 15 p.
- Miranda, C. S.; Mioto, C. L.; Lastoria, G.; Gabas, S. G.; Paranhos Filho, A. C. (2015), Uso de sistemas de informação geográfica (SIG) na modelagem da vulnerabilidade de aquífero livre: Comparação entre os métodos GOD e EKv na bacia do rio Coxim, São Gabriel do Oeste, MS, Brasil. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 34, n. 2, p.312-322.
- Morais, J. B. A. (2016), Vulnerabilidade e riscos à poluição/contaminação das águas subterrâneas na área do complexo industrial portuário do Pecém – Estado do Ceará. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife – PE.
- Mourão, M. A. A. (2007), Caracterização Hidrogeológica Do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG.

- Naghetini, M.; Pinto, E.J.A. (2007). Hidrologia Estatística. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Belo Horizonte -MG, 552p.
- Noce, C. M. (1995). Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Tese (Doutorado em Geologia). Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo, São Paulo. 128p.
- Nogueira, J. D. L. & Amaral, R. F. (2009), Comparação entre os métodos de interpolação (Krigagem e Topo to Raster) na elaboração da batimetria na área da folha Touros – RN. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE, p. 4117-4123.
- Oliveira, M. S. (2012), Detecção de mudanças de uso e cobertura da terra no Sinclinal Moeda (MG) no período de 1991 a 2011 e previsões de mudanças futuras através de modelo espacial de simulação. 2012. Dissertação (Pós-Graduação - Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.].
- Paula, R.S.; Mesquita, D.C.; Dantas, J.C.M.; Guerra, K.J. (2018). Caracterização hidroquímica e isotópica das águas, na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero no município de Congonhas-MG, e sua correlação com a localização em cota das unidades aquíferas deste sistema. Águas Subterrâneas, v.32, n.1, p. 140-153.
- Pereira, D. L.; Galvão, P.; Lucon, T.; Fujaco, M.A. (2019), Adapting the EPIK method to Brazilian Hydrogeological context of the São Miguel watershed to assess karstic aquifer vulnerability to contamination. Journal of South American Earth Sciences). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.12.011>.
- Ravbar, N. & Goldscheider, N. (2007), Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. Acta Carsologica 36/3, 397-411, Postojna 2007.
- Romeiro, C. I. R. A. (2012), Tecnologia SIG aplicada ao estudo da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas na bacia hidrográfica das Ribeiras do Oeste. Dissertação (Mestrado em Ciência e Sistema de Informações Geográficas) - Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação da Universidade Nova de Lisboa.
- Roncato, J., Martins, M. M., & Silva, M. M. L. (2023). Remote sensing applied to geological, structural, and mass movements characterization in the connection between Curral Homocline and Moeda Syncline, Quadrilátero Ferrífero Region, Brazil. Brazilian Journal of Geology, 53(1).
- Roncato, J.; Almeida, A.L.C.; Macedo, B.; Oliveira, O. (2020), Análise geofísica da região do Rio Conceição, Quadrilátero Ferrífero, associados a dados de campo, petrográficos e de imagens aéreas. Geociências, v. 39, n. 1, p. 47-63.
- Sampaio, N.A.S.; Assumpção A.R.P.; Fonseca, B.B. (2018). Estatística descritiva. Editora Poisson. Belo Horizonte – MG, 70p.
- Santos, H.G.; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H.C.; Oliveira, V. A.; Lumberras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A.; Filho, J. C. A.; Oliveira, J. B.; Cunha, T. J. F. (2018), Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5.ed, Brasília, DF: Eembrapa.
- Santos, L.R.P. (2019), Avaliação da vulnerabilidade a contaminação das águas subterrâneas do município de Jacobina-BA. Monografia (Graduação em Geologia) - Universidade Federal da Bahia, Salvador - BA.
- Silva, T. G. A. (2022), Análise Da Aplicação De Métodos Europeus De Vulnerabilidade

Intrínseca Ao Carste Tropical Da Região Da Apa Carste De Lagoa Santa. Dissertação (Pós-Graduação - Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.].

- Sousa, A. R. C.; Barbosa, D. L.; Albuquerque, J. P. T.; Medeiros, C. M.; Ribeiro, M. A. F. M. (2011), Aplicação do método GLA para estimativa de vulnerabilidade do aquífero Barreiras. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió – AL.
- Stempvoort, D. V.; Ewert, L. & Wassenaar, L. (1993), Aquifer vulnerability index: A GIS - Compatible method for groundwater vulnerability mapping, Canadian Water Resources Journal, 18:1, 25-37. DOI: 10.4296/ cwrj1801025
- Vías, J. M.; Andreo, B.; Perles, M. J.; Carrasco, F.; Vadillo, I.; Jimenez, P. (2006), Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. Hydrogeology Journal 14: p. 912–925
- Vrouhakis, I.; Tziritis, E.; Stamatis, G.; Panagopoulos, A. (2022), Groundwater Vulnerability Analysis of Tirnavos Basin, Central Greece: An Application of RIVA Method. Water, 14, 534.[https://doi.org/ 10.3390/w14040534](https://doi.org/10.3390/w14040534)

3 ARTIGO II – GEOGRIC: MÉTODO PARA AVALIAR A VULNERABILIDADE INTRÍNSECA DE AQUÍFEROS EM REGIÕES TROPICIAS – BRASIL

Resumo

A avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos representa um passo crucial para a gestão sustentável da água subterrânea, a partir dos métodos de vulnerabilidade intrínseca é possível identificar áreas mais suscetíveis à contaminação, orientar políticas de proteção, manejo sustentável e mitigação de impactos ambientais, garantindo a disponibilidade de água potável para futuras gerações em um cenário de crescente pressão de uso e mudanças climáticas. Este trabalho visa desenvolver um método para avaliar a vulnerabilidade intrínseca à contaminação, aplicável em múltiplos aquíferos em escala regional, no Brasil. Esse método pretende preencher uma lacuna existente, uma vez que a maioria dos métodos disponíveis não foram elaborados para aplicação em regiões de climas tropicais, resultando em avaliações que não representam fielmente as condições reais de vulnerabilidade. A área de estudo está situada na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero, uma região de grande importância econômica devido à presença de minas de ouro e ferro, e também hidrogeológica, com mananciais significativos que contribuem com uma parte substancial da água consumida pela população da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Conforme os estudos de Zupo *et al.* (2024), a aplicação dos métodos SINTACS, EPIK, GOD e DRASTIC no Sinclinal Moeda permitiu identificar os principais parâmetros para compor o método, a saber: recarga, meio aquífero, condutividade hidráulica, epicarste e grau de confinamento. Além disso, os parâmetros nível d'água e topografia foram substituídos por isópacas de nível d'água e uso e ocupação do solo, respectivamente. Assim como, foi adicionada a densidade de lineamentos para complementar o parâmetro epicarste. Para uma melhor definição dos pesos atribuídos a cada parâmetro na equação, foi realizada uma análise de componentes principais, que resultou na condutividade hidráulica e geologia como os parâmetros mais importantes, seguida pela isópacas, epicarste, confinamento, recarga e uso e ocupação do solo, nessa ordem. O método GEOGRIC demonstrou eficácia ao ser aplicado no Sinclinal Moeda, identificando os aquíferos mais suscetíveis à contaminação, destacando que os aquíferos das coberturas, Cauê e Gandarela são os mais vulneráveis.

Palavras-chave: Quadrilátero Ferrífero; estatística multivariada; hidrogeologia.

Abstract

The assessment of vulnerability to aquifer contamination is a crucial step for the sustainable management of groundwater. By utilizing intrinsic vulnerability methods, it is possible to identify areas more susceptible to contamination, guiding protection policies, sustainable management, and environmental impact mitigation, thereby ensuring the availability of potable water for future generations in a context of increasing usage pressure and climate change. This work aims to develop a method to evaluate intrinsic vulnerability to contamination, applicable to multiple aquifers at a regional scale in Brazil. This method seeks to fill an existing gap, as most available methods were not designed for application in tropical climate regions, resulting in assessments that do not accurately reflect the actual conditions of vulnerability. The study area is located in the western portion of the Quadrilátero Ferrífero, a region of significant economic importance due to the presence of gold and iron mines, as well as hydrogeological relevance, with substantial springs contributing significantly to the water consumed by the population of the Metropolitan Region of Belo Horizonte. According to the studies by Zupo et al. (2024), the application of the SINTACS, EPIK, GOD, and DRASTIC methods in the Sinclinal Moeda allowed for the identification of key parameters to compose the method, namely: recharge, aquifer medium, hydraulic conductivity, epikarst, and confinement degree. Additionally, the parameters of water level and topography were replaced by water level isopachs and land use, respectively. Furthermore, lineament density was added to complement the epikarst parameter. To better define the weights assigned to each parameter in the equation, a principal component analysis was conducted, resulting in hydraulic conductivity and geology as the most important parameters, followed by isopachs, epikarst, confinement, recharge, and land use, in that order. The GEOGRIC method demonstrated efficacy when applied in the Sinclinal Moeda, identifying the aquifers most susceptible to contamination, highlighting that the cover, Cauê, and Gandarela aquifers are the most vulnerable.

Keywords: Quadrilátero Ferrífero; multivariate statistics; hydrogeology.

3.1 Introdução

A crescente preocupação da sociedade com a degradação dos recursos hídricos subterrâneos tem se intensificado. Consequentemente, o uso e desenvolvimento de técnicas de mapeamento de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos têm ganhado popularidade, servindo como uma ferramenta crucial para sua proteção (Hirata, 2001).

O princípio fundamental dessa abordagem reside na divisão das áreas em categorias, às quais são atribuídas classificações de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas, variando de baixa a alta, com base em parâmetros hidrogeológicos (Stempvoort, Ewert & Wassenaar, 1992).

A vulnerabilidade das águas subterrâneas está relacionada a diversos fatores que comprometem a qualidade e aumentam o risco de contaminação (Bós & Thomé, 2012). O conceito de vulnerabilidade é utilizado para expressar as características intrínsecas que determinam a sensibilidade de um aquífero a ser adversamente afetado por cargas contaminantes antrópica (Hirata, 2001).

De acordo com Daly *et al.* (2002), a vulnerabilidade das águas subterrâneas pode ser classificada em duas categorias principais: vulnerabilidade intrínseca e vulnerabilidade específica. A vulnerabilidade intrínseca refere-se à suscetibilidade das águas subterrâneas à contaminação proveniente de atividades humanas, considerando as características hidrogeológicas da área, mas sem levar em conta a natureza do contaminante. Por outro lado, a vulnerabilidade específica incorpora as propriedades físico-químicas dos contaminantes, assim como suas interações com as características do sistema hidrogeológico.

A avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos constitui um dos aspectos mais importantes para subsidiar o planejamento do uso do solo e para gerenciar a instalação e o funcionamento de empreendimentos potencialmente impactantes aos recursos hídricos subterrâneos (Santos, Cruz & Nascimento, 2010). Assim, para garantir o uso sustentável da água os órgãos ambientais devem propor estudos de vulnerabilidade de aquífero para complementar o plano de gestão de recursos hídricos. Esses estudos auxiliam na tomada de decisões, como onde instalar um poço, o zoneamento de usos e ocupação do solo, e a instalação de uma rede de monitoramento de qualidade das águas subterrâneas (Guiguer & Kohnke, 2002).

O desenvolvimento de um método de vulnerabilidade visa suprir uma lacuna existente, uma vez que a maioria dos métodos disponíveis não foram elaborados especificamente para aplicação no Brasil. Dessa forma, os resultados obtidos por meio dos métodos tradicionais não consideram adequadamente todos os parâmetros relevantes para clima tropicais.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um método para avaliar a vulnerabilidade intrínseca à contaminação, aplicável em áreas com múltiplos aquíferos em escala regional, levando em consideração a aplicação e adaptação, dos métodos SINTACS (Civita & De Maio, 2000), EPIK (Doerfliger, Jeannin & Zwahlen, 1998), GOD (Foster & Hirata, 1988) e DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) conforme desenvolvido por Zupo *et al.* (2024). As variáveis selecionadas para o método foram escolhidas visando auxiliar nas futuras pesquisas, levando em conta sua disponibilidade e obtenção simplificada. Além disso, este trabalho visa analisar as regiões onde predominam os maiores graus de vulnerabilidade associados ao mapa de uso e ocupação do terreno. O método proposto será aplicado no Sinclinal Moeda, região do Quadrilátero Ferrífero (QF), uma das maiores reservas mundiais de minério de ferro de alto teor, que também abriga outros importantes depósitos minerais (Alkmim, 2020).

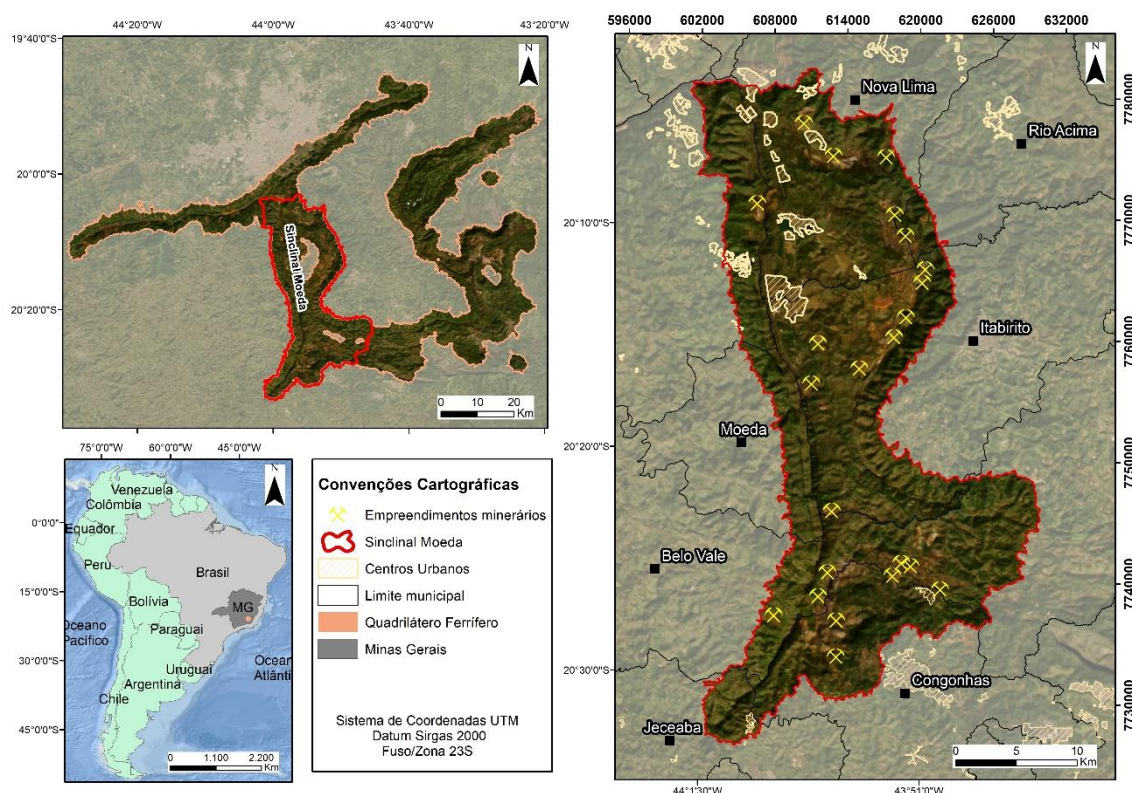
A região possui significativas reservas de águas subterrâneas, destacando-se o Aquífero Cauê, o principal reservatório de água subterrânea no QF, caracterizado por sua elevada capacidade de armazenamento (Silva, Neto e Bertachini, 1994). Este aquífero desempenha um papel crucial no abastecimento hídrico da Região Metropolitana de Belo Horizonte, a terceira maior aglomeração urbana do Brasil, que ocupa parte do Quadrilátero Ferrífero (Magalhães *et al.*, 2022).

A área de estudo está situada na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero, denominada Sinclinal Moeda. As águas subterrâneas dessa região são significativamente impactadas pelo rebaixamento realizado em função dos empreendimentos minerários que exploram o minério de ferro da região (Paula *et al.*, 2018). Ademais, a expansão urbana representa uma das principais ameaças à conservação dos recursos hídricos subterrâneos no Sinclinal Moeda, especialmente em virtude do aumento considerável de empreendimentos residenciais fechados, como condomínios (Formoso, 2014).

3.2 Localização

A área de estudo está situada na porção central do estado de Minas Gerais, Brasil, sendo caracterizada pelo contexto geológico da mais importante província mineral do sudeste brasileiro, o Quadrilátero Ferrífero. O Sinclinal Moeda, localizado no limite oeste do Quadrilátero Ferrífero, é conhecido por seu conjunto de terras altas ao sul de Belo Horizonte e destaca-se no cenário geológico mundial por suas diversas reservas minerais. Possui cerca de 470 km² e os municípios que integram o Sinclinal Moeda incluem Belo Horizonte, Belo Vale, Brumadinho, Congonhas, Ibirité, Itabirito, Moeda, Nova Lima, Ouro Preto e Rio Acima (Figura 1).

Figura 14 – Mapa de localização do Quadrilátero Ferrífero, com destaque para a megaestrutura do Sinclinal Moeda.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

3.3 Contexto Geológico

Geologicamente, a região do Quadrilátero Ferrífero está inserida no extremo sul do Cráton do São Francisco (Almeida, 1976). A área de estudo, Sinclinal Moeda, engloba três unidades principais: os complexos granito gnáissico arqueano, uma sequência vulcanossedimentares também do arqueano, incluindo o *greenstone belt* do Supergrupo Rio das Velhas, e sequências metassedimentares supracrustais de idade Paleoproterozóica do Supergrupo Minas (Baltazar & Zucchetti, 2007).

O Supergrupo Rio das Velhas, organizado em três grupos principais (Quebra Osso, Nova Lima e Maquiné), abrange rochas metavulcânicas, máfica-ultramáficas e félsicas do Grupo Quebra Osso, além de xistos, xistos cloríticos e filitos do Grupo Nova Lima (Endo *et al.*, 2020). O Supergrupo Minas, por sua vez, inclui os Grupos Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba (Dorr, 1969). Destaca-se a Formação Cauê como a unidade mais importante do QF, abrigando minério de ferro rico em hematita, com depósitos que produzem mais de 180Mt por ano (Rosière *et al.*, 2008). Já o Supergrupo Estrada Real é composto pelos Grupos Barbacena, Sabará e Itacolomi, com predomínio das rochas da Formação Saramenha no Sinclinal Moeda (Endo *et al.*, 2020).

O Sinclinal Moeda é reconhecido por sua complexidade estrutural, sendo alvo de

diversas investigações geológicas. Silva (1999) propõem três principais eventos tectônicos para explicar sua estruturação. O primeiro evento é distensivo e envolve a formação de uma calha sob condições dúcteis a dúcteis-rúpteis, resultando na formação da megaestrutura, através da acomodação das rochas supracrustais sobre um sistema de falhas extensionais. O segundo evento, de natureza compressiva, resultou na formação de dobras com vergência direcionada para norte. O terceiro evento, também compressivo, está associado à inversão brasileira, sendo responsável pelas principais estruturas da região.

O Sinclinal Moeda estende-se por aproximadamente 40 km e apresenta um flanco normal de direção N-S, oeste, e um flanco inverso de direção NW-SE, a leste, na porção norte (Silva & Gomes, 2001). No flanco oeste, o acamamento é paralelo ao desenvolvimento de uma xistosidade S1, enquanto no flanco leste, o acamamento sedimentar apresenta ângulo entre 50° e 80° nas direções NE, E e SE, caracterizando um flanco inverso. Em ambos os flancos, são observados traços de falhas direcionais (Braga, 2006).

3.4 Contexto Hidrogeológico

Diversas classificações das unidades aquíferas no Sinclinal Moeda já foram elaboradas, destacando-se os trabalhos de Beato, Monsore & Bertachini (2006), Mourão (2007), Magalhães *et al.* (2022) e Andrade (2022). Com base nas definições propostas por esses autores, Zupo *et al.* (2024), definiram que o sistema aquífero do Sinclinal Moeda é dividido em seis unidades aquíferas e quatro unidades não aquíferas. As unidades não aquíferas incluem o Aquitardo Complexos TTG, Aquitardo Rio das Velhas, Aquitardo Batatal e Aquitardo Suítes Intrusivas. As unidades aquíferas são representadas pelo Aquífero Moeda, Aquífero Cauê, Aquífero Gandarela, Aquífero Piracicaba, Aquífero Estrada Real e Aquífero Depósitos Sedimentares (Tabela 1).

Tabela 1 – Descrição das unidades hidrogeológicas presentes no Sinclinal Moeda.

Unidade Hidrogeológica	Litologia Predominante	Recarga	Condutividade Hidráulica
Aquitardo complexos TTG: Fissurais, descontínuos, anisotrópicos, heterogêneos, livres a semiconfinados	Gnaisse	290,3 mm/ano (Freitas & Bacellar, 2010)	$2,64 \times 10^{-6}$ m/s (Freitas & Bacellar, 2010)
Aquitardo Supergrupo Rio das Velhas: Fissurais, descontínuos, anisotrópicos, heterogêneos e livres a confinados	Xistos e filitos	412,9 mm/ano (Freitas & Bacellar, 2010)	$1,63 \times 10^{-6}$ m/s (Freitas & Bacellar, 2010)
Aquífero Moeda: Fissurais, livres a confinados	Quartzitos	323,48 mm/ano (Magalhães <i>et al.</i> , 2022)	$1,93 \times 10^{-6}$ a $4,73 \times 10^{-6}$ m/s (Magalhães <i>et al.</i> , 2022)
Aquitardo Batatal: Fissurais, desempenham papel importante ao confinar outras unidades	Filitos	64,70 mm/ano (Magalhães <i>et al.</i> , 2022)	$5,2 \times 10^{-8}$ a $7,73 \times 10^{-8}$ m/s (Magalhães <i>et al.</i> , 2022)
Aquífero Cauê: Misto (Granular e fissural), heterogêneo e anisotrópico	Itabirito	452,87 a 485,22 mm/ano (Magalhães <i>et al.</i> , 2022)	$1,5 \times 10^{-5}$ a $8,33 \times 10^{-6}$ m/s (Magalhães <i>et al.</i> , 2022)
Aquífero Gandarela: Cársticos e livres a confinados	Dolomitos	258,79 a 323,48 mm/ano (Magalhães <i>et al.</i> , 2022)	$1,2 \times 10^{-6}$ a $7,67 \times 10^{-6}$ m/s (Magalhães <i>et al.</i> , 2022)
Aquífero Piracicaba: Fissurais e livres a confinados	Quartzitos e filitos	204,88 mm/ano (Andrade, 2022)	$5,05 \times 10^{-6}$ a $5,05 \times 10^{-9}$ m/s (CBH Rio das Velhas, 2013)
Aquífero Estrada Real: Fissurais e livres a confinados	Xistos e quartzitos	263,4 a 220,64 mm/ano (Andrade, 2022)	$5,05 \times 10^{-6}$ m/s (CBH Rio das Velhas, 2013)
Aquitardo suítes intrusivas: Fissurais e livres a confinados	Gnaisse	-	-
Aquífero depósitos sedimentares: Poroso, livres, descontínuos, heterogêneos e anisotrópicos	Depósitos aluviais e lateríticos	485,22 mm/ano (Magalhães <i>et al.</i> , 2022)	$2,52 \times 10^{-4}$ m/s (CBH Rio das Velhas, 2013)

Fonte: Elaborada pela autora baseado em Zupo *et al.* (2024).

Na porção ocidental do Sinclinal Moeda há um padrão bem definido quanto à profundidade do nível d'água. A maior profundidade em relação à superfície é encontrada no Aquífero Cauê, com a redução progressiva nas unidades adjacentes, sendo o nível mais raso no Aquífero Piracicaba (Magalhães *et al.*, 2022).

A água subterrânea tende a seguir estruturas geológicas como falhas, fraturas e contatos litológicos que direcionam o fluxo de água (Dantas *et al.*, 2017). Segundo Mourão (2007) o fluxo de água subterrânea no Quadrilátero Ferrífero, geralmente ocorre através do Aquífero Cauê, ao longo da direção do bandamento composicional. No entanto, fluxos transversais também ocorrem devido à presença de clivagens e fraturas.

3.5 Materiais e Métodos

3.5.1 Seleção dos Parâmetros

A seleção dos parâmetros para o método foi baseada na análise dos mapas de

vulnerabilidade elaborados por Zupo *et al.* (2024), que aplicaram os métodos SINTACS, EPIK, GOD e DRASTIC no Sinclinal Moeda. O método SINTACS (Civita & De Maio, 2000) utiliza sete parâmetros: Profundidade do aquífero (S), Infiltração (I), Zona não saturada (N), Tipo de cobertura (T), Aquífero (A), Condutividade Hidráulica (C) e Superfície topográfica (S). O método EPIK (Doerfliger, Jeannin & Zwahlen, 1998) inclui quatro parâmetros: Epicarste (E), Camada de Proteção (P), Condição de Infiltração (I) e Sistema Cárstico (K). O método GOD (Foster & Hirata, 1988) abrange três parâmetros: Grau de confinamento (G), Litologia da zona vadosa (O), Profundidade do nível d'água (D). Por fim, o método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) considera sete parâmetros: Nível d'água (D), Recarga (R), Meio aquífero (A), Solos (S), Topografia (T), Zona vadosa (I) e Condutividade hidráulica (C).

A análise desses métodos permitiu identificar os parâmetros mais significativos de cada abordagem. No método DRASTIC, destacam-se os parâmetros recarga, meio aquífero e condutividade hidráulica. No método SINTACS, os parâmetros mais importantes foram a infiltração, aquífero e condutividade hidráulica. No método EPIK, o epicarste foi considerado como um parâmetro crucial, enquanto no método GOD, o grau de confinamento e a litologia da zona vadosa foram apontados como os mais relevantes.

É importante observar que os parâmetros mais significativos nos métodos DRASTIC e SINTACS são semelhantes, já que ambos consideram os mesmos critérios, diferenciando-se apenas a nomenclatura. Assim, os parâmetros selecionados no método final consistem em recarga e meio aquífero do DRASTIC, condutividade hidráulica do SINTACS, epicarste do EPIK e grau de confinamento GOD. O parâmetro referente à litologia da zona vadosa não foi incluído na seleção, uma vez que este aspecto já é contemplado pelo parâmetro meio aquífero.

O método é uma derivação do método DRASTIC, originalmente desenvolvido para aplicação em diversos tipos de aquíferos. A equação proposta mantém a estrutura básica da equação do método DRASTIC, incorporando um total de sete parâmetros. Assim, os parâmetros selecionados incluem recarga, meio aquífero (geologia), epicarste, grau de confinamento e condutividade hidráulica.

Para atender à exigência de sete parâmetros proposta pelo método DRASTIC, foram substituídos dois parâmetros, por outros mais adequados as características locais e de fácil obtenção, que não haviam sido considerados em métodos anteriores: isópacas de nível d'água e uso e ocupação do solo. Além disso, houve um aperfeiçoamento do parâmetro epicarste, com a inclusão da densidade de lineamentos.

Adicionalmente, as avaliações atribuídas a cada parâmetro foram ajustadas para seis classes, com exceção do grau de confinamento, que foi dividido em quatro classes devido à sua

classificação limitada. Essa nova divisão foi estabelecida para evitar a predominância de uma única variação paramétrica, com os valores atribuídos de forma escalonada seguindo a lógica do mais restritivo, com as categorias 10, 8, 6, 4, 2 e 1.

A distribuição dos parâmetros isópacas de nível d'água, recarga e epicarste segue a distribuição por frequências. A condutividade hidráulica manteve a sequência de classificação utilizada no método SINTACS. Já os parâmetros não numéricos, como geologia e grau de confinamento, foram classificados conforme as adaptações elaboradas por Zupo *et al.* (2024) nos métodos DRASTIC e GOD, respectivamente.

3.5.2 Definição dos Pesos da Equação

A definição dos pesos dos parâmetros no método foi baseada na estatística multivariada de análise de componentes principais (PCA), com o objetivo de determinar qual parâmetro é o mais influente na análise de vulnerabilidade. De acordo com o método DRASTIC, desenvolvido por Aller *et al.* (1987), os pesos dos parâmetros variam de 1 a 5, sendo 5 o valor atribuído ao parâmetro mais significativo. A análise de componentes principais foi realizada utilizando o *software* Minitab.

A PCA é uma técnica matemática usada para analisar grandes conjuntos de dados (Vicini, 2005), transformando um conjunto de variáveis originais em um novo conjunto de variáveis de mesma dimensão, conhecidas componentes principais (Hongyu, Sandanielo & Junior, 2015). O principal objetivo da PCA é simplificar estruturas complexas em uma nova estrutura de variáveis não correlacionadas, com variâncias ordenadas, permitindo a comparação dos indivíduos utilizando apenas as variáveis de maior variância (Varella, 2008).

Cada componente principal é uma combinação linear de todas as variáveis originais, sendo independentes entre si e estimadas com o propósito de reter a maior quantidade de informações possíveis, em termos da variação total contida nos dados iniciais (Regazzi, 2001). Para determinar essas componentes, é necessário calcular a matriz de variância-covariância ou a matriz de correlação, encontrar os autovalores e os autovetores e, finalmente, escrever as combinações lineares, que definem as novas variáveis (Vicini, 2005).

Além disso, a PCA permite identificar as variáveis de maior influência na formação de cada componente, facilitando o agrupamento de indivíduos similares através de exames visuais em dispersões gráficas, que possuem fácil interpretação geométrica (Vicini, 2005).

A importância de um componente principal é avaliada com base na sua contribuição para explicar a variância total. A soma dos primeiros autovalores indica quantos componentes devem ser utilizados na análise para diferenciar os indivíduos (Varella, 2008). Segundo Regazzi

(2000), em aplicações em diversas áreas do conhecimento, o número de componentes selecionadas geralmente é aquele que acumula 70% ou mais de proporção da variância total.

3.5.3 Banco de Dados

Para a interpretação do método proposto, foi elaborado um banco de dados no formato *raster* para cada um dos parâmetros utilizados (Tabela 2). A fim de mapear a vulnerabilidade do aquífero, foram realizadas operações matemáticas em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Isso foi alcançado através da sobreposição dos mapas gerados em cada parâmetro, utilizando técnicas de álgebra de mapas disponíveis no software ArcGIS 10.8.2, por meio da ferramenta denominada *raster calculator*. Como resultado, foi gerada uma imagem integrada no formato *raster*, na qual foi atribuído, para cada pixel, o valor resultante da equação aplicada.

Tabela 2 – Fonte de dados dos parâmetros aplicados no método proposto.

Parâmetros	Metodologia ou Técnica Aplicada	Fonte de dados
Isópacas de nível d'água	Mapa potenciométrico e Modelo digital de elevação	IGAM, SIAM, SIAGAS, IDE Sisema e Alos Palsar (2016)
Recarga	Bibliografia	Freitas & Bacellar (2010), CBH rio das Velhas (2013), Andrade (2022) e Magalhães <i>et al.</i> (2022)
Geologia	Mapa geológico	Endo <i>et al.</i> (2019)
Epicarste + lineamentos	Mapa geológico, shapefile de cavidades e Modelo digital de elevação	Endo <i>et al.</i> (2019), CEVAC e ALOS (2016)
Uso e ocupação do solo	Imagem de satélite do Landsat 8	INPE (2021)
Grau de Confinamento	Mapa potenciométrico e geológico	IGAM, SIAM, SIAGAS, IDE Sisema e Endo <i>et al.</i> (2019)
Condutividade Hidráulica	Bibliografia	Freitas & Bacellar (2010), CBH rio das Velhas (2013) e Magalhães <i>et al.</i> (2022)

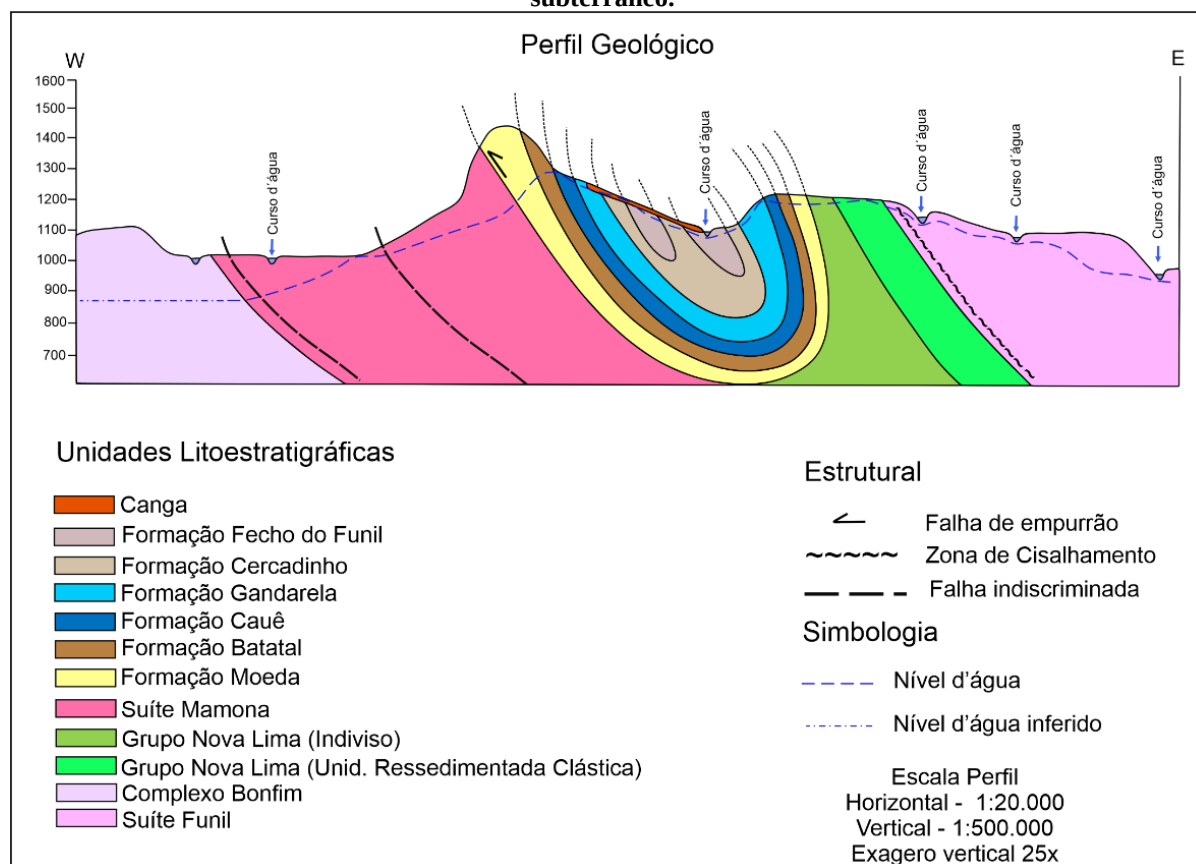
Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Para avaliar o parâmetro da isópacas de nível d'água, foram desenvolvidos 30 perfis hidrogeológicos abrangendo a área de estudo (Figura 2), com base no mapa geológico do QF desenvolvido por Endo *et al.* (2019) e utilizando dados de profundidade do nível estático obtidos de poços, piezômetros, INAs e nascentes, do banco de dados do Sistema de Informações de Água subterrânea (SIAGAS), Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), Sistema Integrado de Informações Ambientais (SIAM) e do IDE Sisema, o que resultou em um mapa potenciométrico.. As isópacas foram mensuradas ao longo dos perfis hidrogeológicos, e um

mapa foi elaborado utilizando técnicas de interpolação para representar essas medidas.

A técnica de interpolação, utilizando a ferramenta “*Topo to Raster*” disponível no ArcGIS 10.8 possibilitou a extrapolação de valores para áreas com informações dispersas, gerando assim o mapa de isópacas de nível d’água. A interpolação empregada, permite a incorporação de outros dados, como curvas de níveis, cursos de rios e delimitações de bacias, minimizando possíveis erros associados ao método. O objetivo dessa interpolação é converter dados vetoriais em modelos hidrogeológicos de elevação de terreno (Nogueira & Amaral, 2009).

Figura 15– Um dos trinta perfis elaborados para a área de estudo, onde a linha azul representa o nível de água subterrâneo.



Fonte: Elaborada pela autora baseado em Zupo *et al.* (2024a).

A obtenção dos parâmetros Recarga e Condutividade Hidráulica baseou-se em consultas às fontes bibliográficas disponíveis sobre a área de estudo, tais como os estudos de Freitas & Bacellar (2013), CBH rio das Velhas (2013), Beato, Monsorens & Bertachini (2006), Paula (2017), Andrade (2022) e Magalhães *et al.* (2022).

O parâmetro Geologia foi classificado com base em dados secundários, subsidiados por trabalhos de mapeamentos geológicos realizados pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), durante a elaboração do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero (QF), conforme apresentado por Endo *et al.* (2019).

O parâmetro Epicarste foi desenvolvido com base no mapa geológico do QF para identificar a litologia predominante dos afloramentos rochosos e nos dados de cavidades, obtidos através da plataforma IDE Sisema, com informações do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), totalizando 352 cavidades.

Para classificar a densidade de lineamentos, foi inicialmente empregado o modelo digital de elevação (MDE), derivado da imagem capturada pelo sensor Alos Palsar (2016), com resolução espacial de 12,5 metros para gerar um relevo sombreado utilizando a ferramenta “hillshade” no *software* ArcGIS 10.8, com iluminação configurada para azimutes 315° e 45°. Os lineamentos foram extraídos de forma automática utilizando o *software* Catalyst. A extração de lineamentos foi feita através dos valores dos parâmetros de entradas baseado no trabalho de Conceição & Silva (2013). O mapa de densidade de lineamentos foi então criado através da ferramenta “Line Density” também disponível no ArcGIS 10.8.

Conforme descrito por Oliveira *et al.* (2009), esta ferramenta calcula a densidade de cada feição linear nas proximidades de cada célula (pixel) do *raster* de saída. A densidade é expressa em unidades de comprimento por unidade de área (km/km²).

O parâmetro de uso e ocupação do solo foi desenvolvido com base em imagens do satélite Landsat-8 de 2021, com uma resolução de 30 metros, obtidas através do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A junção das bandas da imagem de satélite e a classificação de uso e ocupação do solo foram realizadas utilizando o *software* ArcGIS 10.8. Para a classificação da área, foram empregadas composição verdadeiras de cor, incluindo 4(R), 3(G), 2(B), e de falsa cor, com arranjo de bandas 7(R), 5(G), 6(B) e 4(R), 5(G), 3(B). A área de estudo foi categorizada em cinco classes temáticas: área degradada, centros urbanos, massa d’água, vegetação rasteira e vegetação densa. Essa categorização foi realizada com base nas características físicas da região e fundamentada no mapa de cobertura e uso da terra de Minas Gerais, elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2020.

Posteriormente, a imagem foi classificada utilizando o método de classificação supervisionada por máxima verossimilhança. Neste processo, pequenas áreas de amostras foram selecionadas na imagem. O método de máxima verossimilhança destaca-se como um classificador eficaz, pois utiliza as classes de treinamento para estimar a distribuição dos pixels em cada classe no espaço de n bandas, além de determinar a localização do centro de cada classe (Meneses & Almeida, 2012).

Para avaliar o parâmetro grau de confinamento, foram desenvolvidos 30 perfis geológicos abrangendo a área de estudo, com base no mapa geológico do QF elaborado por Endo *et al.* (2019) e utilizando dados de profundidade do nível da água.

Os perfis hidrogeológicos possibilitaram a classificação do grau de confinamento, mediante uma análise minuciosa das características litológicas. Utilizando a adaptação do método GOD proposta por Zupo *et al.* (2024), os aquíferos foram classificados em aquíferos de cobertura, livres, influência de confinamento e confinados.

Os aquíferos livres e de cobertura são aqueles cujo limite superior é representado pela superfície freática. Para diferenciá-los, os aquíferos de cobertura compreendem às coberturas sedimentares, enquanto os demais, onde todos os pontos estão à pressão atmosférica, foram designados como aquíferos livres.

Os aquíferos confinados são aqueles delimitados por camadas de rocha impermeáveis ou semipermeáveis sob pressão confinante. Devido às incertezas na análise do contato entre um aquífero livre e confinado, considerou-se que os aquíferos com influência de confinamento correspondem a um *buffer* de 20% dos aquíferos confinados.

3.6 Resultados e Discussões

3.6.1 Formulação dos Parâmetros

O método denominado GEOGRIC, uma derivação do método DRASTIC, é um acrônimo para geologia (G), epicarste (E), uso e ocupação do solo (O), grau de confinamento (G), recarga (R), isópacas (I) e condutividade hidráulica (C). É um método desenvolvido para avaliar a vulnerabilidade intrínseca de múltiplos aquíferos. Baseia-se na atribuição de índices que variam entre 10, 8, 6, 4, 2 e 1, conforme as características e o comportamento dos parâmetros.

O parâmetro geologia caracteriza o aquífero com base nas suas características litológicas. As rochas cristalinas geralmente oferecem menor vulnerabilidade à infiltração de contaminantes, enquanto as rochas cristalinas fraturadas e carbonáticas são mais suscetíveis à contaminação. Esse parâmetro pode ser determinado a partir de mapas geológicos ou perfis de poços tubulares, com os valores paramétricos definidos na Tabela 3.

Tabela 9 – Variação e avaliação do parâmetro geologia.

Tabela 3 - Variação e Avaliação dos parâmetros geologia.			
Parâmetros		Variação dos parâmetros	Avaliação
Geologia	Coberturas sedimentares	Depósitos aluviais, canga, solos com fragmentos de rochas	10
	Rochas carbonáticas	Dolomitos e calcários	8
		Formações Ferríferas	6
	Rochas cristalinas fraturadas	Quartzitos, quartzitos ferruginosos e metarenitos	4
		Filitos, filitos carbonosos, filitos terrígenos, xistos e serpentinitos	2
	Rochas cristalinas	Gnaisses, Granitos, metatonalitos e metadiabásios	1

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

O parâmetro epicarste (Tabela 4) representa o sistema cárstico, que inclui cavidades, sumidouros, dolinas e afloramentos cársticos. Este sistema é definido pelo conjunto de estruturas resultantes da dissolução de rochas solúveis, como calcários e dolomitos, o que aumenta a porosidade e da permeabilidade, permitindo o armazenamento e escoamento de grandes quantidades de água subterrânea ou contaminantes. Quanto mais intensa a carstificação, mais acessível se torna o aquífero.

Na ausência dessa morfologia, considera-se a densidade de lineamentos em km^2 , sendo que quanto maior a quantidade de lineamentos, maior a vulnerabilidade. A relação desse parâmetro é inversa com o fator de proteção e direta com a vulnerabilidade. É um parâmetro definido pela quantidade total de lineamentos que representam estruturas abertas, por unidades de área, expressa em km/km^2 .

Tabela 10 – Variação e avaliação do parâmetro epicarste.

Parâmetros	Variação dos parâmetros	Avaliação	
Epicarste	Sistema cárstico	Cavernas, sumidouros e dolinas	10
		Afloramento cárstico	8
	Sistema não cárstico (densidade de lineamentos em km ²)	> 3	6
		3 - 2	4
		2 - 1	2
		< 1	1

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

O parâmetro uso e ocupação do solo é uma variável que reflete os efeitos dos aspectos fisiográficos e das modificações resultantes das atividades humanas. Pode ser determinada a partir de mapas específicos, fotografias aéreas ou imagens de satélite. A relação desse parâmetro com o aquífero varia conforme o tipo de uso do solo: algumas atividades impermeabilizam os

solos, aumentando o escoamento superficial e diminuindo a vulnerabilidade, enquanto outras promovem a infiltração, reduzindo o fator de proteção e aumentam a vulnerabilidade (Tabela 5).

Tabela 11 – Variação e avaliação do parâmetro uso e ocupação do solo.

Parâmetros	Variação dos parâmetros		Avaliação
Uso e ocupação do solo	Áreas antrópicas	Áreas degradadas	10
		Agricultura	8
		Centros urbanos	6
	Áreas naturais	Massa d'água	4
		Vegetação rasteira	2
		Vegetação densa	1

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

O grau de confinamento avalia a capacidade de confinamento hidráulico da água subterrânea pelo solo ou formação rochosa, categorizando-os como aquíferos de cobertura, livres, influência de confinamento e confinados. Aquíferos confinados limitam a infiltração direta de contaminantes, oferecendo maior proteção ao aquífero (Tabela 6).

Tabela 12 – Variação e avaliação do parâmetro grau de confinamento.

Parâmetros	Variação dos parâmetros		Avaliação
Grau de confinamento	Sob pressão atmosférica	Aquífero de cobertura	10
		Livres	8
	Sob pressão confinante	Influência de confinamento	4
		Confinados	1

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A recarga refere-se à reposição sazonal de água no aquífero através da precipitação, infiltração direta ou escoamento superficial/subterrâneo, sendo medida em mm/ano. A água das chuvas não apenas recarrega o aquífero, mas também pode transportar contaminantes para a zona saturada, promovendo a diluição de substâncias solúveis em água (Maia, 2011). Este parâmetro tem uma relação direta com a vulnerabilidade: quanto maior a recarga, maior a vulnerabilidade (Tabela 7).

Tabela 13 – Variação e avaliação do parâmetro recarga.

Parâmetros	Variação dos parâmetros		Avaliação
Recarga (mm/ano)	Alta taxa de recarga	> 350	10
		350 - 280	8
	Média taxa de recarga	280 - 210	6
		210 - 140	4
		140 - 70	2
	Baixa taxa de recarga	< 70	1

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

O parâmetro isópacas de nível d'água é definido pela profundidade, em metros, desde a superfície do solo até o nível d'água subterrâneo. A vulnerabilidade diminui à medida que a espessura aumenta (Tabela 8).

Tabela 14– Variação e avaliação do parâmetro isópacas.

Parâmetros	Variação dos parâmetros		Avaliação
Isópacas (metros)	Nível d'água raso	< 60	10
		60 - 120	8
		120 - 180	6
		180 - 240	4
	Nível d'água profundos	240 - 300	2
		> 300	1

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A condutividade hidráulica refere-se à capacidade dos materiais do aquífero em transmitir água (Aller *et al.*, 1987). Essa propriedade é influenciada pela porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas, além das propriedades do fluido, como viscosidade e densidade (Maia, 2011). A condutividade hidráulica possui uma relação direta com a vulnerabilidade, ou seja, quanto maior a condutividade, maior a probabilidade de contaminação (Tabela 9).

Tabela 15 – Variação e avaliação do parâmetro condutividade hidráulica.

Parâmetros	Variação dos parâmetros		Avaliação
Condutividade hidráulica (m/s)	Aquíferos cársticos	$> 1 \times 10^{-2}$	10
	Aquíferos produtivos	1×10^{-4} a 1×10^{-2}	8
		1×10^{-5} a 1×10^{-4}	6
		1×10^{-6} a 1×10^{-5}	4
	Aquíferos pobres	1×10^{-7} a 1×10^{-6}	2
		$< 1 \times 10^{-7}$	1
	Unidades não aquíferas		

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

3.6.2 Definição dos Pesos

O método determina que, para cada parâmetro, deve-se atribuir um peso ou ponderação de acordo com a sua influência sobre a vulnerabilidade, utilizando índices que variam de 1 a 5, onde o parâmetro mais significativo recebe peso 5. Para identificar o parâmetro mais representativo no método GEOGRIC, foi aplicada a análise de componente principal (PCA). O primeiro passo envolveu identificar a proporção de área, em porcentagem, de cada avaliação proposta para cada parâmetro (Tabela 10).

Tabela 16 – Área em porcentagem de cada avaliação/parâmetro.

Avaliação	Parâmetro						
	Isópacas	Recarga	Geologia	Epicarste	Uso e ocupação	Confiamento	Condutividade
1	0,5	2,0	32,0	1,0	28,9	28,9	22,4
2	2,9	0,0	17,0	19,0	52,8	0,0	0,0
4	7,4	20,4	24,4	57,5	0,4	43,6	52,4
6	16,1	17,4	9,8	13,2	3,5	0,0	14,6
8	28,4	39,8	6,2	6,0	0,0	16,9	10,6
10	44,7	20,4	10,6	3,3	14,4	10,6	0,0

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A partir da tabela de proporção de área, foram gerados os autovalores (Tabela 11) e a matriz de correlação (Tabela 12). Com base nos resultados dos autovalores, foram calculadas as respectivas porcentagens, demonstrando que as duas primeiras componentes, representam mais de 70% da variação do conjunto de dados.

Dessa forma, a análise dos dados foi realizada considerando apenas as duas primeiras componentes principais (CP1 e CP2). Autovalores elevados indicam que a componente principal associada captura uma porção significativa da variância do conjunto de dados original.

Tabela 17 – Autovalores e suas respectivas porcentagens do conjunto de dados de todos os parâmetros.

Número do Componente	Autovalores	%
1	3,3010	47,16
2	2,6362	37,66
3	0,6150	8,79
4	0,2904	4,15
5	0,1573	2,25
6	0	0,00
7	0	0,00

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A partir da matriz de correlação (Tabela 12), foram formadas combinações lineares das variáveis originais utilizando os autovetores como coeficientes. Os autovetores associados à primeira componente principal (CP1) explicam a maior parte da variância total do conjunto de dados.

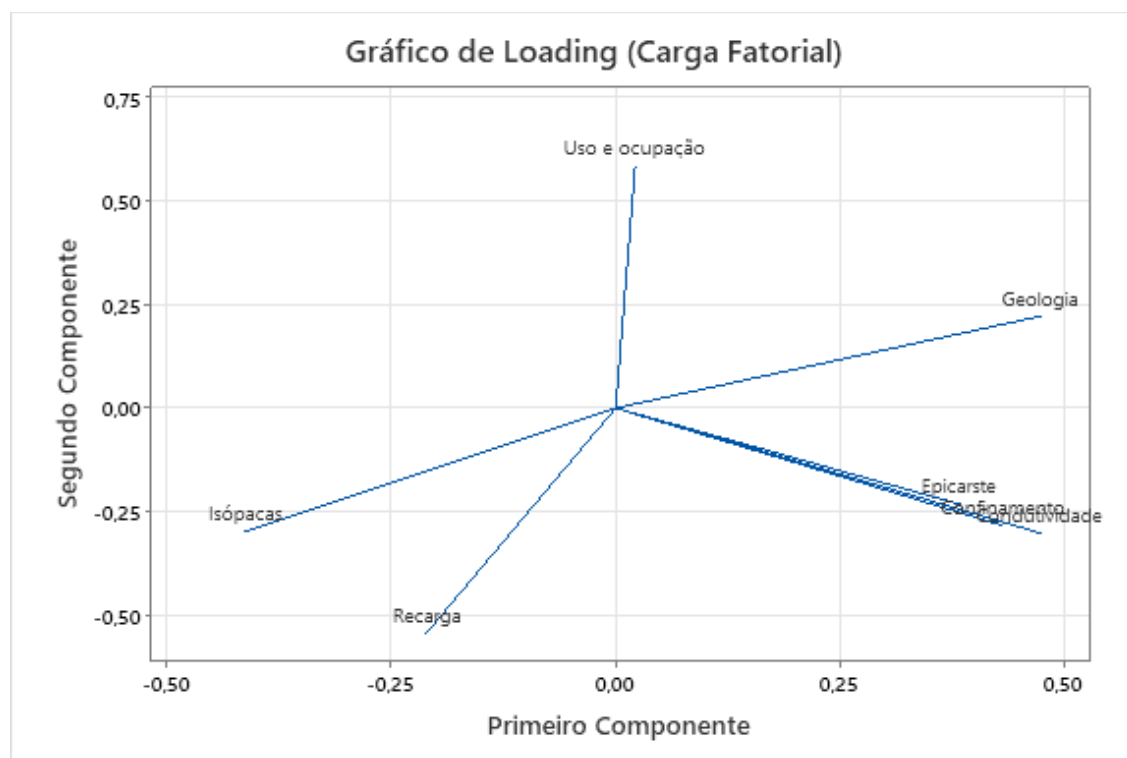
Tabela 18 – Matriz das sete componentes principais.

Parâmetros	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7
Isópocas	-0,413	-0,297	-0,249	-0,72	-0,324	-0,217	0,097
Recarga	-0,212	-0,544	-0,032	0,175	0,630	-0,432	-0,21
Geologia	0,474	0,221	-0,451	-0,081	-0,14	-0,452	-0,542
Epicarste	0,385	-0,232	0,717	-0,426	-0,001	0,033	-0,319
Uso e ocupação	0,022	0,584	0,103	-0,399	0,54	-0,291	0,335
Confinamento	0,432	-0,284	-0,455	-0,284	0,371	0,538	0,139
Condutividade	0,475	-0,302	0,047	0,154	-0,223	-0,433	0,648

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Os autovetores determinam a direção dos componentes principais. Com base nos resultados, foi elaborado um gráfico considerando os autovetores das componentes principais CP1 e CP2 (Figura 3).

Figura 16 – Gráfico de loading com os sete parâmetros aplicados no método proposto.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

A análise da relevância dos parâmetros foi conduzida segundo três critérios; avaliação por quadrantes, avaliação por agrupamento e avaliação do autovetor da primeira componente principal. No primeiro critério, a avaliação por quadrantes considerou a dispersão dos valores modais da CP1 entre os quadrantes cartesianos. Quanto maior a dispersão entre os quadrantes, maior aderência do método a múltiplos parâmetros, uma vez que a concentração dos parâmetros em um único quadrante resultaria em pesos relativamente iguais, diminuindo a eficiência do método. O primeiro quadrante inclui os parâmetros de uso e ocupação e geologia; o segundo quadrante, epicarste, confinamento e condutividade; e o terceiro quadrante, recarga e isópacas.

Analizando a dispersão dos parâmetros em relação à CP1, observou-se que no primeiro quadrante, o parâmetro mais relevante é a geologia, com valor de 0,474; no segundo quadrante, a condutividade se destaca com valor de 0,475; e no terceiro quadrante, o parâmetro isópacas apresenta um valor de 0,413. Para dar maior importância aos parâmetros com os maiores valores da CP1, atribuiu-se o maior peso a esses valores, desde que a variação da CP1 não excedesse 10%. Caso contrário, o peso foi reduzido em uma unidade. Dessa forma, os pesos atribuídos aos parâmetros geologia, condutividade e isópacas, foram 5, 5 e 4, respectivamente.

No segundo critério, a análise do agrupamento dos parâmetros identificou que o segundo quadrante, contendo condutividade, confinamento e epicarste, foi o mais significativo. Com base nos pesos definidos no primeiro critério, o peso máximo atribuído ao segundo critério foi o menor número inteiro subsequente, ou seja, 3. Além disso, foi adotado um critério de variação da CP1 não superior a 25%, mantendo-se os pesos de 3 para o epicarste e confinamento.

O terceiro critério envolveu a análise do valor da primeira componente para os parâmetros recarga e uso e ocupação. Considerando os pesos definidos para o segundo critério, o peso máximo atribuído ao terceiro critério foi o menor número inteiro subsequente, ou seja, 2, com um critério adicional de variação da CP1 não superior a 50%. Assim, os pesos atribuídos aos parâmetros recarga e uso e ocupação do solo, foram 2 e 1, respectivamente.

Os pesos finais atribuídos aos parâmetros do método GEOGRIC podem ser observados na Tabela 13.

Tabela 19 – Pesos definidos para os parâmetros utilizados no método proposto.

PESOS						
Isópocas	Recarga	Geologia	Epicarste	Uso e ocupação	Confinamento	Condutividade
4	2	5	3	1	3	5

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Os valores dos parâmetros são multiplicados pelos pesos e então são somados os sete resultados para obter-se o valor do índice de vulnerabilidade, cujos extremos são 23 (mínimo) e 230 (máximo) (Tabela 14).

Tabela 20 – Equação final do método GEOGRIC e classes de vulnerabilidade.

Equação	Índice final = $5G + 3E + 1O + 3G + 2R + 4I + 5C$			
Vulnerabilidade	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
	23 – 75	75 – 127	127 – 179	179 – 230

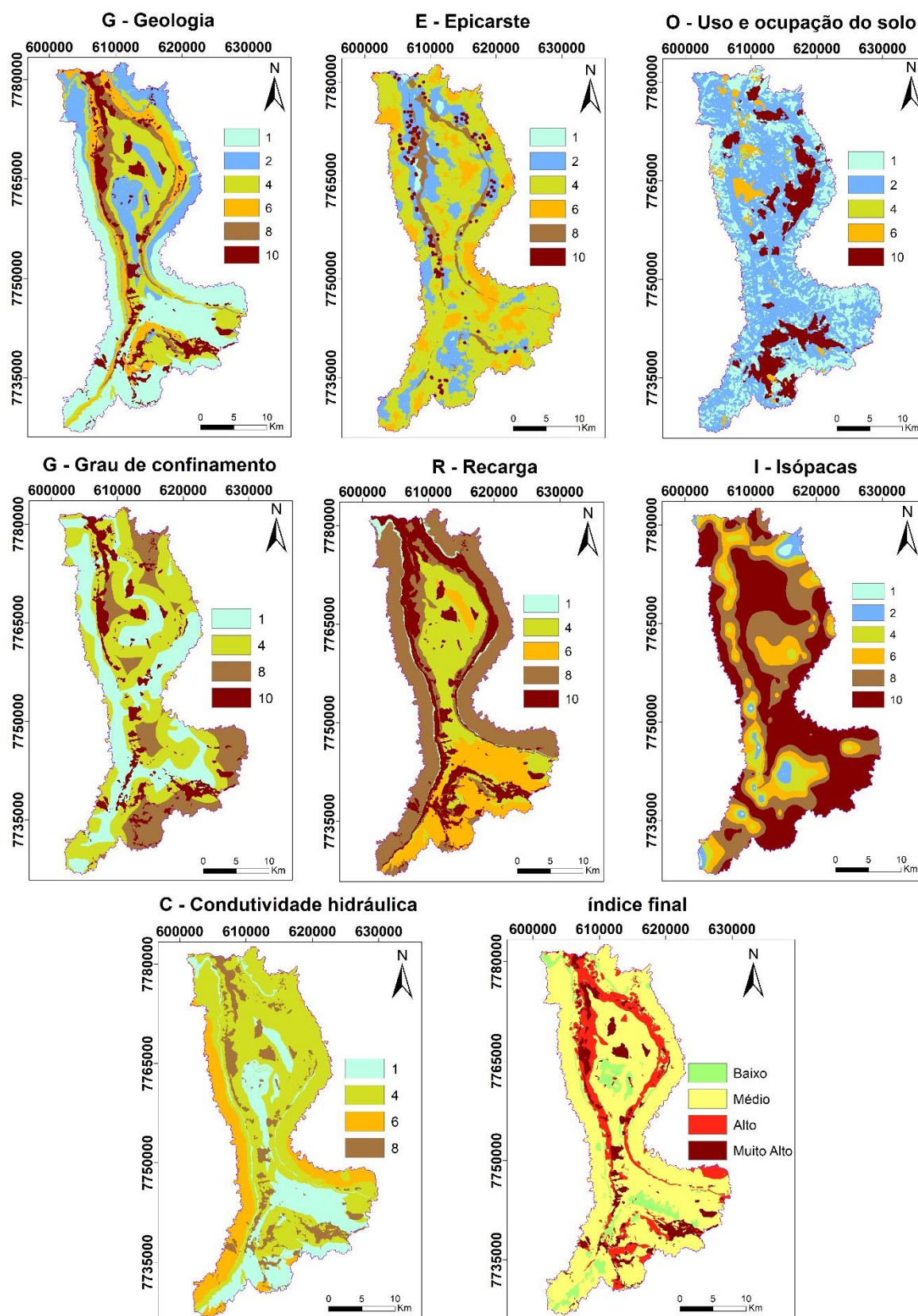
Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

3.6.3 Aplicação Experimental

O método GEOGRIC baseia-se em sete parâmetros: geologia, epicarste, uso e ocupação do solo, grau de confinamento, recarga, isópocas e condutividade hidráulica, com uma escala de seis classes: 1, 2, 4, 6, 8 e 10, onde 10 indica maior vulnerabilidade. O índice final de vulnerabilidade é determinado pela soma ponderada de cada parâmetro, utilizando pesos específicos, que são 5, 3, 1, 3, 2, 4 e 5, respectivamente. Este método foi desenvolvido para ser aplicado em múltiplos aquíferos.

A integração dos mapas temáticos referentes aos sete parâmetros do método GEOGRIC resultou em um mapa de vulnerabilidade heterogêneo, predominando a classe média no Sinclinal Moeda (Figura 4).

Figura 17– Aplicação do método GEOGRIC no Sinclinal Moeda. O último mapa inferior à esquerda representa o índice final de vulnerabilidade, indicando classes muito alta e alta nos aquíferos das coberturas, Cauê e Gandarela.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

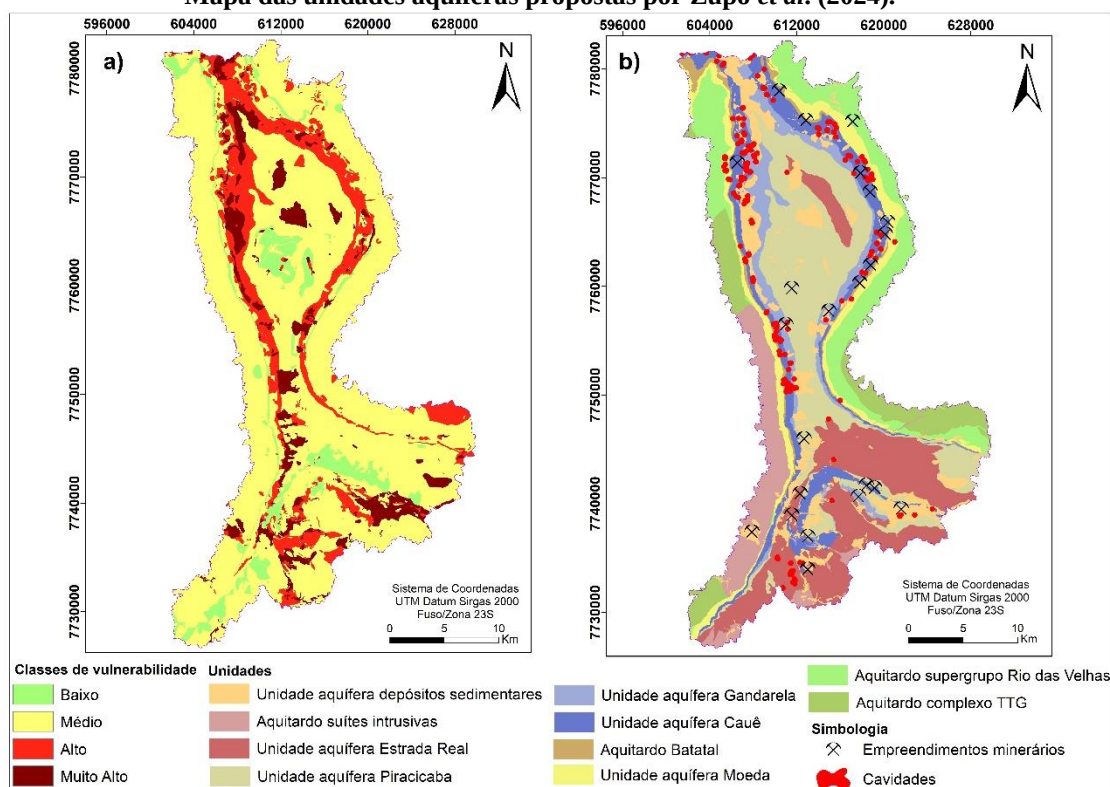
A classificação de vulnerabilidade muito alta é observada nas áreas com aquíferos das coberturas cenozoicas, enquanto a classificação alta está associada aos aquíferos Cauê e Gandarela (Figura 5). Esta configuração se deve ao fato de esses aquíferos apresentarem uma elevada taxa de recarga e alta condutividade hidráulica, com alta permeabilidade, o que facilitaria a passagem de contaminantes.

É importante destacar que, no mapa do índice final, além dos aquíferos mencionados, as áreas com cavidades identificadas no parâmetro epicarste como classe 10 estão evidentes no mapa final, apresentando uma classificação de vulnerabilidade alta.

A classificação de vulnerabilidade baixa foi identificada em pequenas porções, principalmente no aquífero Batatal, devido à sua baixa taxa de recarga e baixas condutividade hidráulica, resultantes da baixa permeabilidade e porosidade dessa unidade. Além disso, essa classificação é observada na porção central e sul do Sinclinal Moeda, evidenciando áreas com aquíferos confinados, que oferecem maior proteção aos aquíferos.

O mapa de uso e ocupação do solo do Sinclinal Moeda revela que os empreendimentos minerários estão predominantemente situados na porção sul e nordeste, áreas essas que no mapa de índice final estão classificadas com vulnerabilidade alta e média. Em contraste, os centros urbanos estão localizados em áreas de vulnerabilidade média e baixa. É importante destacar que a vegetação rasteira é a classe predominante na área de estudo, resultando em um mapa com baixa diversidade.

Figura 18 – a) Mapa de índice final de vulnerabilidade no Sinclinal Moeda utilizando o método GEOGRIC. b) Mapa das unidades aquíferas propostas por Zupo *et al.* (2024).



Fonte: Elaborada pela autora baseado em Zupo *et al.* (2024).

O mapa de vulnerabilidade indica que os aquíferos fissurais estão concentrados principalmente nas áreas com classificações como baixa e média. Os aquíferos porosos, da cobertura cenozoica, estão situados em áreas de vulnerabilidade muito alta, enquanto os aquíferos Cauê e Gandarela encontram-se em áreas de vulnerabilidade alta.

3.6.4 Comparação com o método GEOGRIC

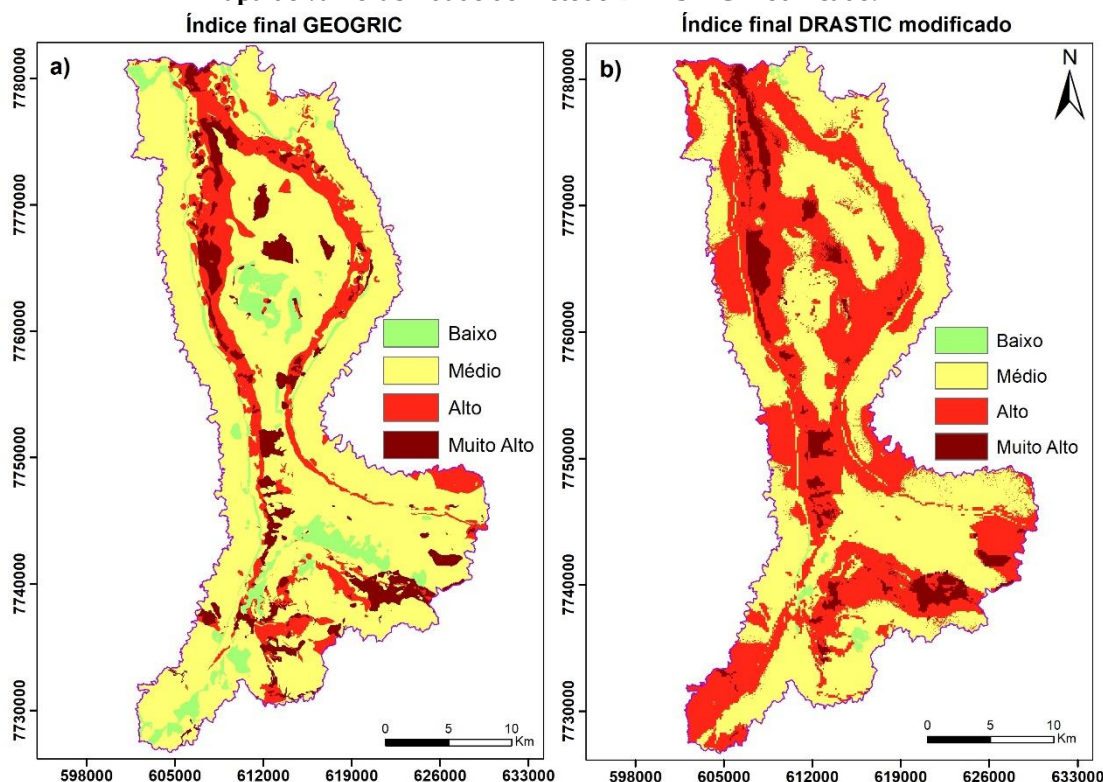
Com os resultados obtidos do método DRASTIC modificado, desenvolvido por Zupo *et al.* (2024), e do método GEOGRIC (Figura 6), ambos aplicados em múltiplos aquíferos, foi realizada uma análise da porcentagem de área correspondente a cada classe de vulnerabilidade.

O método DRASTIC resultou em um mapa de vulnerabilidade onde a classe predominante é a média, cobrindo 51,2 % da área, seguida pela alta vulnerabilidade que abrange 42,3 %. A classificação de baixa vulnerabilidade, correspondendo a 0,6% da superfície total, é encontrada em pequenas porções na parte sul e em um pequeno fragmento na parte norte do Sinclinal Moeda. A classificação de vulnerabilidade muito alta está situada nos aquíferos das coberturas, com 5,8%.

Por outro lado, o método GEOGRIC apresentou resultados mais condizentes com a realidade da área de estudo. A vulnerabilidade baixa abrange 7%, principalmente no aquífero

Batatal; a classificação média cobre 69,9%, nos aquíferos fissurais; a classificação alta é observada nos aquíferos Cauê (granular/fissural) e Gandarela (cárstico), com 14,7%; e a classificação muito alta no aquífero das coberturas, com 8,4%.

Figura 19 – a) Mapa de índice final de vulnerabilidade no Sinclinal Moeda utilizando o método GEOGRIC. b) Mapa de vulnerabilidade do método DRASTIC modificado.



Fonte: Elaborada pela autora baseado em Zupo *et al.* (2024).

O mapa gerado pelo método GEOGRIC demonstrou aumento na classificação de baixa e média vulnerabilidade e uma redução na classificação de vulnerabilidade alta. Em termos gerais, o método DRASTIC modificado resultou em um mapa de vulnerabilidade com predominância das classes média e alta, e pouca variação nas demais classes.

O mapa de vulnerabilidade gerado pelo método DRASTIC revelou algumas anomalias nas porções sudoeste, sudeste, leste e oeste do Sinclinal Moeda. Nessas regiões, que correspondem respectivamente ao aquífero complexo TTG, à unidade aquífera Piracicaba e ao aquífero Rio das Velhas, observa-se uma classificação de alta vulnerabilidade, apesar dessas áreas serem caracterizadas por baixa condutividade hidráulica, ausência de cavidade e taxas reduzidas de recarga. No entanto, o método GEOGRIC classifica essas áreas como de média vulnerabilidade, o que demonstra uma relação mais coerente com as características da área de estudo.

Portanto, o método GEOGRIC mostrou-se mais adequado para avaliar a vulnerabilidade da área de estudo, devido à sua capacidade de refletir com maior precisão a distribuição das

classes de vulnerabilidade em conformidade com as características da região. Este método evidencia de maneira mais precisa quais aquíferos têm maior probabilidade de serem afetados por uma carga contaminante.

3.7 Conclusões e Recomendações

O método proposto para a avaliação da vulnerabilidade demonstrou eficácia em identificar as regiões mais susceptíveis à contaminação, considerando as características intrínsecas da área de estudo. O método consiste em sete parâmetros derivados dos outros métodos aplicados na região por Zupo *et al.* (2024), incluindo recarga e meio aquífero (geologia) do método DRASTIC, condutividade hidráulica do método SINTACS, epicarste do método EPIK e grau de confinamento do método GOD. Além disso, foram substituídos dois parâmetros mais adequados às condições de climas tropicais e de fácil obtenção: isópacas de nível d'água e uso e ocupação do solo. O parâmetro epicarste também foi aprimorado com a inclusão da densidade de lineamentos.

A equação proposta para o método GEOGRIC mantém a estrutura básica da equação do método DRASTIC, mas com ajustes na classificação atribuída a cada parâmetro. Os parâmetros foram categorizados em seis classes, 10, 8, 6, 4, 2 e 1, essa nova divisão foi estabelecida para evitar a predominância de uma única variação paramétrica, com os valores atribuídos de forma escalonada seguindo a lógica do mais restritivo. Além disso, os pesos de cada parâmetro foram modificados para uma análise mais condizente com a realidade da área de estudo.

A definição dos pesos dos parâmetros no método proposto foi baseada na análise de componentes principais (PCA). Os resultados indicaram que os parâmetros de maior destaque são a condutividade hidráulica e a geologia, recebendo peso 5, seguido pela isópacas, com peso 4. Os parâmetros epicarste e grau de confinamento receberam peso 3, recarga peso 2 e uso e ocupação do solo, peso 1.

A definição dos pesos seguiu três critérios. O primeiro critério, a avaliação por quadrantes, demonstrou que a distribuição dos sete parâmetros em três quadrantes assegura uma boa aderência ao método proposto. No segundo critério, a avaliação por agrupamento revelou que os parâmetros relacionados à proteção do nível d'água, como a condutividade, grau de confinamento, recarga e isópacas, constituem o conjunto mais representativo para a análise de vulnerabilidade intrínseca, o que está em consonância com o objetivo do método. O terceiro critério, a avaliação do valor do autovetor da primeira componente principal, indicou que, embora o uso e ocupação tenha peso 1, é um parâmetro relevante para áreas degradadas.

Os resultados obtidos com o método GEOGRIC foram satisfatórios, considerando os

aspectos físicos do Sinclinal Moeda. A integração dos mapas temáticos referentes aos sete parâmetros do método GEOGRIC resultou em um mapa de vulnerabilidade condizente com a realidade da área de estudo, predominando a classe média. O mapa do índice final de vulnerabilidade indica que os aquíferos fissurais estão concentrados principalmente nas áreas com classificações baixa e média. Os aquíferos porosos da cobertura cenozoica estão situados em áreas de vulnerabilidade muito alta, enquanto o aquífero Cauê está em áreas de vulnerabilidade alta. O aquífero Gandarela, cárstico, também está classificado como de alta vulnerabilidade.

O método GEOGRIC mostrou-se mais adequado para avaliar a vulnerabilidade da área de estudo, devido à sua capacidade de refletir a heterogeneidade e a distribuição das classes de vulnerabilidade, evidenciando de maneira mais precisa quais aquíferos têm maior probabilidade de serem afetados por contaminação.

Uma recomendação para futuras pesquisas é a inclusão de um novo parâmetro no método GEOGRIC, com o objetivo de aprimorar a avaliação das componentes principais, de modo que os autovetores da CP1 apresentem maior dispersão e menor agrupamento. Isso poderia contribuir para uma análise mais robusta e diversificada dos dados.

3.8 Referências Bibliográficas

- Alkmim, F.F. (2020), Histórico das investigações estratigráficas, estruturais e geotectônicas do Quadrilátero Ferrífero. In: Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos. Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP -Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero.
- Aller, L.; Bennett, T.; Lehr, J. H.; Petty, R. J.; Hackett, G. (1987), Drastic: A Standardized System For Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. National Water Well Association. Dublin, Ohio 43017.
- Almeida, F.F.M. (1976), Estruturas do Pré-Cambriano inferior brasileiro. 29th Congresso Brasileiro de Geologia. Sociedade Brasileira de Geologia, Ouro Preto, pp. 201–202.
- Andrade, I.B. (2023), Modelo Hidrogeológico de Fluxo do Flanco Oeste do Sinclinal Moeda: Passado, Presente e Futuro do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais, Brasil. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais.
- Baltazar, O.F. & Zucchetti, M. (2007). Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 32 (2007) 471-499.
- Beato, D.A.C.; Monsore, A.M. & Bertachini, A.C. (2006), Potencial Aquífero nos Metassedimentos do Quadrilátero Ferrífero – Região da Apa Sul RMBH – MG. XIV Congresso Brasileiro de Geologia.
- Bós, S.M. & Thomé, A. (2012). Métodos para avaliar vulnerabilidade das águas subterrâneas. POA Comunicação, 1ª edição, Porto Alegre – RS.

- Braga, S.C.M., (2006), Modelagem estrutural e geofísica da porção centro-norte do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, MG. Contribuições às ciências da terra. Série M, v. 30, n 242. 551.243(815.1).
- CBH Rio das Velhas. (2013), Produto 3 - Estudos Hidrológicos E Hidrogeológicos Da Bacia Do Rio Itabirito E Dos Cenários De Outorgas De Recursos Hídricos (Bacia Do Rio Itabirito). Ato Convocatório Nº 018/2012.
- Civita, M. & Maio, M. (2004), Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian “combined” approach. *Geofísica Internacional*. Vol. 43, Num. 4, pp. 513-532.
- Conceição, R.A.C. & Silva, A.Q. (2013). Extração automática de lineamentos utilizando imagens SRTM, Landsat ETM+ e ALOS PALSAR na região de Nobres, MT. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto –SBSR*, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
- Daly, D.; Dassargues, A.; Drew, D.; Dunne, S.; Goldscheider, N.; Neale, S.; Popescu, I.C.; Zwahlen, F. Main concepts of the “European approach” to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal* (2002) 10:340–345. Doi: 10.1007/s10040-001-0185-1.
- Dantas, J.C.M.; Mesquita, D.C.; De Paula, R.S.; Guerra, K.J. (2017). Correlação entre dados de perfilagem geofísica e potencial de bombeamento de poços em litotipos da Formação Cauê no sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. *Águas Subterrâneas*, v.31, n.4, p.373-383, doi: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v31i4.28910>.
- De Maio, M.; Civita, M. Farina, M. Zavatti, A. (2001), Linee-guida per la redazione e l’uso dele carte dela vulnerabilità degli acquiferi all’inquinamento. *Manuali e linee guida* 4/2001.
- Doerfliger, N.; Jeannin, P.Y. & Zwahlen, F. (1999), Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology*. 39 (2).
- Dorr, J.V.N. II, (1969), Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 641-A. U.S. Geological Survey, pp. 1-110.
- Endo I.; Galbiattih, F.; Delgadoc, E. R.; Oliveira, M. M. F.; Zapparolia, C.; Moura, L. G. B.; Peresg, G.; Oliveira, A. H.; Zavaglia, G.; Gomes, C. J. S.; Carneiro, M. A.; Nalini, J. H. A.; Castro, P. T. A.; Suita, M. T. F.; Tazava, E.; Lana C. C.; Martins-Neto, M. A.; Martins, M. S.; Ferreira, F. F. A.; Franco, A. P.; Almeida, L. G.; Rossi, D. Q.; Angeli, G.; Madeira, T. J. A.; Piassa, L. R.A.; Mariano, D.F.; Carlos, D. U. (2019), Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000. Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP -Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero.
- Endo, I.; Machado, R.; Galbiatti, H.F.; Rossi, D.Q.; Zapparoli, A.C.; Delgado, C.E.R.; Castro, P.R.A.; Oliveira, M.M.F (2020). Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero.
- Formoso, D. (2014), Identificação e estudo das áreas prioritárias para conservação da biodiversidade no Sinclinal Moeda (MG) com base nos serviços ecossistêmicos. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais.

- Freitas, S. M. A. C. & Bacellar, L. A. P. (2013), Avaliação da Recarga de Aquíferos em Microbacias do Alto Rio das Velhas, Minas Gerais. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 18 n.2 –31-39.
- Guiguer, N. & Kohnke, M.W. (2002). Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos. Águas Subterrâneas, (1).
- Hirata, R. C. A. (2001). Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a vulnerabilidade à poluição de aquífero. In: I Seminario - Taller: Protección de Acuíferos frente a la contaminación, Toluca, Mexico.
- Hongyu, K.; Sandanielo, V.L.M.; Junior, G.J.O. (2015), Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. Engineering and Science, v.1, Edição 5. Doi: 10.18607/ES20165053.
- Magalhães, C. C. C; Melo, M. C.; Guiger, N.; Paula, R. S. (2022), The Cauê Aquifer on the eastern limb of Moeda Syncline: characterization, impacts, and flow in an area west of Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero) – MG, Brazil. Brazilian Journal of Geology, 52(4).
- Maia, P. H. P. (2011), Um Novo Método Para Avaliar A Vulnerabilidade Dos Aquíferos. Tese de Doutorado (Doutor - Geologia) – Universidade Federal da Bahia.
- Meneses, P.R. & Almeida, T. (2012). Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. UnB-CNPq. Brasília, 2012.
- Mourão, M. A. A. (2007), Caracterização Hidrogeológica Do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG.
- Nogueira, J. D. L. & Amaral, R. F. (2009), Comparação entre os métodos de interpolação (Krigagem e Topo to Raster) na elaboração da batimetria na área da folha Touros – RN. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE, p. 4117-4123.
- Oliveira, D.B.; Moreno, R.S.; Miranda, D.J.; Ribeiro, C.S.; Seoane, J.C.S.; Melo, C.L. (2009). Elaboração de um mapa de lineamentos estrutural e densidade de lineamento através de imagem SRTM, em uma área ao norte do rio Doce, ES. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE, p.4157 – 4163.
- Paula, R.S.; Mesquita, D.C.; Dantas, J.C.M.; Guerra, K.J. (2018). Caracterização hidroquímica e isotópica das águas, na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero no município de Congonhas-MG, e sua correlação com a localização em cota das unidades aquíferas deste sistema. Águas Subterrâneas, v.32, n.1, p. 140-153.
- Regazzi, A.J. (2001), Análise multivariada, notas de aula INF 766, Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas. Departamento de Informática, v.2.
- Rosière, C.A.; Spier, C.A.; Rios, F.J.; Suckau, V.E. (2008), The itabirites of the Quadrilátero Ferrífero and related high-grade iron ore deposits: an overview. Ver. Econ. Geol. 15, 223-254.
- Santos, R.A.; Cruz, M.J.M. & Nascimento, S.A.M. (2010). Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: Subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Cadernos de Geociências, nº 7, 2010.

- Silva R. G. (1999), Análise Estrutural e modelagem tectônica da região centro-sul do Sinclinal da Moeda, Quadrilátero Ferrífero. DEGEO/EM/UFOP, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 154 p.
- Silva, A.B.; Neto, A.F.S. & Bertachini, A.C. (1994). Potencial das águas subterrâneas do Quadrilátero Ferrífero. Águas Subterrâneas, (1).
- Silva, R.G. & Gomes, C.J.S. (2001), Análise da deformação na porção centro-sul do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Geo.br 1 (2001) 1-23.
- Siqueira, J.B.; Teixeira, T.O.; Linhares, S.S.; Vedana, L.A.; Stefano, P.H. (2020). Aplicação do método GOD e estatística multivariada no estudo da vulnerabilidade de aquífero à contaminação em Aracaju/SE. In: Ciências Exatas e da Terra: Conhecimentos Estratégicos para o Desenvolvimento do País. Ponta Grossa - PR.
- Stempvoort, D. V.; Ewert, L. & Wassenaar, L. (1993), Aquifer vulnerability index: A GIS - Compatible method for groundwater vulnerability mapping, Canadian Water Resources Journal, 18:1, 25-37. Doi: 10.4296/ cwrj1801025.
- Varella, C.A.A. (2008), Análise Multivariada Aplicada as Ciências Agrárias: Análise de Componentes Principais. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica – RJ.
- Vicini, L. (2005), Análise multivariada: Da teoria à prática. Monografia (Especialista em Estatística e Modelagem Quantitativa). Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, RS, Brasil.
- Zupo, A.; De Paula, R.S.; Galvão, P; Vidal, T.A.V.; Fiusa, M.C.; Júnior, J.G.R.; Sampaio, J.L.D.; De Melo, M.C. (2024a). Dinâmica do fluxo subterrâneo a partir do perfil hidrogeológico da porção central do Sinclinal Moeda. XXIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo, 2024.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo central deste trabalho foi desenvolver um método para avaliar a vulnerabilidade intrínseca à contaminação, aplicável em áreas com múltiplos aquíferos, através da aplicação e adaptação dos métodos SINTACS (Civita & De Maio, 2000), EPIK (Doerfliger, Jeannin & Zwahlen, 1998), GOD (Foster & Hirata, 1988) e DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

A aplicação dos métodos originais no Sinclinal Moeda revelou resultados limitados, uma vez que esses métodos foram inicialmente projetados para contextos diferentes e não consideram as características específicas de climas tropicais. Em resposta a essas limitações, adaptações foram introduzidas para refletir melhor as condições da área de estudo.

As adaptações realizadas nos métodos demonstraram eficácia na identificação de áreas mais suscetíveis à contaminação e na determinação dos parâmetros mais relevantes. Os métodos específicos adaptados mostram-se superiores ao método generalista, contudo, o método DRASTIC ainda apresentou resultados satisfatórios e não deve ser desconsiderado.

Como os métodos aplicados neste estudo não foram desenvolvidos considerando as características físicas do Brasil e levando em consideração os resultados satisfatórios do método DRASTIC, bem como o desempenho positivo obtido nos parâmetros dos métodos específicos para cada tipo de aquífero, foi motivador propor um método para climas tropicais.

A partir da aplicação e adaptações dos quatro métodos, foi possível identificar os principais parâmetros para formulação do método GEOGRIC, que se baseia na estrutura do método DRASTIC, incorporando sete parâmetros. O método GEOGRIC é um acrônimo para os parâmetros geologia (G), epicarste (E), uso e ocupação do solo (O), grau de confinamento (G), recarga (R), isópacas (I) e condutividade hidráulica (C).

O índice final de vulnerabilidade foi calculado por meio da soma ponderada desses parâmetros, utilizando pesos específicos de 5, 3, 1, 3, 2, 4 e 5, respectivamente, determinados através da análise de componentes principais. A integração dos mapas temáticos referentes aos sete parâmetros do método GEOGRIC resultou em um mapa de vulnerabilidade que reflete com maior precisão a realidade de climas tropicais.

Uma das limitações deste estudo é a insuficiência do banco de dados disponível. Para obter resultados mais precisos, seria fundamental dispor de um banco de dados mais robusto, contendo informações amplamente distribuídas por toda a área de estudo. Incluindo dados detalhados sobre o nível d'água, mapa de solo e informações específicas sobre o ambiente cárstico no Quadrilátero Ferrífero.

Como recomendações finais, sugere-se aprofundar os estudos hidrogeológicos

relacionados à vulnerabilidade em outras megaestruturas do Quadrilátero Ferrífero, visando aprimorar a gestão dos recursos hídricos na região.

5 REFERÊNCIAS

- Albinet, M. & Margat, J. (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Bull BRGM 2me Series, v. 3, n. 4, p. 13-22, 1970.
- Alkmim, F. F. & Marshak, S. (1998), Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in Quadrilátero Ferrífero. Precambrian Research, Amsterdam, n.90, p.29-58.
- Alkmim, F.F. & Noce, C.M. (2006), The Paleoproterozoic Record of the São Francisco Craton. IGCP 509 Field workshop, Bahia e Minas Gerais, Brasil. Field Guide & Abstracts, 114p.
- Alkmim, F.F. (2020), Histórico das investigações estratigráficas, estruturais e geotectônicas do Quadrilátero Ferrífero. In: Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos. Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP -Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero.
- Aller, L; Bennett, T; Lehr, J. H.; Petty, R. J.; Hackett, G. (1987), Drastic: A Standardized System For Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. National Water Well Association. Dublin, Ohio 43017.
- Almeida, F.F.M. (1976), Estruturas do Pré-Cambriano inferior brasileiro. 29th Congresso Brasileiro de Geologia. Sociedade Brasileira de Geologia, Ouro Preto, pp. 201–202.
- Andrade, I.B. (2023), Modelo Hidrogeológico de Fluxo do Flanco Oeste do Sinclinal Moeda: Passado, Presente e Futuro do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais, Brasil. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais.
- Auge, M. (2007), Vulnerabilidad de Acuíferos Conceptos y Métodos. Servicio Geológico Minero Argentino, Buenos Aires, v. 7, p. 1-35, 7.
- Azevedo, M.F.C. (2018). Estudo do parâmetro solo nos métodos para determinação de vulnerabilidade a contaminação de aquíferos em regiões tropicais. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília – UnB. Brasília, 2018.
- Azevedo, U.R.; Machado, M.M.M.; Castro, P.T.A.; Renger, F.E.; Trevisol, A.; Beato, D.A.C. (2012). Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG): proposta. CPRM. Belo Horizonte -MG, v1.
- Baltazar, O.F. & Zucchetti, M. (2007). Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. Ore Geology Reviews, 32 (2007) 471-499.
- Barazzuoli, P.; Capacci, F.; Migliorini, J.; Mocenni, B.; Rigati, R.; Salleolini, M. (2005), La Vulnerabilità Degli Acquiferi All'inquinamento Nell'ambito Dello Schema Metropolitano Dell'area Senese. Giornale di Geologia Applicata 2. 151–157.
- Beato, D.A.C.; Monsore, A.M. & Bertachini, A.C. (2006), Potencial Aquífero nos Metassedimentos do Quadrilátero Ferrífero – Região da Apa Sul RMBH – MG. XIV Congresso Brasileiro de Geologia.
- Biondić, R.; Meaški, H.; Biondić, B.; Loborec, J. (2021), Karst Aquifer Vulnerability Assessment (KAVA) Method—A Novel GIS-Based Method for Deep Karst Aquifers. Sustainability, 13, 3325. <https://doi.org/10.3390/su13063325>.
- Bós, S.M. & Thomé, A. (2012). Métodos para avaliar vulnerabilidade das águas subterrâneas. POA Comunicação, 1ª edição, Porto Alegre – RS.
- Braga, S.C.M., (2006), Modelagem estrutural e geofísica da porção centro-norte do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, MG. Contribuições às ciências da terra. Série M, v. 30, n

242. 551.243(815.1).

- Castro, P. T. A.; Endo, I.; Gandini, A. L. (2020), *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. [S. l.]: 3i Editora. 482 p.
- CBH Rio das Velhas. (2013), *Produto 3 - Estudos Hidrológicos E Hidrogeológicos Da Bacia Do Rio Itabirito E Dos Cenários De Outorgas De Recursos Hídricos (Bacia Do Rio Itabirito)*. Ato Convocatório N° 018/2012.
- CBH Rio das Velhas. (2016), *Dois lados da Moeda – Carta dos comitês de bacia dos rios das Velhas e Paraopeba sobre o Sinclinal Moeda*. Ato Convocatório N° 018/2012
- Chemale JR, F.; Rosière, C. A.; Endo, I. (1991), *Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - Um Modelo*. *Pesquisas em Geociências*, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 104–127, doi: 10.22456/1807-9806.21350.
- Civita, M. & Maio, M. (2004), *Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian “combined” approach*. *Geofísica Internacional*. Vol. 43, Num. 4, pp. 513-532.
- Conceição, R.A.C. & Silva, A.Q. (2013). *Extração automática de lineamentos utilizando imagens SRTM, Landsat ETM+ e ALOS PALSAR na região de Nobres, MT*. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto –SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil*.
- Daly, D.; Dassargues, A.; Drew, D.; Dunne, S.; Goldscheider, N.; Neale, S.; Popescu, I.C.; Zwahlen, F. *Main concepts of the “European approach” to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping*. *Hydrogeology Journal* (2002) 10:340–345. Doi: 10.1007/s10040-001-0185-1.
- Dantas, J.C.M.; Mesquita, D.C.; De Paula, R.S.; Guerra, K.J. (2017). *Correlação entre dados de perfilagem geofísica e potencial de bombeamento de poços em litotipos da Formação Cauê no sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG*. *Águas Subterrâneas*, v.31, n.4, p.373-383, doi: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v31i4.28910>.
- De Maio, M.; Civita, M. Farina, M. Zavatti, A. (2001), *Linee-guida per la redazione e l’uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all’inquinamento*. *Manuali e linee guida* 4/2001.
- Doerfliger, N.; Jeannin, P.Y. & Zwahlen, F. (1999), *Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method)*. *Environmental Geology*. 39 (2).
- Doni, M.V. (2004), *Análise de Cluster: Métodos Hierárquicos e de Particionamento*. *Trabalho de Guardação - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo*.
- Dorr, J.V.N. (1969), *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 641-A*. U.S. Geological Survey, pp. 1-110.
- Endo I.; Galbiattih, F.; Delgadoc, E. R.; Oliveira, M. M. F.; Zapparolia, C.; Moura, L. G. B.; Peresg, G.; Oliveira, A. H.; Zavaglia, G.; Gomes, C. J. S.; Carneiro, M. A.; Nalini, J. H. A.; Castro, P. T. A.; Suita, M. T. F.; Tazava, E.; Lana C. C.; Martins-Neto, M. A.; Martins, M. S.; Ferreira, F. F. A.; Franco, A. P.; Almeida, L. G.; Rossi, D. Q.; Angeli, G.; Madeira, T. J. A.; Piassa, L. R.A.; Mariano, D.F.; Carlos, D. U. (2019), *Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. Escala 1:150.000. Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP -Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero.
- Endo, I.; Machado, R.; Galbiatti, H.F.; Rossi, D.Q.; Zapparoli, A.C.; Delgado, C.E.R.; Castro, P.R.A.; Oliveira, M.M.F (2020). *Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero*

- Ferrífero, Minas Gerais. In: Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos. Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero.
- Feitosa, F.A.C., Manoel Filho J., Feitosa E.C., Demetrio J.G.A. (2008), Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: CPRM; Recife: LABHID, 812 p.
- Filho, A. C.; Shinzato, E. (2005), APA Sul RMBH - Estudos do Meio Físico – Pedologia. Projeto APA Sul da RMBH, Estudos do Meio Físico Escala 1:50.000.
- Filho, A.C. (2008). Solos e ambientes do Quadrilátero Ferrífero (MG) e aptidão silvicultural dos tabuleiros costeiros. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras.
- Formoso, D. (2014), Identificação e estudo das áreas prioritárias para conservação da biodiversidade no Sinclinal Moeda (MG) com base nos serviços ecossistêmicos. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais.
- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D’Elia, M.; Paris, M. (2002), Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Servmar – Serviços Técnicos Ambientais Ltda, p. 1-101.
- Foster, S.S.D. 1987. “Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy.” Proceedings of International Conference: Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. Noordwijk, Países Baixos.
- Foster, S.S.D.; Hirata, R.C. & Rocha, G.A. (1988), Riscos de poluição de águas subterrâneas: Uma proposta metodológica de avaliação regional. Águas Subterrâneas.
- Francisco, R. F. (2013), Avaliação Da Vulnerabilidade Natural À Contaminação Do Sistema Aquífero Bauru, Na Região Centro-Sul Do Estado De São Paulo. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro – SP.
- Francisco, R.F. (2018), Contribuições metodológicas à estimativa da vulnerabilidade natural e perigo de contaminação de aquíferos livres granulares. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente). Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Rio Claro - SP.
- Freitas, S. M. A. C. & Bacellar, L. A. P. (2013), Avaliação da Recarga de Aquíferos em Microbacias do Alto Rio das Velhas, Minas Gerais. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 18 n.2 –31-39.
- Freitas, S. M. A. C. (2010), Quantificação da infiltração e da recarga de aquíferos do alto rio das Velhas (M.G.). Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto.
- Gaidukas, G. (2016), Contribuição à Geologia do Distrito de Antônio Pereira, Ouro Preto, MG. Monografia (Graduação em Geologia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- Godoy, F. E.; García, J. T. S.; Estrada, S. O. Estrada, R. M.; Cruz-Cárdenas, G.; Barragán, F. V.; Leal, A. R.; Velázquez, J. N. (2013), Aplicación Del Método Sintacs Para La Determinación De La Vulnerabilidad Acuífera En La Cuenca Del Río Duero, Michoacán, México. Rev. Int. Contam. Ambie. 29 (4) 235-248.
- Goldscheider, N. & Ravbar, N. (2007), Proposed Methodology of Vulnerability and Contamination Risk Mapping for the Protection of Karst Aquifers in Slovenia. Acta Carsologica.
- Goldscheider, N.; Klute, M.; Sturm, S.; Hötzl, H. (2000), The PI method - A GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. Zeitschrift fur Angewandte Geologie. 46. 157-166.

- Gomes, J.; Kishi, R. T.; Milek, C. B. (2011), Avaliação De Incertezas Geológicas Na Determinação Do Índice De Vulnerabilidade Sintacs Em Uma Área Do Aquífero Carste Em Almirante Tamandaré. XIX Simpósio Brasileiro de Recurso Hídricos.
- Guerra, K. J. (2010), Aplicação de método geofísico em estudo hidrogeológico no município de Nova Lima – MG: caracterização de aquíferos em área urbana. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais.
- Guiguer, N. & Kohnke, M.W. (2002). Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos. *Águas Subterrâneas*, (1).
- Hilário, C.C. (2018). Estudos comparativos dos métodos de classificação de cavidades propostos pelas intrusões normativas MMA 02/2009 e 02/2017 na relevância física e histórico-cultural aplicados em cavidades da Fazenda Gogo – Mariana, MG. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental e Conservação de Recursos Naturais). Universidade Federal de Ouro Preto.
- Hirata, R. & Fernandes, A.J. (2008), Vulnerabilidade à poluição de aquíferos. In: *Hidrogeologia Conceitos e Aplicações*, 3ª ed. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil - CPRM.
- Hirata, R. C. A. (2001). Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a vulnerabilidade à poluição de aquífero. In: *I Seminario - Taller: Protección de Acuíferos frente a la contaminación*, Toluca, Mexico.
- Hirata, R.C.A.; Suhogusoff, A.V. (2004). A proteção dos recursos hídricos subterrâneos no estado de São Paulo. *Águas Subterrâneas*, (1).
- Hongyu, K.; Sandanielo, V.L.M.; Junior, G.J.O. (2015), Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. *Engineering and Science*, v.1, Edição 5. Doi: 10.18607/ES20165053.
- Júnior, J.G.R.; Lobato, L.M.; Lima, L.C.; Porto, C.G.; Figueiredo e Silva, R.C. Metatubidite-hosted gold deposits, Córrego do Sítio lineament, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, v. 45, p. 5-22, 2015.
- Kavouri, K.; Plagnes, V.; Tremoulet, J.; Dörfliger, N; Rejiba, F.; Marchet, P. (2011), PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability—application to the Ouyse karst system (southwest France). *Hydrogeology Journal*.
- Le Grand, H. (1964), System for evaluating contamination potential of some waste sites. *American Water Work Association Journal*, v. 56, n. 8, p. 959-974.
- Lott, D. & Polignano, M. V. (2016), Dois Lados Da Moeda – Carta dos comitês de bacia do Velhas e Paraopeba sobre o Sinclinal Moeda, CBH – Rio das Velhas. Belo Horizonte-MG.
- Magalhães, C. C. C; Melo, M. C.; Guiger, N.; Paula, R. S. (2022), The Cauê Aquifer on the eastern limb of Moeda Syncline: characterization, impacts, and flow in an area west of Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero) – MG, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 52 (4). <https://doi.org/10.1590/2317-4889202220220005>.
- Maia, P. H. P. (2011), Um Novo Método Para Avaliar A Vulnerabilidade Dos Aquíferos. Tese de Doutorado (Doutor - Geologia) – Universidade Federal da Bahia.
- Malík, P. & Svasta, J. (1999), REKS - An alternative Method of Karst Groundwater Vulnerability Estimation. *Svasta, Jaromir*, 79-85. 10.13140/2.1.2919.7766.
- Margane, A. (2003), Guideline for Groundwater Vulnerability Mapping and Risk Assessment for the Susceptibility of Groundwater Resources to Contamination. Federal Ministry for Economic Cooperation and Developente, Damascus, v.4.

- Margat, J. (1968), *Vulnerabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution* [Contamination vulnerability mapping of groundwater]. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, p. 68, Orleans.
- Meneses, P.R. & Almeida, T. (2012). *Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto*. UnB-CNPq. Brasília, 2012.
- Mesquita, D. C; Dantas, J. C. M.; De Paula, R. S.; Guerra, K. J. (2018), Estudo dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos em ensaios de campo em itabiritos brandos da porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. *Geonomos, CPMTC*. 25(2), p12-19.
- Miller, J. A. (1999), *Ground Water Atlas of the United States 2000*. Groundwater Atlas of the United States: introduction and national summary. United States Geological Survey Publication HA 730-A, 15 p.
- Miranda, C. S.; Mioto, C. L.; Lastoria, G.; Gabas, S. G.; Paranhos Filho, A. C. (2015), Uso de sistemas de informação geográfica (SIG) na modelagem da vulnerabilidade de aquífero livre: Comparação entre os métodos GOD e EKV na bacia do rio Coxim, São Gabriel do Oeste, MS, Brasil. *São Paulo, UNESP, Geociências*, v. 34, n. 2, p.312-322.
- Monkhouse, R. A. (1983). *Vulnerability of aquifers and groundwater quality in the United Kingdom*. Institute of Geological Sciences Report. Nottingham, Reino Unido, 1983.
- Morais, J. B. A. (2016), *Vulnerabilidade e riscos à poluição/contaminação das águas subterrâneas na área do complexo industrial portuário do Pecém – Estado do Ceará*. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife – PE.
- Mourão, M. A. A. (2007), *Caracterização Hidrogeológica Do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG.
- Naghetini, M.; Pinto, E.J.A. (2007). *Hidrologia Estatística*. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Belo Horizonte -MG, 552p.
- Noce, C. M. (1995). *Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Tese (Doutorado em Geologia). Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo, São Paulo. 128p.
- Nogueira, J. D. L. & Amaral, R. F. (2009), Comparação entre os métodos de interpolação (Krigagem e Topo to Raster) na elaboração da batimetria na área da folha Touros – RN. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE*, p. 4117-4123.
- Oliveira, D.B.; Moreno, R.S.; Miranda, D.J.; Ribeiro, C.S.; Seoane, J.C.S.; Melo, C.L. (2009). Elaboração de um mapa de lineamentos estrutural e densidade de lineamento através de imagem SRTM, em uma área ao norte do rio Doce, ES. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE*, p.4157 – 4163.
- Oliveira, M. S. (2012), *Detecção de mudanças de uso e cobertura da terra no Sinclinal Moeda (MG) no período de 1991 a 2011 e previsões de mudanças futuras através de modelo espacial de simulação*. 2012. Dissertação (Pós-Graduação - Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.].
- Paula, R.S.; Mesquita, D.C.; Dantas, J.C.M.; Guerra, K.J. (2018). Caracterização hidroquímica e isotópica das águas, na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero no município de Congonhas-MG, e sua correlação com a localização em cota das unidades aquíferas deste sistema. *Águas Subterrâneas*, v.32, n.1, p. 140-153.
- Pereira, D. L.; Galvão, P.; Lucon, T.; Fujaco, M.A. (2019), Adapting the EPIK method to

- Brazilian Hydrogeological context of the São Miguel watershed to assess karstic aquifer vulnerability to contamination. *Journal of South American Earth Sciences*). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.12.011>.
- Ravbar, N. & Goldscheider, N. (2007), Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. *Acta Carsologica* 36/3, 397-411, Postojna 2007.
- Regazzi, A.J. (2001), Análise multivariada, notas de aula INF 766, Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas. Departamento de Informática, v.2.
- Romeiro, C. I. R. A. (2012), Tecnologia SIG aplicada ao estudo da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas na bacia hidrográfica das Ribeiras do Oeste. Dissertação (Mestrado em Ciência e Sistema de Informações Geográficas) - Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação da Universidade Nova de Lisboa.
- Roncato, J., Martins, M. M., & Silva, M. M. L. (2023). Remote sensing applied to geological, structural, and mass movements characterization in the connection between Curral Homocline and Moeda Syncline, Quadrilátero Ferrífero Region, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 53(1).
- Roncato, J.; Almeida, A.L.C.; Macedo, B.; Oliveira, O. (2020), Análise geofísica da região do Rio Conceição, Quadrilátero Ferrífero, associados a dados de campo, petrográficos e de imagens aéreas. *Geociências*, v. 39, n. 1, p. 47-63.
- Rosière, C.A.; Spier, C.A.; Rios, F.J.; Suckau, V.E. (2008), The itabirites of the Quadrilátero Ferrífero and related high-grade iron ore deposits: an overview. *Ver. Econ. Geol.* 15, 223-254.
- Sampaio, N.A.S.; Assumpção A.R.P.; Fonseca, B.B. (2018). Estatística descritiva. Editora Poisson. Belo Horizonte – MG, 70p.
- Santos, H.G.; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H.C.; Oliveira, V. A.; Lumberras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A.; Filho, J. C. A.; Oliveira, J. B.; Cunha, T. J. F. (2018), Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5.ed, Brasília, DF: Eembrapa.
- Santos, L.R.P. (2019), Avaliação da vulnerabilidade a contaminação das águas subterrâneas do município de Jacobina-BA. Monografia (Graduação em Geologia) - Universidade Federal da Bahia, Salvador - BA.
- Santos, R.A.; Cruz, M.J.M. & Nascimento, S.A.M. (2010). Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: Subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Cadernos de Geociências*, nº 7, 2010.
- Silva R. G. (1999), Análise Estrutural e modelagem tectônica da região centro-sul do Sinclinal da Moeda, Quadrilátero Ferrífero. DEGEO/EM/UFOP, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 154 p.
- Silva, A.B.; Neto, A.F.S. & Bertachini, A.C. (1994). Potencial das águas subterrâneas do Quadrilátero Ferrífero. *Águas Subterrâneas*, (1).
- Silva, R.G. & Gomes, C.J.S. (2001), Análise da deformação na porção centro-sul do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Geo.br* 1 (2001) 1-23.
- Silva, T. G. A. (2022), Análise Da Aplicação De Métodos Europeus De Vulnerabilidade Intrínseca Ao Carste Tropical Da Região Da Apa Carste De Lagoa Santa. Dissertação (Pós-Graduação - Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.].
- Siqueira, J.B.; Teixeira, T.O.; Linhares, S.S.; Vedana, L.A.; Stefano, P.H. (2020). Aplicação do método GOD e estatística multivariada no estudo da vulnerabilidade de aquífero à contaminação em Aracaju/SE. In: *Ciências Exatas e da Terra: Conhecimentos*

Estratégicos para o Desenvolvimento do País. Ponta Grossa - PR.

- Sousa, A. R. C.; Barbosa, D. L.; Albuquerque, J. P. T.; Medeiros, C. M.; Ribeiro, M. A. F. M. (2011), Aplicação do método GLA para estimativa de vulnerabilidade do aquífero Barreiras. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió – AL.
- Stempvoort, D. V.; Ewert, L. & Wassenaar, L. (1993), Aquifer vulnerability index: A GIS - Compatible method for groundwater vulnerability mapping, Canadian Water Resources Journal, 18:1, 25-37. Doi: 10.4296/ cwrj1801025.
- Varella, C.A.A. (2008), Análise Multivariada Aplicada as Ciências Agrárias: Análise de Componentes Principais. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica – RJ.
- Vías, J. M.; Andreo, B.; Perles, M. J.; Carrasco, F.; Vadillo, I.; Jimenez, P. (2006), Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. Hydrogeology Journal 14: p. 912–925
- Vicini, L. (2005), Análise multivariada: Da teoria à prática. Monografia (Especialista em Estatística e Modelagem Quantitativa). Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, RS, Brasil.
- Vrba, J. & Zaporozec, A. (1994), Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Association of Hydrogeologists (IAH), Hanover, v. 16, p. 31-48.
- Vrouhakis, I.; Tziritis, E.; Stamatis, G.; Panagopoulos, A. (2022), Groundwater Vulnerability Analysis of Tirnavos Basin, Central Greece: An Application of RIVA Method. Water, 14, 534.[https://doi.org/ 10.3390/w14040534](https://doi.org/10.3390/w14040534).
- Zupo, A.; De Paula, R.S.; Galvão, P; Vidal, T.A.V.; Fiusa, M.C.; Júnior, J.G.R.; Sampaio, J.L.D.; De Melo, M.C. (2024a). Dinâmica do fluxo subterrâneo a partir do perfil hidrogeológico da porção central do Sinclinal Moeda. XXIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo, 2024.