



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Principais modelos utilizados para avaliar vulnerabilidade dos aquíferos cársticos brasileiros: uma revisão

Olavo Amancio de Oliveira

1. Doutor em Geografia. Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia, Universidade de Brasília. e-mail: olavotop@gmail.com. ORCID 0000-0003-0304-2700. *O artigo fez parte da tese de Doutorado do autor.

Artigo recebido em 25/01/2024 e aceito em 12/08/2024

RESUMO

A escolha do modelo apropriado para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos cársticos no Brasil ainda não alcançou patamares conclusivos, principalmente considerando o tamanho do país. Assim, esta pesquisa procurou identificar o modelo mais utilizado para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos cársticos brasileiros. A pesquisa bibliográfica foi elaborada a partir de uma coletânea de artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais indexados na plataforma Web of Science, além de Dissertações de Mestrados e Teses de Doutorado, o que permitiu identificar o estado da arte da pesquisa. Dessa forma, identificamos quais são os modelos mais utilizados, os métodos de aplicações, os aspectos físicos das áreas e a escala de aplicação. Os modelos encontrados foram: COP, DRASTIC, GOD, EPIK, PI, SINTACS, KDI e MAIA. Apenas 04 modelos (COP, EPIK, PI e KDI) apresentam metodologia específica para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos cársticos. Os outros, embora apontados nesta pesquisa para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas de aquíferos cársticos, quando propostos, não foram indicados para serem aplicados em aquíferos cársticos. Dos quatro modelos indicados para o carste, os mais utilizados foram o COP e o EPIK. O modelo EPIK, além de trabalhar com uma quantidade maior de parâmetros, é indicado para aplicação em escala local e em regiões de clima úmido. O modelo COP, que trabalha com número de parâmetros menor, é indicado para aplicação em escala regional e em regiões com clima seco. Desse modo, o modelo COP se sobressai frente aos outros e possibilita a execução de estudos sem dependência de grandes investimentos.

Palavras-Chave: Aquífero cárstico, hidrogeologia, vulnerabilidade.

Main models used to assess vulnerability of brazilian karst aquifers: a review

ABSTRACT

The choice of the most appropriate model to assess the vulnerability of karst aquifers located in Brazil has not yet reached conclusive levels, mainly due to the size of the country. In this sense, this research sought to define the most suitable model to assess the vulnerability of Brazilian karst aquifers. The bibliographic research elaborated from a collection of articles published in national and international journals indexed on the Web of Science platform allowed to identify the state of the art of the research. In this way, we identify which models are used, the applications in different types of aquifers (karst or not), the physical aspects of the areas and the scale of application. The researched models were: COP, DRASTIC, GOD, EPIK, PI, SINTACS, KDI and MAIA. Only 04 models (COP, EPIK, PI and KDI) have a specific methodology to evaluate the vulnerability of karst aquifers. The others, although indicated in this research to assess groundwater vulnerability in karst aquifers, when proposed, were not indicated to be applied to karst aquifers. Of the four models indicated for karst, the COP and EPIK were the most used. The EPIK model, besides working with a larger number of parameters, is indicated for application on a local scale and in regions with a humid climate. The COP model works with fewer parameters, and is indicated for application on a regional scale and in regions with a dry climate. Thus, the COP model stands out from the others and enables the execution of studies without dependence on large investments.

Keywords: karst aquifer, hydrogeology, vulnerability

Introdução

No decorrer das últimas décadas do século XX e nas primeiras do século XXI, a população tem se deparado com uma série de questões ambientais e socioambientais em diversas partes do mundo. O acesso aos recursos hídricos, tanto em qualidade

quanto em quantidade, vem sendo ameaçado paulatinamente por uma série de intervenções humanas nos ambientes naturais. A água subterrânea dos aquíferos cársticos é uma fonte importante de abastecimento de água doce em todo

o mundo. Atualmente esse recurso é responsável por atender as necessidades de água potável de cerca de dois bilhões de pessoas (Machiwal et al. 2018). Desse modo, os grandes sistemas de águas subterrâneas tendem a perder o equilíbrio dinâmico, que possivelmente entrará em declínio, tanto no fornecimento da água potável quanto ao nível de deterioração da qualidade das águas subterrâneas em muitas partes do mundo, o que modificará drasticamente a paisagem natural, principalmente a paisagem dos ambientes cársticos.

O sistema cárstico é caracterizado, sobretudo, pelos processos de dissolução das rochas carbonáticas, como calcários, dolomitos e mármore quando entram em contato com a água (Ford; Williams, 2007). Essa dissolução acontece especificamente em subsuperfície, sempre atrelada

à espeleogênese epigênica e hipogênica (Ferreira; Uagoda, 2019). As feições geomorfológicas da paisagem cárstica, de acordo com White (1988), são constituídas por depressões fechadas que podem ter dimensões e morfologias variadas, drenagens interceptadas por sumidouros, dolinas e cavernas, nível de base local e regional, constituído por vales cegos e sistemas de condutos cársticos subterrâneos (Figura 01). Ainda, White (1988) afirma que o relevo sofre variações de uma região para outra na medida em que as feições se desenvolvem. Alguns ambientes cársticos são formados por morfologias específicas, caracterizadas por depressões profundas. Todavia, outras podem ocorrer em relevos planos e suaves, recobertos por solos e depressões de vários arranjos que as denominem carste (Kermavnar et al. 2020).

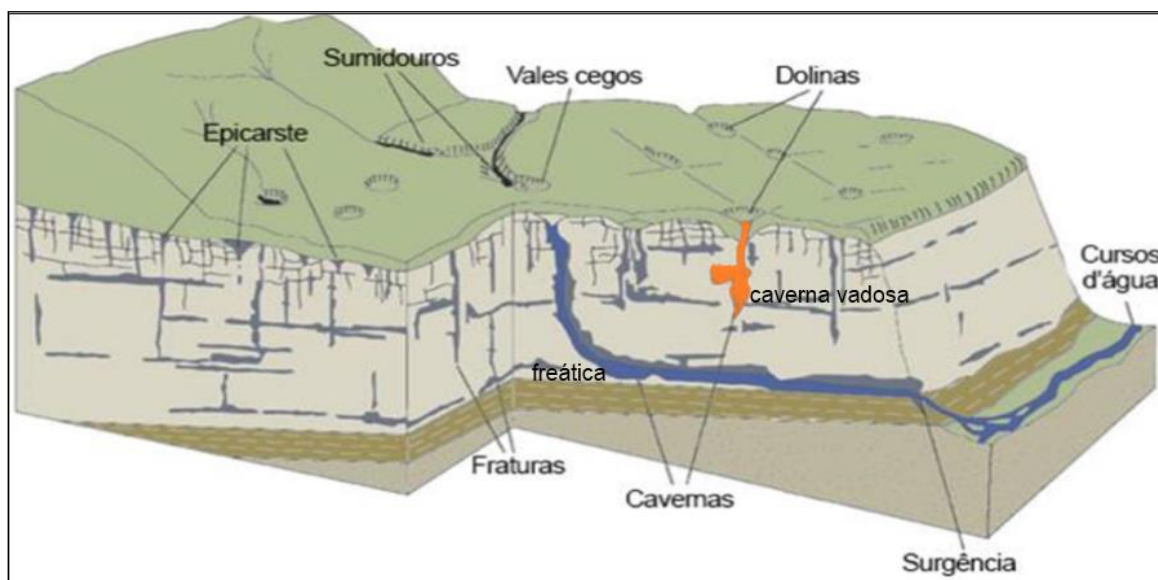


Figura 01: Feições geomorfológicas encontradas em um ambiente cárstico desenvolvido.

Fonte: Adaptado de Goldscheider (2005).

As feições comuns aos sistemas cársticos são afetadas por fatores hidroquímicos dependentes das condições petrológicas, tectônicas, climáticas, bióticas e pedológicas e por controles externos de nível de base local e regional (Ford e Williams, 2007). Os processos do carste ocorrem principalmente nas áreas subterrâneas, passando despercebidos seus efeitos na superfície, principalmente quando esse processo ocorre em regiões de carste coberto (Ford e Williams, 2007). No entanto, quando esse evento atinge a superfície, a carstificação tende a formar paisagens típicas, muitas delas consideradas endêmicas, ocorridas em função de interações complexas, atreladas aos processos de dissolução. (Tufano et al. 2020). O relevo cárstico pode ser visto como um sistema aberto, composto de dois subsistemas integrados, o hidrológico e o geoquímico, que atuam ambos

sobre as rochas (Vogelbacher et al. 2019). Dessa forma, as feições cársticas resultam da interposição desses dois subsistemas (Bailly-Comte et al. 2007).

O desenvolvimento do carste reproduz formas superficiais típicas desses ambientes, como é o caso das dolinas (Ferreira e Uagoda, 2019). Os fluxos de conexão entre o sistema cárstico subterrâneo e a superfície ocorrem principalmente através das dolinas e dos sumidouros, conferindo a esses ambientes cársticos a probabilidade de alta vulnerabilidade de seus aquíferos (Zwahlen, 2003). Em relação à especificidade dos processos dissolutivos das rochas solúveis, Ford e Williams (2007) conceituam o ambiente cárstico como um tipo de terreno com hidrologia distinta, com formas e condutos cársticos constituídos a partir do processo de solubilidade da rocha, combinados com

a porosidade secundária (fraturas) bem desenvolvida.

As feições cársticas superficiais são indicadores importantes da presença de cavernas, de fluxos subterrâneos e superficiais (convergentes ou infiltrantes), desenvolvidas em conjunto com o sistema hídrico que alimenta o sistema cárstico (Kovarík et al. 2017). Os principais problemas ocorridos em ambientes cársticos estão atrelados à ocupação humana, de modo geral, no uso e ocupação das terras. A ocupação desordenada de terras localizadas em ambientes cársticos, sem planejamento prévio, tende a acelerar eventos indesejados e potencialmente perigosos, como subsidência ou colapso do solo e comprometer a qualidade das águas dos aquíferos, bem como a degradação do patrimônio espeleológico (Pereira et al. 2019).

Os autores White (1988); Veni (2002); Ford; Williams (2007) pontuam que entre 12 a 25% de terras emersas são compostas por sistemas cársticos. No mundo inteiro, os mananciais cársticos fornecem água potável para o abastecimento humano e para os mais diversos fins. Esse é o caso do Aquífero Floridan, nos Estados Unidos das Américas (EUA), que produz mais de 39.400 m³/h de água via poços tubulares, e da nascente Fíged (Síria) que produz em média 14.400 m³/h de água, abastecendo toda a capital Damasco (Veni, 2002). No Brasil, aquíferos cársticos pertencentes ao Grupo Bambuí fornecem vazões por poço de até 200 m³/h; na região de Sete Lagoas – MG, são encontradas vazões superiores a 150 m³/h (MME, 2009).

Aquíferos são camadas hidrogeológicas, formados a partir das rochas permeáveis, com capacidade de armazenarem de grandes volumes de água em seus poros ou fraturas (Parise et al. 2018). Grabher et al. (2006) reafirmam que os aquíferos são formações geológicas que têm capacidade de armazenar e fornecer grandes volumes de água. Basicamente, os aquíferos são subdivididos em três categorias: intergranulares, fraturados e/ou fissurados, além de cársticos. Nesse sentido, os aquíferos intergranulares apresentam porosidade intersticial, cujos espaços vazios são interconectados, armazenando e transmitindo água consequentemente (Lousada e Campos, 2011).

Já os aquíferos fraturados ou fissurados são conformados em rocha sã, onde a água se armazena e circula principalmente através de fraturas, fissuras e falhas geológicas. Esses aquíferos costumam ter menor capacidade de armazenamento em comparação aos aquíferos porosos (Cardoso e Bacellar, 2023). Nesse tipo de aquífero, as águas são acumuladas através das descontinuidades das fraturas, microfraturas, diaclases, juntas e falhas

(Lousada e Campos 2011). Aquíferos cársticos são mais complexos do que os aquíferos porosos e aquíferos fraturados, tendo em vista a forma de transmissão rápida de água (Oliveira, 2024).

Os aquíferos cársticos são cavidades desenvolvidas em rochas calcárias ou dolomíticas, caracterizados também por meio da transmissão de água por condutos. Podem permitir fluxos desde laminares até turbulentos e de alta velocidade. (Vieira et al. 2020). Nesse tipo de ambiente, as águas tendem a movimentar-se rapidamente porque há grandes espaços vazios (Doerflinger e Plagnes, 2009).

O mapeamento da vulnerabilidade das águas subterrâneas, como um todo, é um processo difícil, tendo em vista a alta complexidade desses sistemas (Machiwal et al. 2018). Os processos ligados ao transporte de poluentes das águas subterrâneas ocorrem simultaneamente nos meios geológicos devido aos processos heterogêneos e anisotrópicos dos aquíferos e das grandes distâncias percorridas pelos poluentes até alcançarem o alvo (Machiwal et al. 2018). Assim, a avaliação das águas subterrâneas está diretamente ligada à previsão dos contaminantes dentro do aquífero e na rede de drenagem, inviabilizando a avaliação direta e abrangente da vulnerabilidade, haja vista a falta de dados de monitoramento, complexidade de modelagem e anisotropia inerente aos sistemas de aquíferos cársticos (Marín et al. 2021).

Banerjee et al. (2023) corrobora com a informação que a análise das águas subterrâneas em aquíferos cársticos se torna altamente dependente da previsão de comportamentos dos contaminantes dentro do sistema aquífero e da rede de drenagem associada. Isso demonstra a inviabilidade de uma avaliação direta e abrangente da vulnerabilidade devido a diversos fatores, como a escassez de dados consistentes de monitoramento, a complexidade associada aos modelos preditivos e a anisotropia natural desses sistemas hidrogeológicos (Lee et al. 2023). A heterogeneidade nas propriedades dos aquíferos cársticos, como a variação na permeabilidade e na geometria dos condutos, dificulta ainda mais a criação de modelos precisos que permitam prever com confiança a propagação de poluentes e a vulnerabilidade do aquífero como um todo (Jourde e Wang, 2023).

Mundialmente, inúmeras são as metodologias e pesquisas empregadas para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas (Ribeiro e Zorn, 2021; Jahromi et al. 2021; Marín et al. 2021; Tufano et al. 2020; Kumar e Pramod Krishna, 2020; Vogelbacher et al. 2019; Kalhor et al. 2019; Machiwal et al. 2018; Bagherzadeh et al. 2018; Kovarik et al. 2017; Iván e Mádl-Szőnyi, 2017). No entanto, são poucas as metodologias aplicadas

especificamente em aquíferos cársticos. No Brasil, esse panorama é ainda mais restrito, com poucos trabalhos publicados na área (Souza et al. 2020; Duarte e Weber, 2019; Pereira et al. 2019; Lima, 2019; Gasser et al. 2018; Jesus et al. 2018; Lenhare e Sallun, 2018; Melo, 2017; Oliveira et al. 2017; Tayer e Velásquez, 2017; Menezes Ribeiro et al. 2016; Villanueva et al. 2015; Milek et al. 2014; Dantas, 2013; Nossa et al. 2012; Viana et al. 2012).

Consequentemente, o trabalho em questão tem o propósito de dar uma visão ampliada sobre a aplicação das diversas metodologias e abordagens focadas na vulnerabilidade cárstica das águas subterrâneas brasileiras. A avaliação dos métodos existentes e suas aplicações no contexto do carste nacional contribuem para identificar as direções tomadas pelos pesquisadores brasileiros, além de apontar os métodos mais utilizados na avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos cársticos do Brasil. Destacamos ainda que os aspectos da gestão da água não são discutidos no decorrer desse estudo.

Nesse sentido, essa pesquisa irá buscar e apresentar os principais métodos/modelos utilizados nas pesquisas brasileiras para o estudo da vulnerabilidade do carste, apontando os principais parâmetros de análises referentes aos métodos utilizados.

A falta de informações adequadas sobre os métodos e modelos aplicáveis ao estudo da vulnerabilidade de aquíferos cársticos no Brasil reflete uma lacuna significativa na literatura e nas práticas de gestão de recursos hídricos subterrâneos. Embora os aquíferos cársticos sejam de extrema importância para o abastecimento de água em diversas regiões do país, a quantidade de estudos sistemáticos que tratem especificamente da vulnerabilidade desses sistemas é insuficiente. A complexidade inerente aos aquíferos cársticos, caracterizada pela alta variabilidade espacial, anisotropia e heterogeneidade hidrogeológica, dificulta a padronização de metodologias que possam ser aplicadas de forma eficaz em diferentes regiões cársticas do território brasileiro. Portanto, essa escassez de dados de monitoramento detalhado e a limitada aplicação de modelos preditivos em estudos locais, restringem o

desenvolvimento de estratégias de mitigação da contaminação. Esse cenário é agravado pela ausência de uma conexão robusta entre a academia, as agências reguladoras e os gestores ambientais, o que torna ainda mais desafiador a formulação de políticas públicas baseadas em evidências para proteger esses recursos hídricos vitais.

Dessa forma, esta pesquisa se propõe a preencher essa lacuna, ao buscar, compilar e apresentar os principais métodos e modelos utilizados em pesquisas brasileiras para o estudo da vulnerabilidade de aquíferos cársticos. Além disso, será feito um levantamento dos parâmetros de análise mais relevantes que têm sido considerados nesses estudos, oferecendo um panorama atualizado e mais detalhado sobre o estado do conhecimento da vulnerabilidade cárstica no Brasil.

Os trabalhos selecionados para compor essa revisão serão apresentados no item “métodos aplicados no Brasil”, que foram encontrados por meio de pesquisa bibliográfica realizada de forma sistemática, de modo a apresentar as produções científicas acerca da vulnerabilidade dos aquíferos cársticos brasileiros. Inicialmente, buscaram-se trabalhos publicados em revistas indexadas, principalmente aquelas que estão na plataforma da web of Science. No decorrer das buscas, verificou-se um número muito restrito de trabalhos publicados em periódicos. Por conseguinte, foi necessário atribuir a pesquisa a outras fontes, como trabalhos de teses, dissertações e publicações em congressos. A cronologia adotada considerou os trabalhos publicados até 11 (onze) anos atrás.

Vulnerabilidade atrelada à contaminação de aquíferos cársticos

Os recursos hídricos subterrâneos são naturalmente vulneráveis à contaminação, pois são frequentemente expostos através das atividades antropogênicas (Vieira et al. 2020). Além de ocorrer por processos naturais, a contaminação pode ocorrer ainda de forma direta ou indireta e por meio das atividades antrópicas (Figura 02), sendo a ação mais frequente, a combinação desses dois fatores (Figura 03), emergindo a necessidade de medidas apropriadas de proteção para estes aquíferos (Souza et al. 2020).

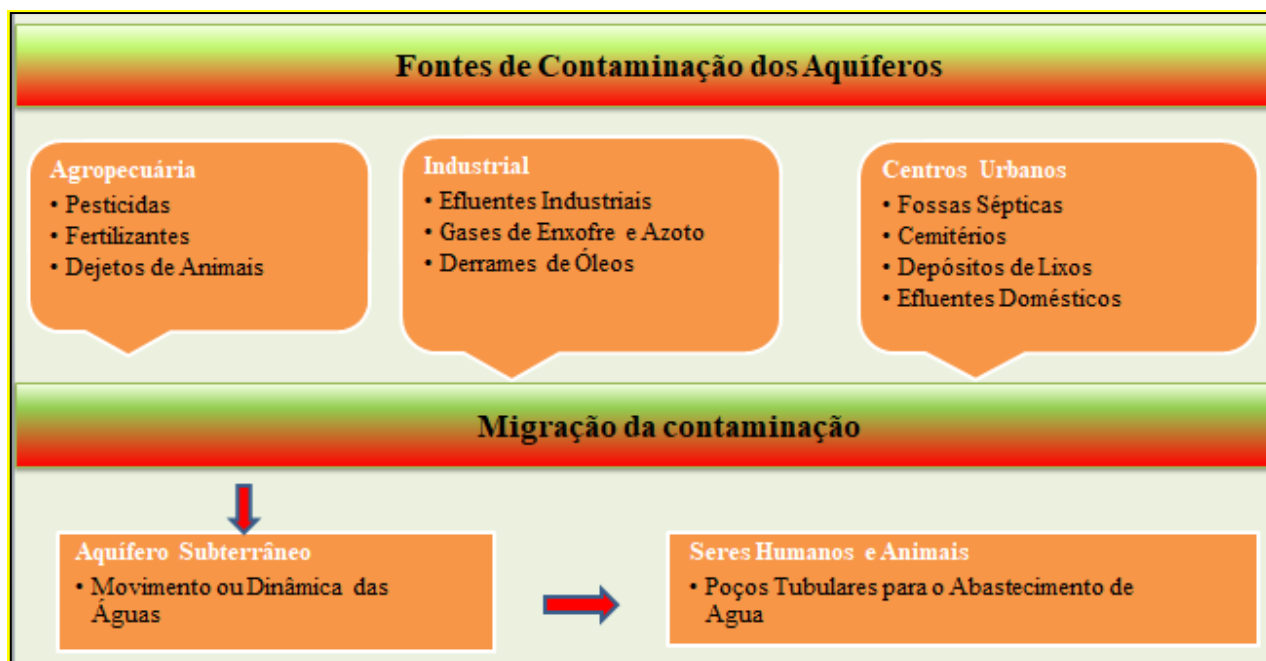


Figura 02: Fluxograma demonstrativo das diferentes fontes de contaminação e o respectivo processo de migração da contaminação.

Os aquíferos cársticos são conhecidos por apresentarem alta vulnerabilidade à contaminação, decorrente de suas características especiais, como é o caso das finas camadas de solo, da recarga pontual em dolinas, poços e cavernas, assim como os caminhos preferenciais de fluxo na zona epicárstica

e vadosa (Vogelbacher et al. 2019). Tais características possibilitam que os contaminantes cheguem facilmente às águas subterrâneas, onde são transportados rapidamente em condutos cársticos por grandes distâncias (Zwahlen, 2003).

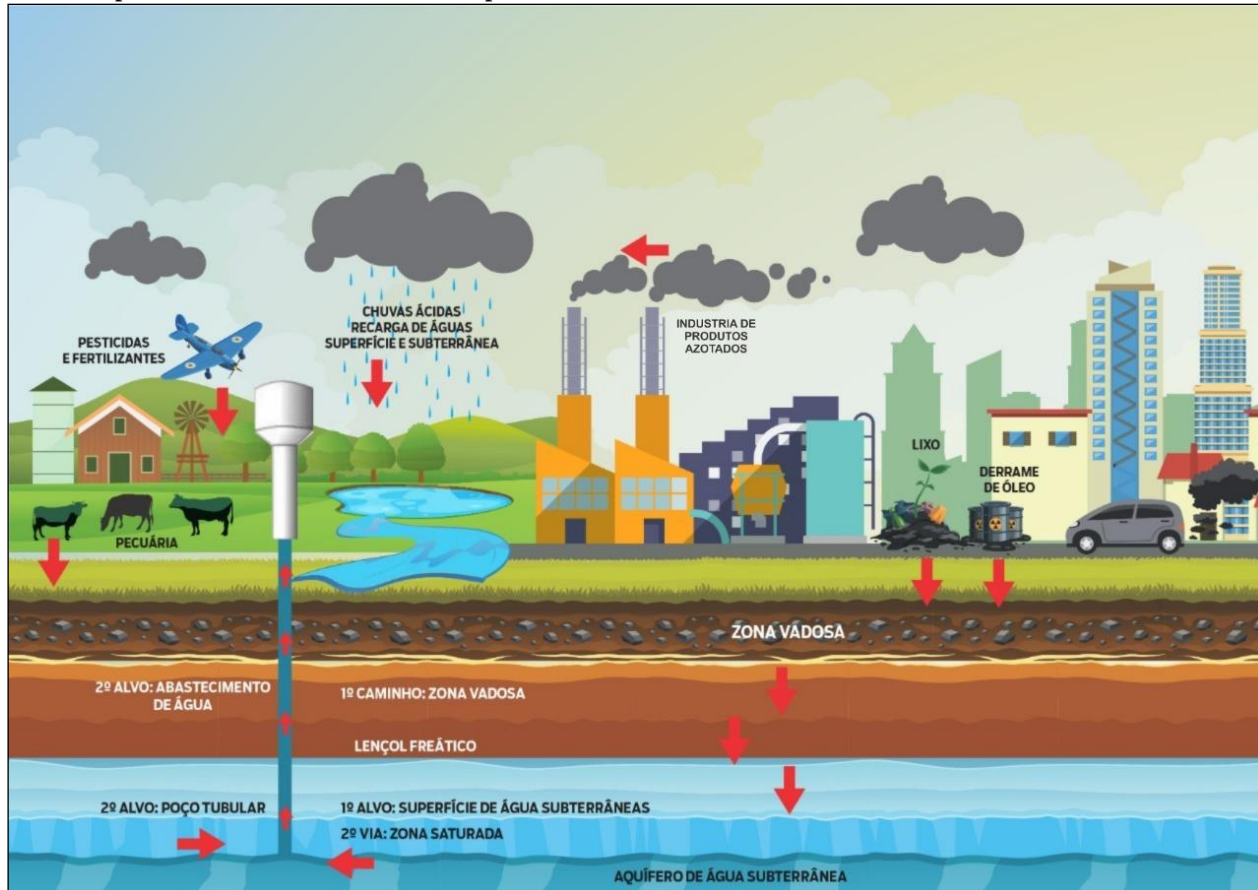


Figura 03: Esquema demonstrativo de como as atividades antropogênicas contribuem com as diferentes fontes e caminhos para a contaminação das águas subterrâneas.

O conceito de vulnerabilidade é comumente utilizado como fonte de estudo em diversas áreas do conhecimento (nas ciências sociais, humanas e exatas). Assim, sua definição pode ser compreendida em função de diversos aspectos e seus significados se apresentam em decorrência das diversas teorias (Quadro - 1). A aplicação do termo vulnerabilidade depende do contexto em que é aplicado (Hirata e Fernandes, 2008, pg. 405). Stempvoort et al. (1993) pontuam

que, no início, o termo vulnerabilidade foi utilizado sem uma definição formal, referenciando a possibilidade de um aquífero em ser poluído por um contaminante. Para Doerfliger et al. (1999), a vulnerabilidade passa obrigatoriamente pela avaliação dos atributos que necessariamente estão inclusos nas características do solo, litologia, geologia, permeabilidade e profundidade da zona saturada.

Quadro 1 - Definições utilizadas para a vulnerabilidade de aquíferos ao longo do tempo.

Conceito /Termo	Autores/Ano	Definição
Vulnerabilidade	Albinet e Margat (1970)	Proteção natural que os solos exercem para evitar a entrada de contaminantes nos aquíferos.
Vulnerabilidade	Foster (1987)	Características físicas que verificam a sensibilidade de um aquífero frente a uma carga poluente.
Vulnerabilidade	NRC (1993)	Tendência ou a probabilidade de que os contaminantes alcancem uma posição específica no sistema de águas subterrâneas.
Vulnerabilidade intrínseca	Vrba e Zaporozec (1994); Daly et al. (2002)	Susceptibilidade natural do meio biofísico e do meio ambiente hidrogeológico à contaminação, sem avaliar um contaminante específico.
Vulnerabilidade específica	Vrba e Zaporozec (1994); Daly et al. (2002)	Considera o impacto de um determinado poluente ou uso da terra.
Vulnerabilidade	Zwahlen (2003)	Características naturais do ambiente físico (hidrologia, solos, topografia, clima e vegetação) que se relacionam com o sistema em geral para definir a suscetibilidade à contaminação por atividades antrópicas, que reflete na probabilidade de perder a qualidade das águas subterrâneas. Esta definição limita-se às características intrínsecas de uma área (mecanismos e processos de atenuação natural de fluxo).
Vulnerabilidade intrínseca	Tayer e Velásques (2017).	Baseia-se no pressuposto de que o ambiente físico proporciona uma proteção natural para as águas subterrâneas a partir das atividades humanas, especialmente no que diz respeito à contaminação do meio ambiente abaixo da superfície. No entanto, as características associadas com diferentes tipos de aquíferos determinam distintos graus de vulnerabilidade.

Fonte: Adaptado de Tayer e Velásques (2017).

Métodos para a avaliação da vulnerabilidade

Diversas abordagens foram desenvolvidas com intuito de determinar a vulnerabilidade dos aquíferos, visto a abrangência dos fatores determinantes para o transporte dos contaminantes alocados na superfície ou próximo à superfície da terra (Oliveira, 2024). Estas metodologias consideram características específicas do solo, como permeabilidade e presença de camadas protetoras, que podem dificultar ou facilitar o movimento dos poluentes (Oliveira, 2024). Além disso, a avaliação leva em conta as atividades humanas que podem agravar a contaminação, como o uso excessivo de agrotóxicos e a disposição

inadequada de resíduos (Gemail e Abd-Elaty, 2023).

Essas análises auxiliam na proposta de ferramentas a serem utilizadas na gestão dos recursos hídricos, na proteção das águas subterrâneas e para o ordenamento territorial (Peixoto et al. 2020). De modo geral, a vulnerabilidade das águas subterrâneas pode ser avaliada a partir de diversos métodos. Há um consenso perante os pesquisadores mundo a fora, inclusive no Brasil, que a literatura aponta os métodos GOD, DRASTIC e SINTACS como os mais utilizados (Dantas, 2013; Peixoto et al. 2020; Kemerich et al. 2020; Kalaoum et al. 2020; Jahromi

et al. 2020). Embora alguns desses métodos eventualmente serem usados para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas em ambientes cársticos, é preciso destacar que existem alguns métodos específicos para cartografar e avaliar a vulnerabilidade nesses ambientes peculiares (Oliveira, 2024).

Nesse sentido, vários métodos foram propostos para mapear a vulnerabilidade dos aquíferos cársticos. Os mais conhecidos e usados frequentemente incluem: EPIK (Doerfliger e Zwahlen, 1998), RISKE (Pételet-Giraud et al. 2000) e RISKE 2 (Plagnes et al. 2005), PI (Goldscheider, 2005), além da abordagem eslovena (Ravbar e Goldscheider, 2007), KARSTIC (Davis et al. 2002), COP (Vias et al. 2002), método COP + K (Andreo et al. 2009) e PAPRIKA (Kavouri et al. 2011). Como resultado, em várias partes do mundo, diversas pesquisas se concentram em avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos (Ribeiro e Zorn, 2021; Jahromi et al. 2021; Souza et al. 2020; Duarte e Weber, 2019; Gasser et al. 2018; Kovarik et al. 2017; Kaliraj et al. 2015; Akpan et al. 2015; Kumar et al. 2015; Prasad et al. 2011; Jayasekera et al. 2011;). Contudo, os resultados podem variar significativamente, levando em consideração o método aplicado e a área de estudo. Consequentemente, a escolha do método apropriado depende principalmente das características específicas do local e da disponibilidade dos dados necessários para implantação da pesquisa (Lenhare e Sallun, 2018).

Na hidrogeologia, as investigações pioneiras sobre a análise da vulnerabilidade a contaminação de aquíferos teve como fonte percussora os estudos de Albinet (1963), Walker (1969), Albinet e Margat (1970), Taltasse (1972) e Zanoni (1972). A partir desses trabalhos, conceitos básicos sobre a vulnerabilidade e contaminação dos aquíferos foram determinados. Dito isso, há uma predisposição a utilizá-los como ferramentas preventivas no intuito de determinar a capacidade natural de proteção desses ambientes, assim como identificar as possíveis áreas que devem receber medidas preventivas e mitigatórias para atenuar o perigo de contaminação frente às atividades antrópicas.

Civita e De Maio (1997) e Vrba e Zaporozec (1994) classificam a vulnerabilidade em intrínseca ou natural, como aquela que pode avaliar os condicionantes ligados à geologia, hidrogeologia, condições climáticas e biológicas; e específica, que permite analisar o impacto provocado por um contaminante no ambiente. A grande complexidade dos ambientes fluviocársticos faz com que cada ambiente seja único, dificultando

excessivamente a aplicação dos métodos de modelagem para classificar a vulnerabilidade em que os aquíferos se encontram (Rodrigues et al. 2023). Todas essas características intrínsecas e peculiares dos ambientes cársticos, considerando também sua anisotropia, requerem a utilização de métodos específicos para avaliação da vulnerabilidade em aquíferos localizados em ambientes cársticos (Pereira et al. 2019).

Resultados

Sínteses dos Métodos encontrados no decorrer dessa pesquisa

Apesar do relevo brasileiro possuir grandes extensões de ambientes carstificados, os estudos acerca da vulnerabilidade desses ambientes ainda são incipientes e embrionários, haja vista a grande dificuldade de encontrar trabalhos publicados em periódicos que tratam do assunto. Essa deficiência pode ser melhor demonstrada observando o Gráfico 1 e o Quadro 2 que evidenciam os métodos utilizados nas pesquisas do carste brasileiro. Observa-se também que há uma tendência nas pesquisas brasileiras em utilizar metodologias que não são consideradas apropriadas para avaliar a vulnerabilidade de ambientes cársticos, como é o caso dos métodos DRASTIC, GOD SINTACS e MAIA.

O modelo DRASTIC, proposto por Aller et al. (1987), tem como propósito efetuar a classificação hierárquica dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero, tais como profundidade da água, recarga, litologia, tipo de solo, topografia, textura da zona vadosa e condutividade hidráulica do aquífero (DUARTE; Weber, 2019). Esse método é mais utilizado em áreas de culturas com uso intensivo de agrotóxicos, que culminam com o aumento dos riscos de contaminação do aquífero por pesticidas (Aller et al. 1987). A quantidade de parâmetros utilizados dificulta o uso do método por falta de informações primárias na área estudada (Babiker et al. 2005). O método GOD, desenvolvido por Foster (1987), analisa as atividades instaladas no ambiente. O autor afirma que o perigo da contaminação se relaciona diretamente com a interação entre a intensidade da carga antrópica e a vulnerabilidade do aquífero.

Quadro 2 - Métodos utilizados para a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas e suas modificações na literatura

Estado Brasileiro	Autores com trabalhos no Brasil	Método de avaliação da vulnerabilidade	Nome do Aquífero	Autores dos métodos originais Referências
BA	Nossa et al. (2012)	COP	Aquífero Cárstico Salitre	Vías et al. (2002)
BA	Villanueva et al. (2015)	COP	Aquífero Cárstico Salitre	Vías et al. (2002)
BA	Melo (2017)	GOD	Aquíferos Cársticos das Bacias Hidrográficas dos Rios Verde, Jacaré e Salitre, Bahia	Foster et al. (1987)
		EPIK		Doerfliger e Zwahlen (1998)
BA	Gasser et al. (2018)	COP	Aquífero Cárstico Salitre	Vías et al. (2002)
BA	Jesus et al. (2018)	PI	Aquífero Cárstico Bambuí	Goldscheider et al. (2000)
		COP		Vías et al. (2002)
BA	Lima (2019)	COP	Aquífero cárstico Salitre na Bacia Una-Utinga (BUU)	Vías et al. (2002)
		PI		Goldscheider et al. 2000
MG	Viana et al. (2012)	DRASTIC	Região cárstica da Província Hidrogeológica do São Francisco	Aller et al. (1987)
MG	Tayer e Velásques (2017)	COP	Aquífero cárstico na Unidade de Proteção Ambiental do Carste Lagoa Santa	Vías et al. (2002)
MG	Pereira et al. (2019)	EPIK	Aquífero cárstico na Unidade de Proteção Ambiental do Carste Lagoa Santa	Doerfliger et al. (1998)
MG	Duarte e Weber (2019)	DRASTIC	Aquífero cárstico de Vespasiano	Aller et al. (1987)
MG	Souza et al. (2020)	COP	APA Carste Lagoa Santa	Vías et al. (2002)
MG	Souza (2020)	COP	APA Carste Lagoa Santa	Vías et al. (2002)
		COP-SOLO		Souza (2020)
SE	Dantas (2013)	GOD	Aquífero Taquari/Maruim	Foster et al. (1987)
		DRASTIC E DRASTICP		Aller et al. (1987)
		MAIA		Maia e Cruz (2010)
SE	Menezes Ribeiro et al. (2016)	EPIK	Aquíferos cársticos Sapucari e Maruim	Doerfliger et al. (1998)
PR	Milek et al. (2011)	SINTACS	Aquífero cárstico de Almirante Tamandaré	Civita e De Maio (1997)
PR	Milek et al. (2014)	DRASTIC	Aquífero cárstico de Almirante Tamandaré	Aller et al. (1987)
		SINTACS		Civita e De Maio (1997)
SP	Lenhare e Sallun (2018)	EPIK	(Não é Aquífero) Parque Estadual de Intervalos	Doerfliger et al. (1998)
		KDI		Van Beynen et al. (2012)
ES	Xavier et al. (2012)	GOD	Aquífero Cárstico Gruta do Limoeiro	Foster et al. (1987)
TO	Oliveira et al. (2017)	GOD	Vulnerabilidade natural das águas subterrâneas da região de Lagoa da Confusão	Foster et al. (1987)

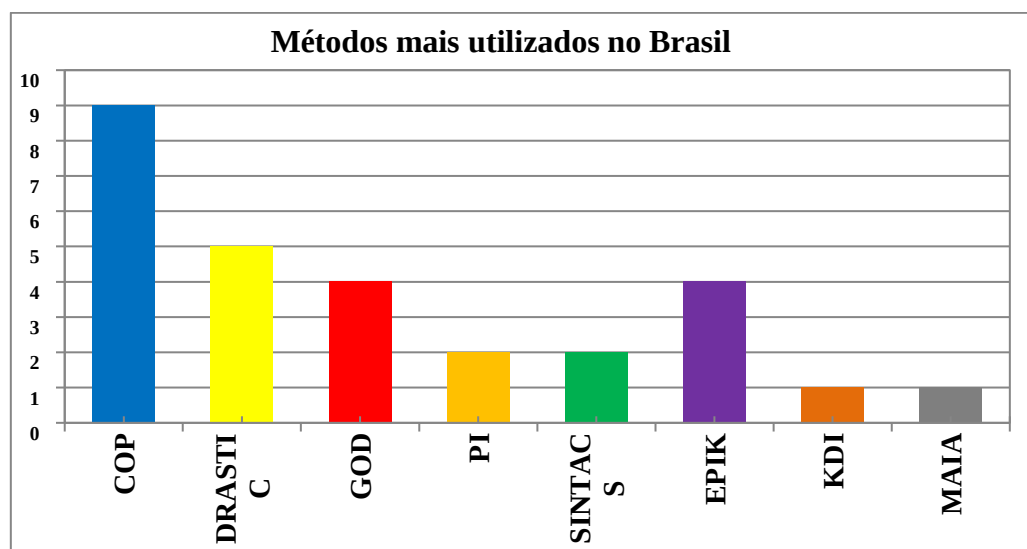


Gráfico 1 - Indicação dos métodos aplicados em pesquisas brasileiras para mapeamento e avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas em ambientes cársticos.

O método GOD tem sido bastante utilizado em regiões com ausência de informações preliminares. Entretanto, esse método necessita que os dados para as análises estejam bem distribuídos espacialmente (Gogu; Dassargues, 2000). Para determinar a capacidade de atenuação e a inacessibilidade hidráulica dos poluentes, o método GOD considera a utilização de três parâmetros: 01 - Ocorrência de águas subterrâneas; 02 - Litologia geral do aquífero e 03 - Profundidade do nível d'água do aquífero (Peixoto et al. 2020).

O método SINTACS, proposto por Civita e De Maio (1997), tem como objetivo identificar a vulnerabilidade intrínseca e natural do aquífero. Para determinar a vulnerabilidade do aquífero, o SINTACS trabalha com a combinação dos seguintes parâmetros: profundidade da água subterrânea, tipo de solo, infiltração, características do aquífero, litologia, condutividade e topografia. Tais parâmetros estão associados com o transporte do contaminante no meio geológico (Milek et al. 2014; Peixoto et al. 2020; Tufano et al. 2020). Para análise desses parâmetros, os pesos e os intervalos devem ser definidos previamente (Tufano et al. 2020).

O método MAIA foi proposto por Maia e Cruz (2011) e é utilizado para mensurar a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos; possuiu características paramétricas, tendo em vista a utilização de expressão matemática, onde cada parâmetro se relaciona direta ou inversamente com a vulnerabilidade (Dantas, 2013). As variáveis definidas para verificar a vulnerabilidade no que tange à relação inversa foram: profundidade da água, espessura do solo e declividade do terreno. Referente à relação direta foram: capacidade

específica, transmissividade do aquífero, recarga potencial e densidade de fraturas (Maia e Cruz, 2011).

O método COP, proposto por Vías et al. (2002), é utilizado para o estudo e a cartografia da vulnerabilidade de aquíferos cárstico à contaminação. Para a aplicação do método, três fatores devem ser considerados: concentração do fluxo (C), camadas de proteção (O) e precipitação (P) (Gasser et al. 2018). O método KDI foi desenvolvido por Van Beynen et al. (2012), sendo utilizado para efetuar avaliação do sistema cárstico, em que abrange questões sociais, ambientais, naturais e econômicas (Lenhare e Sallun, 2018). O Karst Disturbance Index (KDI) é um método confeccionado a partir de uma visão holística e abordagem sistêmica. É aplicado para medir o grau de perturbação antrópica provocada em ambientes cársticos (Van Beynen et al. 2012). Esse índice requer informações sobre cinco categorias: geomorfologia, hidrologia, biota, atmosfera e fatores culturais (Ribeiro e Zorn, 2021). O método EPIK, proposto por Doerfliger et al. (1998), tem sua aplicação voltada para planejamento de uso e ocupação do solo, sobretudo para proteção de áreas de captação, representado por um índice de proteção final, que é classificado em zonas S1, S2 e S3, sendo a S1 a zona mais protegida (Lenhare e Sallun, 2018; Pereira et al. 2019).

O método PI, conhecido como o primeiro método semi-quantitativo para carste, é baseado em dois parâmetros (Goldscheider et al. 2000). O fator P - proteção - diz respeito à função protetora das camadas entre a superfície do solo e o lençol freático do aquífero (solo, subsolo, rocha não cárstica, rocha cárstica insaturada). A existência de

epicarste é assumida se as condições forem favoráveis ao seu desenvolvimento, mesmo na ausência de características cársticas visíveis (Iván e Mádl-Szőnyi, 2017).

Já o fator I - infiltração - implica na vulnerabilidade resultante do desvio da cobertura protetora pelo fluxo lateral da superfície e subsuperfície (Marín et al. 2021). A avaliação do fator I baseia-se na determinação do fator processo de fluxo relevante, como infiltração difusa, fluxo

superficial ou fluxo subsuperficial (Marín et al. 2021). É deduzido da condutividade hidráulica do solo superficial e da profundidade para camadas com baixa permeabilidade (Iván e Mádl-Szőnyi, 2017). Além disso, o gradiente da encosta, a cobertura vegetal e o mapa de captação de superfície são levados em consideração (Goldscheider et al. 2000). Nesse sentido, o Quadro 3 apresenta de forma sintetizada quais são os parâmetros cobertos por cada método.

Quadro 3 - Parâmetros cobertos por cada método.

Método/fatores	DRASTIC	PI	GOD	MAIA	COP	EPIK	KDI	SINTACS
Hidrogeologia	X	X	X	X		X	X	X
Epicarste		X				X	X	
Social e econômico							X	
Lençol freático	X		X	X	X	X	X	X
Rede cárstica	X					X	X	
Rede de drenagem	X	X		X	X	X	X	
Topografia	X	X		X	X	X	X	X
Uso do solo		X			X	X	X	X
Vegetação		X					X	
Zonas de recarga	X	X	X	X		X	X	X

Fonte: Adaptado de Lenhare e Sallun (2018).

Análise dos Métodos aplicados para a avaliação da vulnerabilidade do carste brasileiro

Em solo brasileiro, a maior parte dos maciços carbonáticos são originários do Neoproterozoico e ocupam uma área estimada entre 5 a 7% do território nacional (Karmann, 1994). Estudos pioneiros sobre carste no Brasil foram conduzidos por Karmann e Sanchez (1979) e identificaram cinco regiões favoráveis ao desenvolvimento de feições cársticas. Província I - Vale do Ribeira, Província II – Bambuí, Província III - Serra da Bodoquena, Província IV - Alto Paraguai e, por fim, Província V - Chapada da Ibiapaba.

Apesar das grandes extensões de relevos cársticos no Brasil, os estudos acerca do mapeamento da vulnerabilidade em aquíferos cársticos são ainda embrionários. Essa falta de publicações acerca dessa temática ficou evidenciada no decorrer da presente pesquisa, como demonstrado no Gráfico 1 e Quadro 2. Por outro lado, observa-se que os modelos aplicados nas pesquisas brasileiras para avaliação da vulnerabilidade são mais voltados para o estudo das águas subterrâneas no geral. O quadro 2 sintetiza os poucos estudos referentes à avaliação da vulnerabilidade cárstica em solo brasileiro, informando o estado onde a pesquisa foi desenvolvida, os autores do estudo, o modelo utilizado e o aquífero avaliado.

Dentre os estados brasileiros onde as pesquisas foram desenvolvidas, destacam-se os estados da Bahia e de Minas Gerais, nos quais aconteceu o maior número de trabalhos referente à avaliação da vulnerabilidade cárstica. Os outros estados na sequência são Sergipe, Paraná, São Paulo, Espírito Santo e Tocantins. Os outros estados brasileiros não aparecem na pesquisa, o que se deve ao fato de não ter sido localizada nenhuma publicação da temática em seus domínios. O método mais utilizado foi o COP, desenvolvido por Vias et al. (2002).

Concernente ao estado de Bahia, Nossa et al. (2012) utilizou o método COP para determinar a vulnerabilidade do Aquífero Cárstico Salitre na região de Irecê-BA. A área pesquisada contém aproximadamente 250 km² de extensão, envolve os municípios de Irecê e Lapão. A litologia é constituída de maciços carbonáticos da formação Salitre, contém feições geomorfológicas em estado avançado de carstificação, zonas com índice elevado de fraturamento e reservatórios de grandes expressividades no que se refere à circulação das águas subterrâneas. Os mapas temáticos desenvolvidos foram: mapa hidrogeológico, mapa de dolinas e fraturas, mapa de declividade e mapa de uso e ocupação do solo. O cruzamento das informações cartográficas possibilitou a confecção do mapa final da vulnerabilidade intrínseca à contaminação da área pelo método COP.

A metodologia aplicada delimitou três tipos de classes de vulnerabilidade: baixa (40%), moderada (53%) e alta (7%). O fator (C) foi o que mais impactou na geração dos índices devido à influência das feições de recarga direta (dolinas e sumidouros), distinguindo classes de vulnerabilidade muito alta e moderada. O fator (O) atua em toda a área, inclusive nas zonas situadas em áreas não carstificadas, delimitado com classe de vulnerabilidade baixa. O fator (P) manteve-se constante em toda a área de estudo, de modo a não contribuir diretamente para o delineamento da vulnerabilidade do aquífero.

Outro estudo efetuado no Aquífero Cárstico Salitre, utilizando o método COP para avaliar a vulnerabilidade intrínseca do aquífero, foi a Pesquisa de Villanueva et al. (2015). As porções das amostras de solos foram coletadas a 50 cm de profundidade, em que foi analisada a granulometria como parâmetro de entrada no método COP. O mapa hidrogeológico foi efetuado com auxílio de dados de 36 poços tubulares, nos quais foi verificado seu nível estático. Os mapas de dolinas e fraturas foram confeccionados a partir da imagem ALOS com resolução de 10m x 10m. O mapa de declividade foi confeccionado com base na imagem do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), juntamente com as informações obtidas por meio dos trabalhos de campo.

O mapa final de vulnerabilidade intrínseca à contaminação foi gerado com o cruzamento e ponderações dos subprodutos gerados previamente (mapa hidrogeológico, mapa de dolinas e fraturas, mapa de declividade e mapa de uso e ocupação dos solos). A avaliação final identificou a vulnerabilidade intrínseca à contaminação, dividida em três classes: baixa (40%), moderada (53%) e muito alta (7%). A classe muito alta de vulnerabilidade mapeada foi novamente atribuída ao fator (C), que elevou a classe influenciada pelas feições cársticas. Os fatores (O) e (P) não contribuíram significativamente para o aumento da vulnerabilidade, tendo em vista que as pequenas variações em ambos os fatores foram constantes devido ao tamanho da área e presença de apenas uma estação climatológica, localizada na cidade de Irecê.

Outra pesquisa que utilizou o método COP foi o estudo de Gasser et al. (2018), cujo objetivo principal foi a avaliação da vulnerabilidade à contaminação natural do aquífero cárstico Salitre, localizado na região central do Estado da Bahia. Para caracterização do estudo, os autores usaram dados hidroquímicos, hidrodinâmicos e estatísticos. As porções de águas foram coletadas em poços tubulares, situados dentro da área de estudo para extração dos parâmetros físicos e químicos das

águas, tais como PH, condutividade elétrica, temperatura, turbidez, entre outros. A cobertura vegetal da área foi obtida através de imagens de satélites e a declividade foi extraída com o uso de imagem SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

Os autores pontuam que a área possui grandes extensões de carstificação, com presença em larga escala de dolinas de tamanhos variados e presença de vegetação densa. O estudo apontou basicamente duas classes de vulnerabilidade: uma baixa, encontrada em mais de 54% da área, e outra moderada, encontrada em mais de 32% da área. Eventualmente, os resultados encontrados devem estar atrelados à declividade muito baixa da área, visto que a baixa declividade não possibilita o carreamento dos sedimentos químicos e físicos para o interior das cavernas e, consequentemente, não contribui para a contaminação das águas subterrâneas. No presente estudo, os autores Gasser et al. (2018) não efetuaram a caracterização antropogênica, também não levaram em consideração que as ações do homem podem e devem ser consideradas como fonte principal, capazes de alterar o meio ambiente, o que faz com que a contaminação dos aquíferos aconteça de forma mais acelerada e incisiva.

Jesus et al. (2018) aplicaram os métodos PI e COP para cartografar e avaliar a vulnerabilidade do Aquífero Cárstico Bambuí, na bacia hidrográfica do baixo Rio Corrente, na região oeste da Bahia. A bacia está distribuída em arenitos do Grupo Urucua, carbonatos e pelitos do Grupo Bambuí. O Grupo Bambuí, devido a sua formação geológica, possibilitou a formação de aquíferos cársticos, com presença de estrutura como falhas, fraturas e dobramentos que contribuem para formação de feições cársticas, como sumidouros e dolinas. A maior parte da poligonal está assentada em área rural com alguns núcleos urbanos. As principais fontes poluentes para água subterrânea estão associadas à expansão urbana que favorece o aumento de efluentes domésticos e ao crescimento das atividades agropecuárias.

O método PI apresentou classes de vulnerabilidade baixa, moderada, alta e extrema. As regiões que apresentaram vulnerabilidade baixa são atribuídas ao alto grau de proteção da cobertura. A baixa vulnerabilidade (41,01%) foi atrelada às coberturas e aos depósitos aluvionares, ao Subgrupo Paraopeba e à Formação Sete Lagoas, onde situam os Latossolos. A classe de vulnerabilidade moderada (56,51%) está relacionada ao Grupo Urucua, Lagoa do Jacaré, Serra de Santa Helena e Serra da Saudade. As áreas de alta (2,38%) e extrema vulnerabilidade (0,11) referem-se às formações Lagoa do Jacaré e Serra da

Saudade, em que o processo de carstificação é mais intenso.

A pesquisa de Jesus et al. (2018) apontou ainda, conforme metodologia COP, que a vulnerabilidade muito alta (1,83%) se limita às áreas da Formação Sete Lagoas, ocorrendo nesse local uma alta redução da proteção C. A proteção do fator O foi apontada como moderada e a precipitação P é de moderada a alta. A alta vulnerabilidade (15,27%) está ligada às Formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré, que apresentam características mineralógicas com maior índice carbonático dentro do Grupo Bambuí. As áreas de vulnerabilidade moderada (22,92%) correspondem ao Grupo Paraopeba, ao Grupo Urucuia. Referente à vulnerabilidade baixa (58,71%), apontada pelo método COP, foi mapeada dentro do Grupo Urucuia, junto às Formações Serra de Santa Helena, Serra da Saudade e às rochas cristalinas da área. A vulnerabilidade muito baixa (1,27%) corresponde a uma pequena faixa do cristalino e às áreas das bacias de recargas, junto aos sumidouros.

Os resultados apontaram que, embora ambos os métodos compartilhem de parâmetros semelhantes, os resultados são distintos, apesar das áreas de maior vulnerabilidade estarem atreladas às unidades carbonatadas do Grupo Bambuí, Formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré. Coincidem, também, nas áreas de maior desenvolvimento do carste, em locais de cavernas, sumidouros e afloramentos de calcário. A autora chama atenção para a vulnerabilidade muito baixa, haja vista que o método PI não apresenta esse tipo de vulnerabilidade, o que, segundo Jesus et al. (2018), é uma realidade dos aquíferos cársticos. No entanto, o método COP apresentou essas áreas de vulnerabilidade baixa nas áreas de recarga dos sumidouros e nos vales cegos. Tal resultado, na percepção da autora, é incoerente. Ela justifica ainda que o resultado de vulnerabilidade baixa apontada pelo método COP se deve provavelmente pela falta de dados específicos e detalhes da área. Conclui ainda que os dados seriam mais fidedignos e precisos em uma área que dispusesse de maior detalhamento dos dados, principalmente em áreas no qual o carste é mais desenvolvido.

Outro estudo que também aplicou o método COP e PI foi à pesquisa de Lima (2019). A área do estudo também foi o Aquífero Cárstico Salitre na Bacia Una-Utinga (BUU), com área 5.026 km², localizado no Estado da Bahia. A área da pesquisa é delimitada pelo polígono das secas, possui clima de transição do tropical-úmido ao semiárido.

Pedologicamente, a área é diversificada por Argissolos, Cambissolos, Latossolos e Neossolos. No contexto geomorfológico, a área está inserida entre os relevos tabulares sobre as rochas calcárias

do Grupo Bambuí ou o Grupo Una. Geomorfologicamente, situa-se junto ao Pediplanos Carstificados, abarcando regionalmente dois setores que abrangem a parte leste da Chapada Diamantina.

Para determinação da vulnerabilidade utilizando o método COP, confeccionou-se um mapa de feições cársticas com dados interpretados nas imagens de satélites. A declividade foi determinada a partir da imagem ASTER-GDEM. Para analisar os parâmetros que correspondem à proteção do aquífero, foi confeccionado mapa de solos. A espessura dos solos foi obtida a partir dos perfis litoestratigráfico dos poços tubulares da área de estudo. A precipitação e distribuição temporal das chuvas foram determinadas com os dados do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET.

Concernente ao método PI, utilizou-se na determinação do fator P, mapas de solos, dados de recarga, mapa geológico, mapa de feições cársticas e a espessura das camadas, determinadas a partir dos perfis litológicos dos poços tubulares. Referente ao fator I, utilizou-se a condutividade do solo, mapa de declividade, mapa de uso e ocupação do solo e mapas de feições cársticas para identificação das áreas de superfície de recarga, ou captação e dos sumidouros.

Como já descrito anteriormente, o mapa cartográfico de vulnerabilidade final, obtido através do método COP, é o resultado do cruzamento dos produtos C, O e P. A pesquisa de Lima (2019) determinou 5 classes de vulnerabilidade, variando de muito baixa até a muito alta vulnerabilidade. Portanto, as áreas com maior vulnerabilidade implicam em uma menor proteção ao aquífero. O método COP apurou que, nas ilhas cársticas-Ilc e na Unidade Geológica Nova América, encontram-se os maiores índices de vulnerabilidade para o sistema aquífero da BUU.

Por outro lado, o mapa cartográfico de vulnerabilidade final, obtido com o método PI, delimitou quatro classes, variando de baixa a muito alta vulnerabilidade, mapeadas respectivamente na Formação Bebedouro e Unidade Nova América Lapão e baixo na Unidade Gabriel/Nova América.

Comparativamente, os dois métodos aplicados, compartilhando dos mesmos dados, obtiveram ao mesmo tempo, similaridade e discrepância entre os métodos aplicados na BUU. O método COP apontou vulnerabilidade baixa para a formação Bebedouro, enquanto o método PI descreve essa localidade com vulnerabilidade média. Nas Ilc, o método COP apresentou vulnerabilidade muito alta. O método PI, não apresentou opção para o uso das Ilc. Relacionado às áreas de recargas dos sumidouros, os dois métodos

foram coerentes, visto que ambos as classificaram como vulnerabilidade muito alta.

A autora concluiu que o método PI, por ser mais generalista na inserção dos dados, apresentou-se menos aceitável em seus resultados, enquanto o mapa de vulnerabilidade COP exibiu respostas mais assertivas e condizentes com a realidade da área.

No tocante ao estado de Minas Gerais, a pesquisa pelos estudos referentes à vulnerabilidade nos domínios cársticos identificou as pesquisas de Viana et al. (2012), Tayer e Velásques (2017), Duarte e Weber (2019), Souza et al. (2020), Souza et al. (2020).

Viana et al. (2012) aplicaram o método DRASTIC para avaliar a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas à contaminação por agrotóxico e fertilizantes agrícolas no campo de atuação da Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas - MG. A poligonal verificada se posiciona no carste da Província Hidrogeológica do São Francisco. Com o reconhecimento in loco da área estudada, delimitaram-se os pontos de interesse como nascentes, lagos, cursos hídricos, poços tubulares, rochas aflorantes e áreas de lavouras. Por meio da sondagem, efetuou-se a descrição do perfil do solo e determinou-se a profundidade do nível freático. Para medir a infiltração da água, usou-se o permeâmetro de Guelph. Com o monitoramento dos poços tubulares, foi possível conhecer a profundidade do nível estático e dinâmico e a qualidade da água dos poços da região estudada.

O mapa inicial da vulnerabilidade foi executado por meio de álgebra de mapas, utilizando o software ArcGIS. Com as informações delimitadas, realizou-se o cruzamento dos mapas para obter as classes de vulnerabilidade. O mapa final da cartografia da vulnerabilidade foi determinado em cinco classes: baixa, moderada, alta, muito alta e extrema. Os resultados apontaram para uma predominância de vulnerabilidade alta em maior parte da área (34,14%), seguida por muito alta (30,20%) moderada (20,92%), extrema (13,58%) e baixa (1,17%).

Outro estudo que aplicou o método DRASTIC foi a pesquisa de Duarte e Weber (2019). A área da pesquisa está localizada na região de Vespasiano-MG. Trata-se de uma área onde há grande especulação imobiliária devido ao intenso adensamento populacional, áreas urbanizadas e interesse econômico, além de espaços industrializados, preenchidos por cultivos diversos e atividade minerárias. A população da região é abastecida basicamente por águas subterrâneas, fornecida pela companhia de abastecimento de Minas Gerais – COPASA e poços tubulares, perfurados em domicílios particulares e nas áreas de indústrias.

Os dados referentes à profundidade do lençol freático foram determinados a partir de medições do nível estático, disponibilizado nos memoriais dos poços tubulares cadastrados no banco do SIAGAS. Os valores referentes à profundidade do lençol freático variam de 1 a 15 metros; já a recarga foi encontrada usando o método de Kessler (1957). O material do aquífero foi determinado por meio dos perfis dos poços tubulares. O mapa de solos e suas características foram confeccionados com base no trabalho de Shinzato (1998) e o mapa de declividade da área indicou cinco classes de declividade. A representação do material da zona vadosa foi confeccionada com base nas descrições dos perfis dos poços tubulares e correlacionada com a litologia da área onde os poços estão situados.

O mapa final com a aplicação do método DRASTIC gerou um agrupamento de quatro classes de vulnerabilidade: baixa, moderada, alta e muito alta. As classes que predominam na área de estudo é a de vulnerabilidade moderada, seguida pela vulnerabilidade baixa. As classes de vulnerabilidade muito alta e alta ocorrem principalmente em função ao adensamento populacional nas áreas urbanizadas.

O método COP foi aplicado pelos autores Tayer e Velásques (2017), tendo como objetivo a produção de um mapa de vulnerabilidade intrínseca do aquífero cárstico (escala 1: 50.000) como subsídio ao estabelecimento de uma rede de monitoramento a ser testada na APA Carste Lagoa Santa, Minas Gerais. Os autores utilizaram os dados de níveis estáticos de 170 poços tubulares, em que avaliou-se a litologia e profundidade de cada poço. Também foram feitas análises granulométricas do solo e utilizados dados de precipitação, altimetria e uso do solo. Após o processamento de todas as informações, foi compilado um mapa final, mostrando as cinco classes de vulnerabilidades encontradas na área de estudo: muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta. As atividades econômicas com maior interferência antrópica apontadas nos estudos foram: extração de calcário, indústria de cimento, o aeroporto de Confins, desmatamentos para uso do solo na agricultura, pecuária, crescimento das áreas urbanas, lançamentos no solo de efluentes e resíduos sólidos, fertilizantes e pesticidas.

Os resultados produzidos na pesquisa de Tayer e Velásques (2017) retratam a importância da aplicação do método COP, visto que os resultados de forma geral se apresentaram satisfatórios. No entanto, há pontos específicos que requerem uma análise mais profunda, como é o caso do fator solo, determinante na avaliação do fator (O). Ele varia de 0 até 1m de profundidade, sendo dividido pela

textura. Isso posto, na APA do Carste de Lagoa Santa, encontram-se solos muito profundos, retratando o papel importante da pedogênese para a redução da vulnerabilidade. As áreas tidas como altamente vulneráveis a contaminação, ocorrem em locais caracterizados por zonas de feições cársticas onde ocorre a recarga direta do sistema (cavernas, sumidouros, vales cegos, lagoas desenvolvidas sob dolinas).

Já as áreas caracterizadas com alta vulnerabilidade, e que também estão sob influências das feições carstificadas, recebem recargas diretas, porém em menor escala. As áreas caracterizadas com vulnerabilidades moderadas, que incidem em mais de 58% da área, são cobertas com calcários, solos espessos e planícies de inundação. As áreas tidas como muito baixas à vulnerabilidade estão recobertas principalmente por rochas pelíticas da Formação Serra de Santa Helena.

Souza et al. (2020) desenvolveram um estudo em parte da APA Carste Lagoa Santa, além de extensões a norte, noroeste e sul dessa região para demonstrar como a diferença de espessura de solo encontrada entre o carste europeu mediterrâneo e o tropical úmido impacta no resultado da aplicação da metodologia COP. Na área de estudo, foram encontrados Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Gleissolos. Os Latossolos, em conjunto com os Cambissolos, cobrem grande parte da área, seguidos por Argissolos e Gleissolos. O mapa de proteção foi elaborado com base nos dados de espessuras dos solos, caracterizados a partir dos perfis constitutivos de poços tubulares profundos. A textura do solo foi determinada pelo método de pipeta, os testes de infiltração foram executados por meio de permeâmetro de Guelph.

Souza et al. (2020) pontuam que os solos mediterrâneos europeus das áreas cársticas apresentam espessuras de solo abaixo de 1,0 m, diferentemente dos solos encontrados na área de estudo, que apresenta solos com espessuras superiores a 1,0 m e textura > 30% de argila. Nesse sentido, foram feitas diferentes simulações do mapa de proteção com o intuito de avaliar o grau de proteção dos diferentes níveis de espessura do solo. A simulação permitiu verificar que a extrapolação, ou seja, a multiplicação por 10 de cada faixa de espessura do subfator solo ocorre à modificação da proteção alta para moderada. Ao repetir o processo, multiplicando por 20, não há alteração significativa. No entanto, quando as multiplicações são efetuadas por valores maiores, 30 ou 40 vezes, há uma modificação mais acentuada da proteção alta para moderada, com exceção para as áreas onde ocorrem

os afloramentos, ou seja, a cobertura zero do solo proporciona proteção baixa.

No estudo em si, não houve apontamento das classes de vulnerabilidades, mas sim dos valores de proteção oferecida pelo fator solo. Notadamente, a simulação demonstrou que a aplicação do método COP original na área de estudo mostrou-se inconsistente, tendo em vista as características do carste encoberto por espessa camada de solo da área de estudo quando comparado com o carste mediterrâneo europeu fonte da metodologia COP. No método original, o subfator litológico é mais significativo que subfator solo quando observado o oposto para o carste tropical úmido. Segundo a pesquisa de Souza et al. (2020), ficou evidenciado que, para a aplicação do método COP, o mesmo necessita de modificações, principalmente no que se refere à espessura do solo.

Souza (2020), em sua Tese de Doutorado, propôs uma nova configuração para o método COP. Tendo em vista que Souza et al. (2020), na pesquisa anterior, apontou para a necessidade de modificação do método COP original, para que fosse possível aplica-lo em estudo de vulnerabilidade das águas subterrâneas em clima tropical úmido, o autor propôs uma alteração no modelo original, ao qual denominou-se COP - SOLO. A Tese de Doutorado de Souza (2020) teve como objetivo propor o método COP-Solo, considerando o “fator O”, uma vez que a condição tropical do carste de Lagoa Santa se equipara às condições de outros ambientes cársticos, facultando a utilização do método em outros estudos em que as características físicas sejam equivalentes.

Para atenuar potenciais fontes de contaminação da zona de aeração, mais especificamente na camada de solo, o método COP-Solo propôs utilizar o índice de atenuação natural – IAN. O índice em questão tem como objetivo alterar o critério de análise da camada do solo do método COP. A espessura da camada do solo, junto com a condutividade hidráulica, são parâmetros de análise pelo IAN da condição aparente em que uma pluma pode atingir a zona vadosa (Souza, 2020). A mineralogia apresentada pela relação da caulinita/óxidos, junto com o pH e a espessura dos solos, são variáveis analisadas que recebem maiores pesos pelo IAN (Souza, 2020).

O mapa de espessura do solo foi confeccionado baseado nos perfis litológico dos poços tubulares e de pontos de coletas de amostras. Dessa forma, gerou-se também o mapa de espessura da zona de aeração do qual, subtraindo do mapa espessura do solo, chegou-se à espessura de rocha presente na zona vadosa. Os mapas preliminares possibilitaram a determinação dos parâmetros

necessários para confecção do mapa do fator (O), tanto para o método original quanto para o método modificado. Outros mapas preliminares produzidos para análise da vulnerabilidade foram os mapas de declividade e uso e ocupação do solo que originaram o mapa do fator (C), da intensidade da precipitação, fator (P).

Os mapas finais produzidos para retratarem a cartografia da vulnerabilidade da área de estudo, tanto no método COP original quanto no método COP-Solo, apresentaram resultados bem distintos, com significativas diferenças, em todas as cinco classes de vulnerabilidade. Souza (2020) confeccionou dois mapas cartográficos da vulnerabilidade intrínseca da área de estudo, um com o método COP original e outro com o método COP-Solo, tendo como distinção do método original o índice de atenuação natural. Dessa maneira, foi possível efetuar uma análise comparativa entre os resultados apontados entre as duas metodologias.

A classe de vulnerabilidade muito alta, segundo o método COP original foi de 0,04% do total da área, enquanto que essa mesma classe de vulnerabilidade foi de 5,93% da área no método COP-Solo. A classe de vulnerabilidade alta apontada pelo método COP foi de 0,42%, já o método COP-Solo apontou que 11,30% do perímetro estudado são abarcados pela classe alta de vulnerabilidade. O método COP apontou que 6,11% da área predomina a vulnerabilidade moderada, enquanto que a classe vulnerabilidade moderada é de 44,29% para o método COP-Solo. A classe de vulnerabilidade baixa apontada pelo método COP foi de 28,55% da área, já para o método COP-Solo foi de 38,19% da área estão sob os domínios da vulnerabilidade baixa. A diferença mais significativa apontada entre os dois métodos foi na classe de vulnerabilidade muito baixa. O método COP original apontou que 64,88% da área sob os efeitos da classe de vulnerabilidade muito baixa. Por outro lado, o método COP-Solo apontou que apenas 0,29% da área encontram-se sob os efeitos da classe de vulnerabilidade muito baixa.

Segundo Souza (2020), os resultados apontados pelo método COP-Solo representam mais fidedignamente a realidade da ocorrência da vulnerabilidade na área de estudo. O autor pontua ainda que o estudo demonstrou claramente que as características físicas e químicas do solo precisam ser levadas em consideração à atenuação natural para a análise e avaliação da vulnerabilidade em área tropical úmida do carste encoberto e para que não ocorra a delimitação errada das áreas de vulnerabilidades.

Outro método empregado para avaliação da vulnerabilidade de ambientes cársticos em Minas

Gerais foi o método EPIK. Usado de forma adaptada por Pereira et al. (2019) na bacia hidrográfica do Rio São Miguel, região cárstica localizada na cidade de Pains (sudoeste de Minas Gerais), para avaliar a vulnerabilidade à contaminação do aquífero cárstico. Segundo os autores, o método EPIK foi desenvolvido para ser aplicado em ambientes cársticos no contexto climático europeu. Não é considerada a vegetação de grande porte e densa, como a Mata Atlântica, necessitando assim de adaptações condizentes com o clima tropical brasileiro. O estudo utilizou mapas geológico, topográfico, geomorfológico e arquivos vetoriais de hidrografia, curvas de níveis, dados de poços tubulares, imagem Land Sat 8 e imagem do SRTM. O resultado final, foi a confecção de um mapa, apresentado na escala de 1:100.000 com a espacialização da vulnerabilidade à contaminação do aquífero cárstico de São Miguel.

A vulnerabilidade foi representada por intermédio de 03 classes: baixa, moderada e alta. A vulnerabilidade baixa foi cartografada em 41% da área, em locais sem predominância de elementos de carstificação. A vulnerabilidade moderada foi encontrada em 52% da área ocupada por maciços fraturados. Já a vulnerabilidade alta está distribuída em pequenas porções ao longo da área estudada. A falta de cobertura do solo influenciou significativamente para o aumento da vulnerabilidade. Por outro lado, o relevo relativamente plano e a baixa densidade hídrica, com potenciais baixos para o acúmulo de carreamento de sedimentos, contribuíram para uma maior proteção e, conseqüentemente, a diminuição da vulnerabilidade à contaminação. A área de alta vulnerabilidade foi observada principalmente nas áreas urbanas, áreas com mineração ou uso intensivo do solo para fins agrícolas ou pecuários.

Sergipe é outro estado que vem na sequência dessa pesquisa, tendo em vista os estudos desenvolvidos referentes à avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos cársticos nesse território. Nesse contexto, destacam-se os estudos de Dantas (2013). A autora, utilizando da mesma área de estudo, aplicou três métodos (GOD, DRASTIC E MAIA) para avaliar a vulnerabilidade do aquífero cárstico Taquari/Maruim no município de Maruim-SE. O aquífero Taquari/Maruim possui dupla natureza (cárstica e granular). Situado no leste de Sergipe, pertence ao domínio geológico do Grupo Sergipe (Dantas, 2013).

Referente ao método GOD, foram confeccionados mapas preliminares para auxiliar na cartografia final da vulnerabilidade. Nessa perspectiva, o mapa (G) do grau de confinamento da água do aquífero Taquari/Maruim foi produzido com auxílio de dados de campos e consultando o

mapa geológico para determinar o tipo de ocorrência da água subterrânea. Para determinação da variável (O), foram utilizados dados dos mapas pedológicos e geológicos. Referente à variável (D) distância até o lençol freático, utilizaram-se dados do mapa de nível da água no aquífero Taquari/Maruim (Dantas, 2013).

Para determinação do mapa final de vulnerabilidade pelo método GOD, efetuou-se o cruzamento de dados dos mapas preliminares através da álgebra de mapas, possibilitando a confecção do mapa cartográfico da vulnerabilidade do aquífero Taquari/Maruim. A autora pontua que através do mapa gerado, observa-se uma disposição à vulnerabilidade moderada a alta, com regiões tendendo para vulnerabilidade extrema. Nas regiões sudeste e sul do município, onde há ocorrência da vulnerabilidade extrema, encontram-se os principais poços de fornecimento de água da cidade, postos de combustíveis e indústrias.

A autora utilizou também o método DRASTIC para avaliar a vulnerabilidade do Aquífero Taquari/Maruim. Aller et al. (1987) ponderam que os parâmetros do método DRASTIC são subdivididos em função do tempo de escoamento, fluxo e agrupamento de um poluente introduzido no aquífero avaliado. As variáveis utilizadas no método DRASTIC são: (D) profundidade da superfície freática; (R) recarga do aquífero; (A) tipo de aquífero; (S) tipo de solo; (T) topografia ou declividade do terreno; (I) influência na zona não saturada; (C) condutividade hidráulica do aquífero (Aller et al. 1987). Dessa maneira, para aplicação do método DRASTIC, os dados levantados ou calculados foram: altura do nível freático, classificação do aquífero, classes de solo e domínio da zona vadosa e condutividade hidráulica.

Os resultados preliminares (mapa de profundidade da água, mapa de recarga líquida, mapa hidrogeológico, mapa pedológico, mapa topográfico, declividade e condutividade hidráulica), referentes ao aquífero Taquari/Maruim, permitiram delimitar as classes de vulnerabilidade desse ambiente. O mapa final de cartografia da vulnerabilidade do aquífero Taquari/Maruim produzido por meio do método DRASTIC foi elaborado a partir da soma dos respectivos pesos dos 07 parâmetros, extraídos dos mapas preliminares. O resultado final apontou que há uma tendência relacionada às classes intermediária e de alta vulnerabilidade na porção sudeste e ao sul do município de Maruim. Dados esses, também, apontados na metodologia GOD.

Por se tratar de uma região com variados usos agrícola, possivelmente, essas áreas são submetidas aos usos de pesticidas. Por isso, a autora acrescentou em seu estudo o emprego do método

DRASTICP, também desenvolvido por Aller et al. (1987). O DRASTIC Pesticida (DRASTICP) é utilizado, segundo Aller et al. (1987), em casos nos quais ocorre a aplicação de pesticida nas áreas agricultáveis. A diferença entre ambas as aplicações está na atribuição dos pesos para cada fator do DRASTIC. A sua aplicação é voltada para avaliar e mensurar a vulnerabilidade das águas subterrâneas, provocado por agrotóxicos e fertilizantes das áreas agrícolas, onde eventualmente estará localizado o aquífero.

Como resultado final, após o cruzamento dos dados e a soma dos mesmos, gerou-se o mapa de vulnerabilidade do aquífero Taquari/Maruim com o emprego do método DRASTICP. O mapa aponta para uma forte disposição de vulnerabilidade alta, interpostas com zona de vulnerabilidades intermediárias em quase todo o município. Por tratar-se de uma região com grandes áreas destinadas à agricultura, Dantas (2013) pontua que a vulnerabilidade alta pode gerar riscos altos para contaminação do aquífero por causa da utilização de pesticidas. Além disso, de acordo com a autora, foi aplicada a análise estatística descritiva para comparar as duas metodologias, ou seja, foi verificada a correlação entre o método DRASTIC e o método DRASTICP. Dessa forma, por se tratar de metodologias parecidas (uma é proveniente da outra), Dantas (2013) pontua que foi apresentada uma alta correlação entre os métodos.

Em sua pesquisa no Aquífero Taquari/Maruim, Dantas (2013) aplicou também o Método de Avaliação da Vulnerabilidade Intrínseca de Aquíferos - MAIA, proposto por Maia e Cruz (2010). A metodologia MAIA utiliza uma formulação matemática simples, por meio de seleção de parâmetros que indicam a vulnerabilidade, em que cada fator da equação se relaciona direta ou inversamente com a vulnerabilidade (Maia e Cruz, 2010). Para a aplicação do método, determinaram-se os seguintes elementos: mapa de profundidade da água e mapa da espessura do solo, obtidos com os perfis dos poços; mapa da declividade do terreno, determinado a partir do modelo digital de elevação; e mapa da capacidade específica e recarga potencial, encontrados a partir da precipitação média anual.

O mapa final de cartografia da vulnerabilidade através do método MAIA deu-se com o cruzamento dos dados dos 05 mapas preliminares. Foram encontradas três classes de vulnerabilidade, alta, média e baixa. O mapa com Índice de Vulnerabilidade MAIA indicou áreas com tendência de baixa à média vulnerabilidade e áreas com predomínio de vulnerabilidade alta. Sendo assim, os valores baixos foram encontrados na parte

oeste, os valores médios na parte central e os valores altos, com alto índice de vulnerabilidade, encontrados na porção sudeste do município de Maruim.

Segundo Dantas (2013), a substituição dos dados estimados pelo emprego dos dados medidos fez com que o método MAIA apresentasse resultados com maior fidedignidade à real situação do aquífero Taquari/Maruim. A autora pontua ainda que os números da vulnerabilidade mapeados estão condizentes com a distribuição da capacidade específica e, principalmente, com a recarga potencial. Dantas (2013) concluiu que a aplicação do Método de Avaliação da Vulnerabilidade Intrínseca de Aquíferos – MAIA, pontualmente, apresentou resultados mais precisos e fidedignos com a realidade do Aquífero Cárstico Taquari/Maruim; diversamente da variação dos números calculados pelos métodos GOD e DRASTIC.

Menezes Ribeiro et al. (2016) desenvolveram estudos no estado de Sergipe, nos municípios de Nossa Senhora do Socorro, Laranjeiras e Maruim, tendo como objetivo verificar a vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos cársticos Sapucari e Maruim, além de determinar áreas predispostas à contaminação das suas águas, utilizando o método EPIK. O método EPIK baseia-se nas características de fluxo e transporte do aquífero (Marín, et al. 2021). Esse método é mais utilizado em países europeus, havendo poucos trabalhos no Brasil.

O método EPIK é aplicado tendo como base as características geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas. Para tal, são utilizados 04 parâmetros: epicarste, cobertura de proteção, condição de infiltração e desenvolvimento da rede cárstica (Ribeiro e Zorn, 2021). Utilizando otofotocartas através da fotointerpretação, foram feitos os fotolineamentos e análises morfológicas para identificação das feições cársticas. Utilizaram-se também mapas de uso da terra, de declividade – extraído a partir da imagem ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) com resolução espacial de 30 m – e dados de poços tubulares. A aplicação do método EPIK possibilitou gerar o mapa de vulnerabilidade e identificar as áreas potencialmente sujeitas à contaminação dos aquíferos estudados. O mapa final com a representação da vulnerabilidade foi gerado através de álgebra de mapas no ArcGis. As classes mapeadas foram moderada, alta e muito alta. Áreas com recorrência de feições cársticas, como *Karrens* e dolinas, apresentaram maior vulnerabilidade. As atividades com potencial alto de contaminação são oriundas das atividades humanas como exploração de calcários, indústrias,

agricultura e expansão urbana. Tais atividades consistem em riscos elevados de poluentes dos aquíferos estudados. O uso do método EPIK permitiu cartografar e espacializar a vulnerabilidade e suas diferentes classes dentro da área de estudo.

No estado do Paraná, destacam-se as pesquisas de Milek et al. (2011; 2014). Em seu primeiro estudo, os autores abordaram a influência de incertezas geológicas no cálculo do índice SINTACS (Civita e De Maio, 1997), método aplicado para cartografar a vulnerabilidade intrínseca de sistemas aquíferos. O objetivo da pesquisa foi à aplicação da metodologia para a área do Aquífero Carste da área urbana e conurbada pelos municípios de Curitiba, Campo Magro, Campo Largo, Almirante Tamandaré, Itaperuçu, Rio Branco do Sul, Colombo e Bocaiúva do Sul, espacializados dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Birigui, no estado do Paraná.

As bases de dados utilizadas para cartografar a vulnerabilidade utilizando o método SINTACS foram: (I) Profundidade do aquífero - obtida pela diferença da cota topográfica pela cota piezométrica de cada ponto. A superfície piezométrica foi determinada com base nos corpos hídricos e nível estático do lençol freático, extraídos dos poços tubulares distribuídos na área de estudo; (II) Recarga - determinada a partir de dados do balanço hídrico; (III) Zona não saturada; (IV) Tipo de solo; (V) Aquífero - determinado a partir de mapas geológico e hidrogeológico; (VI) Condutividade hidráulica - determinada a partir de dados de poços tubulares, mapa de hidrogeologia e dados estatísticos; (VII) Declividade topográfica – determinada a partir da declividade topográfica da área de estudo.

Como resultado final do processamento e soma ponderada dos sete índices de entrada, obteve-se o mapa referente à vulnerabilidade do aquífero cárstico do município de Almirante Tamandaré utilizando o método SINTACS. Do estudo obteve-se as seguintes classes de vulnerabilidade: cerca de 27% da área com vulnerabilidade muito alta, 20% como alta, 24% como moderadamente alta e 29% com índice de média vulnerabilidade. Destarte, na área de estudo, as classes de vulnerabilidades baixa e muito baixa não foram apontadas na respectiva pesquisa.

Em seu segundo trabalho, Milek et al. (2014) aplicaram conjuntamente os métodos DRASTIC (Aller et al. 1987) e SINTACS (Civita e De Maio, 1997) no aquífero cárstico no município de Almirante Tamandaré-PR e proximidades. Os métodos DRASTIC e SINTACS necessitam de maior número de informações. Segundo Auge (2004), com a aplicação desses dois métodos,

possivelmente, melhores resultados serão obtidos do estudo em questão.

Os métodos DRASTIC e SINTACS aferem a vulnerabilidade intrínseca e natural de aquíferos por meio de um índice de vulnerabilidade, utilizando 07 parâmetros que se associam diretamente com o transporte de contaminantes no meio hidrogeológico. Para cada um desses parâmetros são pré-determinados os intervalos e pesos distintamente para cada metodologia (Aller et al. 1987; Civita e De Maio, 1997). As somas desses parâmetros refletem a vulnerabilidade de cada local do aquífero. Os 07 parâmetros empregados para mensurar a vulnerabilidade com o método DRASTIC são: (I) D - Profundidade da superfície piezométrica; (II) R - Recarga do aquífero; (III) A - Material do aquífero; (IV) S - Tipo de solo; (V) T - Topografia; (VI) I - Influência da zona vadosa; (VII) C - Condutividade hidráulica do aquífero. Destaca-se ainda que o método SINTACS foi constituído através do método DRASTIC, logo, esse método emprega também o uso de 07 parâmetros Civita e De Maio, (1997), sendo esses já descritos na pesquisa anterior de Milek et al. (2011).

A área de estudo, de acordo com a metodologia DRASTIC aplicada, demonstrou que 40% do seu total está sob efeito da classe de vulnerabilidade alta, 15% sob os efeitos da vulnerabilidade média e 45% sob os efeitos da classe de vulnerabilidade baixa. Conforme a pesquisa de Milek et al. (2014), não há ocorrência de regiões com classificação de vulnerabilidade muito alta.

Concernente ao método SINTACS, aproximadamente 27% da área estudada apresentou classe de vulnerabilidade muito alta, 20% com classe de vulnerabilidade alta, 24% com classe de vulnerabilidade moderadamente alta e 29% com classe de vulnerabilidade média. Para essa metodologia, Milek et al. (2014) pontaram que não houve ocorrência de regiões com classificação de vulnerabilidade baixa e muito baixa.

A confrontação entre os resultados obtidos com os dois métodos (DRASTIC e SINTACS) apresenta resultados com diferenças significativas. O método DRASTIC apontou que mais de 55% da área de estudo foi apontada com vulnerabilidade maior ou igual à média. Por outro lado, o método SINTACS, apontou que toda a área foi determinada com vulnerabilidade maior ou igual à média. Segundo Milek et al. (2014), as diferenças apresentadas sobrevieram em função das escalas distintas e pesos adotados pelos dois métodos.

No estado de São Paulo, destaca-se a pesquisa de Lenhare e Sallun (2018), em que procuraram efetuar a caracterização

geomorfológica e espeleológica do carste da região do Planalto de Guapiara no Parque Estadual de Intervale. Para mensurar a vulnerabilidade e a demarcação do zoneamento ambiental do sistema cárstico, contou-se com o auxílio dos métodos EPIK e KDI. Lenhare e Sallun (2018) utilizaram mapas geológicos, geomorfológicos, espeleológicos e fotografias aéreas. A fotointerpretação possibilitou o mapeamento das depressões que foram comparadas com curvas de níveis extraídas de cartas topográficas.

A partir de uma análise minuciosa, Lenhare e Sallun (2018) optaram por utilizar os métodos EPIK e KDI, que são os métodos que abarcam a maior quantidade de parâmetros para avaliar a vulnerabilidade cárstica segundo os autores. Contudo, eles apontaram que tais métodos são aplicáveis apenas em escalas locais, havendo desvantagens na sua utilização em escala regional. Ainda, segundo os autores, para que os dois métodos fossem aplicados na área de estudo, ambos tiveram que ser adaptados para se adequarem à realidade da área de aplicação, visto que seriam eficazes quando aplicados em áreas menores.

Esses dois métodos são os que demandam o uso de um conteúdo maior de parâmetros adequados para avaliar vulnerabilidade cárstica de um determinado ambiente. Segundo os autores Lenhare e Sallun (2018), o método EPIK é bastante quantitativo e pouco qualitativo em sua aplicação e apresenta limitações na avaliação da vulnerabilidade cárstica, além de ser desenvolvido para avaliar vulnerabilidades pontuais. Da mesma forma, o método KDI é bastante abrangente na avaliação dos impactos causados no carste. Esse método considera os fatores ambientais, biota, vegetação e solo, fatores antrópicos, econômicos e sociais. Mesmo considerando o método mais adequado para a aplicação na região da área estudada, os autores constataram que o uso dos métodos EPIK e KDI apresentaram determinadas restrições de aplicação devido à dificuldade de obter elementos necessários, exigidos por ambos os métodos.

Xavier et al. (2012) empregaram o método GOD para mensurar e avaliar a vulnerabilidade natural do aquífero cárstico Gruta do Limoeiro. A gruta do Limoeiro é o sítio arqueológico mais importante do estado, tombada em 1984 como patrimônio histórico do Espírito Santo pelo Conselho Estadual de Cultural – CEC, por meio da resolução 01/84 da Prefeitura Municipal de Castelo.

O município de Castelo está inserido na Província da Mantiqueira, na faixa de Dobramento Ribeira, faixa marginal ao Craton São Francisco (Vale e Gonçalves, 2020). As unidades pertencem ao Domínio Metavulcanossedimentar, constituído

por biotita anfíbio gnaiss, estruturas bandadas de tonalidade cinza; granulometricamente apresenta camadas fina a grossa, quartzito, rochas calcissilicáticas e mármore (Vale e Gonçalves, 2020).

Os dados de entrada para aplicação do método GOD foram dados litológicos, identificados a partir de poços tubulares, níveis estáticos dos poços e das lagoas da área de estudo, litologia da zona não saturada e dos tipos de aquíferos. Os resultados apresentados por Xavier et al. (2012) indicaram que a vulnerabilidade natural é moderada em todo o aquífero. Os dados de cotas altimétricas e de carga hidráulica total possibilitaram a confecção do mapa de direção do fluxo hídrico subterrâneo, indicando as áreas de recarga e descarga. Os autores pontuam ainda que as águas do aquífero tendem a ser atingidas por substâncias contaminantes e potencialmente poluidoras, como é o caso dos hidrocarbonetos, halogenados e não halogenados e metais pesados, nas zonas onde a vulnerabilidade natural foi classificada como moderada.

Em Tocantins, os autores Oliveira et al. (2017) aplicaram o método GOD para mapear a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas da região de Lagoa da Confusão - TO. O município Lagoa da Confusão integra-se a um ambiente cárstico, resultante da dissolução de rochas calcárias, onde a movimentação da água acontece entre os pontos de absorção (fissuras e dolinas), em que as águas superficiais são capturadas e pontos de ressurgências reaparecem na superfície (Oliveira et al. 2017). Para viabilizar o mapeamento da vulnerabilidade, os autores selecionaram e avaliaram os dados de poços tubulares da área de estudo disponibilizados pelo Sistema de Informações de Águas Subterrâneas da Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM/SIAGAS.

Com a formação do banco de dados de entrada, efetuou-se o processamento dos mesmos, utilizando o interpolador *Krigagem* do software

Surfer, a fim de mapear a incidência das classes de vulnerabilidade para o aquífero, com base no método GOD. O resultado final da aplicação apontou que o aquífero cárstico, Lagoa da Confusão, está sob os efeitos da classe de vulnerabilidade natural baixa. A região oeste da poligonal estudada, na qual localiza-se a maioria dos poços tubulares, foi classificada como áreas onde predominam as classes de vulnerabilidade menores. As classes de vulnerabilidades baixas refletem a disposição de contorno dos possíveis contaminantes acima da zona saturada, composta em grande parte por argila, solos residuais e, em menor parte, por solos Quartzarênicos.

Apesar da praticidade do método GOD em determinar a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas do município de Lagoa da Confusão, os autores elencaram que o método fornece uma visão simplificada, tendo em vista que avalia tão somente a vulnerabilidade intrínseca do solo e, dependendo das características do poluente e do estágio em que o solo foi exposto às possíveis fontes de poluição, o aquífero pode estar sim contaminado. Nesse sentido, os autores destacam ainda que o método GOD não se mostra totalmente eficiente, embora sua facilidade de aplicação, tendo em vista as carências de informações e os poucos poços localizados na área. Destaca-se ainda a proximidade que esses estão uns dos outros. Uma vez não estando espacializados uniformemente dentro da área estudada, há a necessidade de novos estudos, com aplicações de outros métodos, a fim de determinar com maior precisão a vulnerabilidade em que o aquífero está submetido.

O resumo do formato utilizado em cada modelo citado nessa pesquisa está apresentado no quadro 04 que sintetiza a forma como os modelos são aplicados, indicando qual o tipo de vulnerabilidade estudada, o tipo do clima onde cada um foi desenvolvido, os dados de entrada de cada modelo e a escala de aplicação em que os mesmos podem ser aplicados, se em áreas grandes ou pequenas.

Quadro 4 - Síntese das características e parâmetros utilizados por cada modelo citado nesta pesquisa

Tipo de modelo	Vulnerabilidade	Clima	Dados de Entrada	Escala de Aplicação
COP	Intrínseca e Específica	Semiárido	Lençol freático, rede de drenagem, topografia, uso do solo, vegetação, litologia e dados hidrológicos.	Regional
DRASTIC	Específica	Temperado	Hidrogeologia, litologia, topografia, zonas de recarga, lençol freático e rede de drenagem.	Regional
GOD	Intrínseca	Temperado	Hidrologia, rede de drenagem e uso do solo.	Local e Regional

PI	Intrínseca	Úmido	Hidrogeologia, rede de drenagem, declividade/topografia, uso do solo, solo, vegetação e zonas de recarga.	Regional
SINTACS	Intrínseca	Úmido	Profundidade da água subterrânea, infiltração, seção sub-saturada, tipo de solo, características do aquífero, condutividade hidráulica, declividade topográfica e dados litológicos.	Local e Regional
EPIK	Intrínseca e Específica	Úmido	Hidrologia, geologia, litologia, sumidouros, dolinas, uso do solo, declividade, rede de drenagem, rede cárstica.	Local
KDI	Intrínseca e Específica	Úmido	Geomorfologia, Hidrogeologia, litologia, vegetação, uso e ocupação do solo, declividade, fatores atmosféricos, fatores econômicos e sociais.	Local e Regional
MAIA	Intrínseca	Tropical	Profundidade da água subterrânea, espessura do solo, declividade, capacidade específica, recarga potencial, densidade de fraturas e transmissividade.	Local e Regional

Os estudos sobre a vulnerabilidade das águas subterrâneas e dos aquíferos cársticos são desenvolvidos a partir de modelos que paulatinamente são aplicados e testados, em diversas partes do mundo. Embora esses modelos estejam consolidados, é possível propor adaptações nos mesmos para que seja possível o seu uso em diferentes localidades. Os métodos utilizados para avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas dependem sempre de parâmetros e dados relacionados ao aquífero, suas características são analisadas individualmente e são atribuídos valores ou pesos para cada um. Os parâmetros são individualizados e reclassificados para compilação do mapa final de vulnerabilidade (Marín et al. 2021).

Considerações Finais e Recomendações

No decorrer da pesquisa, ficou demonstrado que os aquíferos cársticos, além de peculiares e anisotrópicos, são altamente sensíveis aos efeitos da contaminação, fatores que elevam o grau de prioridade relacionado a sua prevenção no intuito de tentar evitar e ou mitigar a contaminação dos recursos hídricos subterrâneos. Desse modo, a cartografia da vulnerabilidade dos aquíferos localizados em ambientes cársticos tornou-se uma das ferramentas mais importante a serem aplicadas para cartografar e analisar a sensibilidade dos aquíferos cársticos à poluição. Tais mapas tanto auxiliam como oferecem apoio às partes envolvidas e interessadas nas tomadas de decisões, a fim de promover uma gestão adequada do uso racional da terra que seja compatível com o uso da água. No entanto, principalmente no Brasil, a forma de obtenção desses mapas ainda é um desafio, em muitos casos, pois causam incertezas

na hora de escolher a metodologia a ser aplicada. O objetivo do mapeamento e avaliação da vulnerabilidade à contaminação é identificar as zonas mais vulneráveis dentro das áreas de captação, fornecer dados científicos que sejam confiáveis para a proteção das águas subterrâneas.

As águas subterrâneas como um todo, são particularmente sensíveis à contaminação, principalmente por causa da estrutura interna do aquífero e o seu comportamento hidrogeológico que determina a rápida transferência das águas de recarga, bem como sua rápida distribuição em grandes distâncias, com altas velocidades de fluxo e curto espaço de tempo. Tendo em vista que a capacidade de autolimpeza das águas subterrâneas dos carste ser comumente baixas, ou muito baixas, os aquíferos cársticos demandam metodologias específicas para mapeamento de vulnerabilidade que levam em conta as propriedades intrínsecas.

A vulnerabilidade à poluição de um aquífero cárstico não pode ser mensurada diretamente no campo. Neste sentido, o estudo em tela corrobora que a avaliação direta em campo da vulnerabilidade de aquíferos cársticos à poluição apresenta grandes desafios devido à complexidade de suas características hidrogeológicas. Essa dificuldade decorre da natureza peculiar desses sistemas, onde a rápida circulação de água por fraturas e condutos subterrâneos irregulares torna a medição direta imprecisa e pouco representativa dos riscos ambientais envolvidos. Isso levanta a necessidade de desenvolver e aprimorar metodologias indiretas e modelos preditivos que possam fornecer uma análise mais eficaz da suscetibilidade desses aquíferos à contaminação. Portanto, métodos específicos para sua avaliação são necessários. O objetivo dessa pesquisa foi

verificar como anda o processo de mapeamento e avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos cársticos brasileiros, principalmente verificar quais são os métodos mais aplicados e os que são mais aceitos.

Existe um número significativo de estudos voltados a avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas em solo brasileiro. No entanto, no que se referem às águas subterrâneas localizadas em relevos ou regiões de carbonatos, os estudos ainda são muito restritos, tendo em vista um pequeno número de pesquisadores que se interessam por este tipo de análise e mapeamento da vulnerabilidade desses ambientes.

Concernente às diversas metodologias aqui apresentadas, através dos métodos/modelos que são utilizados para avaliar, mensurar, identificar e cartografar a vulnerabilidade atrelada à contaminação das águas subterrâneas situadas em ambientes cársticos ou não, verificou-se que todos os métodos descritos possuem importância fundamental. Também ficou evidenciado que a localidade onde o estudo será desenvolvido exerce papel importantíssimo na determinação do método, assim como às características dos aspectos ambientais, climático, geológico, hidrogeológicos, sociais e econômicos serão determinantes para a escolha do método.

A pesquisa indicou que o método COP como o mais aplicado e o mais aceito na comunidade científica brasileira. O método COP também é um dos mais eficazes, tendo em vista a condizência dos seus resultados com a realidade das áreas estudadas. O método COP foi aplicado em diversos estudos no estado da Bahia, principalmente no Aquífero Cárstico Salitre, para avaliar e cartografar a vulnerabilidade em que estão submetidas às águas subterrâneas desse importante aquífero. Sua aplicação também é destacada no estado de Minas Gerais, mais especificamente no Aquífero cárstico na Unidade de Proteção Ambiental do Carste de Lagoa Santa.

A região Ambiental do Carste de Lagoa Santa é uma das mais estudadas do país. Nela está situado o aquífero Bambuí, um dos mais importantes do Brasil. Infelizmente, ele também é um dos mais comprometidos, haja vista seu posicionamento geográfico onde localizam-se indústrias de espécies variadas, além de uma grande densidade demográfica em virtude das cidades ali posicionadas. É importante destacar que o método COP permite o acesso a todo o ambiente, não se restringindo apenas aos estudos das águas subterrâneas.

Outro método que se destacou logo na sequência do método COP foi o método DRASTIC. Embora a literatura não o aponte como

ideal para mapear e avaliar a vulnerabilidade de aquíferos cársticos, esse método é frequentemente utilizado. Ele foi aplicado em diversos estudos para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas em ambientes cársticos em Minas Gerais, Sergipe e Paraná.

A aplicação do método DRASTIC é complexa devido à quantidade de parâmetros de entrada, o que faz dele um método difícil de ser utilizado, bem como a dificuldade da sua aplicação, visto que os parâmetros em sua maioria devem ser coletados em campo. Levando em consideração que o método DRASTIC não descreve em sua metodologia possibilidades de aplicação no carste, que há um número grande de parâmetros necessários para um desempenho adequado, além da dificuldade de obtenção desses atributos paramétricos, o método DRASTIC poderá inviabilizar as pesquisas referentes à análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas em ambientes cársticos.

A pesquisa também mostrou que o método GOD é bem utilizado no Brasil. No entanto, essa metodologia visa apenas analisar a vulnerabilidade das águas subterrâneas; logo, o ambiente cárstico como um todo não é considerado. O método GOD foi utilizado para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas em aquíferos cársticos na Bahia, Sergipe, Espírito Santo e Tocantins. Apesar da fácil aplicação, os resultados apontados por esse método, referentes aos estudos aplicados no carste, mostraram-se bastante simplificados, uma vez que ele verifica apenas a vulnerabilidade intrínseca do solo, desprezando as características hidrogeológicas.

O método EPIK, assim como o DRASTIC, contém uma aplicação mais complexa, tendo em vista a quantidade de parâmetros necessários para sua aplicação, o que faz dele um método difícil de ser aplicado. Outra dificuldade atrelada ao método é o custo da sua aplicação, uma vez que os parâmetros de entrada em sua maioria devem ser coletados em campo.

O método EPIK foi desenvolvido para aplicação em ambientes cársticos de clima europeu para a aplicação em clima tropical, como é o caso do Brasil. Por isso, deve sofrer adaptações. Além do número de parâmetros exigidos, a aplicação do método EPIK pode ser comprometida, devido ao alto custo da extração dos parâmetros. Também, devido o método EPIK ser qualitativo, sua aplicação possui limitações na avaliação da vulnerabilidade cárstica, pois foi desenvolvido para avaliar vulnerabilidades pontuais.

O método PI foi aplicado para avaliação das águas subterrâneas em ambientes cársticos na Bahia. O método mostrou-se bastante subjetivo e

generalista, tornando-o impreciso, principalmente quando analisados os aspectos geológicos dos aquíferos. O método SINTACS foi outro método utilizado nas pesquisas brasileiras para mapear e avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas em aquíferos cársticos. Esse método também, conforme apontado na literatura, não foi um método desenvolvido para aplicação em ambientes carstificados. O método SINTACS exige uma grande quantidade de parâmetros, fazendo dele um método dispendioso no que tange os dados de entrada. Além de sua aplicação ser complexa, os resultados tendem a serem imprecisos, devido às incertezas da condutividade hidráulica.

O *Karst Disturbance Index*, conhecido como método KDI, foi utilizado em São Paulo para medir o grau de perturbação de uma região cárstica. É um método muito exigente e bastante abrangente. Devido à quantidade de parâmetros exigidos para a sua análise, apresenta limitações, o que inviabiliza sua utilização, pois a obtenção de todos os dados de entrada tem um custo bastante elevado. Outro método que foi apontado nessa pesquisa foi o método MAIA. É um método relativamente novo, ainda pouco difundido na literatura. Sua aplicação é ancorada em formulação matemática. Os parâmetros de entrada não são muitos, porém há certa dificuldade em obtê-los. Como é uma metodologia relativamente nova, sua eficácia ainda precisa ser comprovada.

Referências

- Akpan, A. E., Ebong, E. D., Emeka, C. N. (2015). Exploratory assessment of groundwater vulnerability to pollution in Abi, southeastern Nigeria, using geophysical and geological techniques. *Environmental monitoring and assessment*, 187(4), 156. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4380-2>.
- Albinet, M. (1963). LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES. *Chronique hydrogeol* (6).
- Albinet, M., Margat, J.; 1970: Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bulletin du BRGM (deuxième série)*, III(4),13-22.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R. J., Hackett, G. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. *US Environmental Protection Agency*. Washington, DC, 455.
- Andreo, B., Ravbar, N., Vías, J. M. (2009). Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers by extension of the COP method: application to pilot sites. *Hydrogeology Journal*, 17(3), 749-758. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0391-1>.
- Auge, M. (2004). Vulnerabilidad de Acuíferos. *Revista Latino Americana de Hidrogeologia*, n 4, p. 81-84.
- Babiker, I., S.; Mohamed, M., A.; Hiyama, T., Kato, K. (2005). A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*, 345(1-3), 127-140. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.11.005>.
- Bagherzadeh, S., Kalantari, N., Nobandegani, A. F., Derakhshan, Z., Conti, G. O., Ferrante, M., Malekahmadi, R. (2018). Groundwater vulnerability assessment in karstic aquifers using COP method. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(19), 18960-18979. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1911-8>.
- Bailly-Comte, V., Jourde, H., Roesch, A., Pistre, S., Batiot-Guilhe, C. (2007). Time series analyses for Karst/River interactions assessment: Case of the Coulazou river (southern France). *Journal of hydrology*, 349(1-2), 98-114. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.028>.
- Banerjee, A., Creedon, L., Jones, N., Gill, L., Gharbia, S. (2023). Dynamic Groundwater Contamination Vulnerability Assessment Techniques: A Systematic Review. *Hydrology*, 10(9), 182. <https://doi.org/10.3390/hydrology10090182>.
- Cardoso, L. H., Bacellar, L. D. A. P. (2023). Characterization with geoelectrical methods of fissural porosity and flow pattern in physical models of fractured rock masses. *Journal of Applied Geophysics*, 218,105201. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105201>.
- Civita, M., De Maio, 1997. SINTACS. Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquifer all'inquinamento. *Metodologia; Automatizzazione*.
- Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Zwahlen, F. (2002). Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, 10(2), 340-345. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0185-1>.
- Dantas, J. M. (2013). Hidrogeoquímica e estudo da vulnerabilidade do aquífero taquari/maruim no município de maruim, Sergipe, NE do Brasil. Tese de Doutorado.

- Davis, A., Long, A., Wireman, M. (2002). KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrain. *Environmental Geology*, 42(1), 65-72. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0531-1>.
- 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), 165-176. <https://doi.org/10.1007/s002540050446>.
- Doerfliger, N., Zwahlen, F. (1998). Practical guide: groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK). Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern, 56.
- Doerfliger, N., Plagnes, V. (2009). Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide Méthodologique de la méthode PaPRIKa. Rep. BRGM RP-57527-FR, 100 PP.pág.
- Duarte, T. M., Weber, A. K. P. S. (2019). Avaliação Da Vulnerabilidade Natural Do Aquífero Cárstico No Município De Vespasiano-Mg. Águas Subterrâneas. <https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.29825>.
- Ferreira, C. F., Uagoda, R. E. S. (2019). Tipologias do carste e classificações de dolinas: uma revisão. *Caminhos de Geografia*, 20(70), 519-537. <https://doi.org/10.14393/RCG207044169>.
- Ford, D., Williams, P. W. (2007). Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley; Sons.
- Foster, S. S. D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: International Conference Of Vulnerability Of Soil And Groundwater To Pollutants, 1987, Noordwijk. Proceedings... The Hague: TNO Committee on Hydrological Research; Bilthoven: National Institute of Public Health and Environmental Hygiene, 1987.
- Foster, S., Ventura, M., Hirata, R. (1987). Groundwater pollution: an executive overview of the Latin American-Caribbean situation in relation to potable water-supply. In Groundwater pollution: An executive overview of the Latin American-Caribbean situation in relation to potable water-supply (pp. 38-38).
- Gasser, R. S., Cruz, M. J. M., Gonçalves, M. V. P. (2018). Avaliação da vulnerabilidade intrínseca a contaminação do aquífero cárstico Salitre no município de Cafarnaum, Bahia. *Águas Subterrâneas*, 32(1), 70-78. <https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.29090>.
- Gemail, K.S., Abd-Elaty, I. (2023). Unveiling the Hidden Depths: A Review for Understanding and Managing Groundwater Contamination in Arid Regions. In: Ali, S., Negm, A. (eds) Groundwater Quality and Geochemistry in Arid and Semi-Arid Regions. The Handbook of Environmental Chemistry, vol 126. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/698_2023_1049
- Gogu, R. C., Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental geology*, 39(6), 549-559. <https://doi.org/10.1007/s002540050466>.
- Goldscheider, N. (2005). Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany. *Hydrogeology Journal*, 13(4), 555-564. <https://doi.org/10.1007/s10040-003-0291-3>.
- Goldscheider, N., Klute, M. A. R. K. U. S.; Sturm, S., Hötzl, H. (2000). The PI method—a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Z Angew Geol*, 46(3), 157-166.
- Grabher, C., Brochi, D. F., Tabai, F. C. V., Lahóz, F. C. C., Gotardi, K. R., Batista, M.; Razera, S. Termos técnicos em gestão dos recursos hídricos, Americana/SP: Consórcio Intermunicipal das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá, 2006.
- Hirata, R., Fernandes, A. J. (2008). Vulnerabilidade à poluição de aquíferos. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*, 3.
- Iván, V., Mádl-Szőnyi, J. (2017). State of the art of karst vulnerability assessment: overview, evaluation and outlook. *Environmental Earth Sciences*, 76(3), 112. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6422-2>.
- Jahromi, M. N., Gomeh, Z., Busico, G., Barzegar, R., Samany, N. N., Aalami, Mt., Kazakis, N. (2021). Developing a SINTACS-based method to map groundwater multi-pollutant vulnerability using evolutionary algorithms. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 7854-7869. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11089-0>.
- Jayasekera, D. L., Kaluarachchi, J. J., Villholth, K. G. (2011). Groundwater stress and vulnerability in rural coastal aquifers under competing demands: a case study from Sri Lanka. *Environmental monitoring and*

- assessment, 176(1-4), 13-30.
<https://doi.org/10.1007/s10661-010-1563-8>.
- Jesus, T. C., Da Silva, H. M., Leal, L. R. B. (2018). Vulnerabilidade Do Aquífero Cárstico Bambuí, Bacia Hidrográfica Do Baixo Rio Corrente, Oeste Da Bahia: Aplicação Dos Métodos PI E COP. Águas Subterrâneas.
- Jourde, H., Wang, X. (2023). Advances, challenges and perspective in modelling the functioning of karst systems: a review. *Environmental Earth Sciences*, 82(17), 396.
<https://doi.org/10.1007/s12665-023-11034-7>.
- Kalaoum, J., Silva, J. B. G., De Aquino, O. E., Pinho, C. F., Pereira, M. G., Gomes, J. H. G. (2020). Mapeamento da vulnerabilidade do sistema de aquífero do Distrito Industrial do Município de Queimados (RJ) utilizando a metodologia GOD. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 13(3), 1069-1090.
<https://doi.org/10.17765/2176-9168.2020v13n3p1069-1090>.
- Kalhor, K., Ghasemizadeh, R., Rajic, L., Alshawabkeh, A. (2019). Assessment of groundwater quality and remediation in karst aquifers: A review. *Groundwater for sustainable development*, 8, 104-121.
<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.10.004>.
- Kaliraj, S., Chandrasekar, N., Peter, T. S., Selvakumar, S., Magesh, N. S. (2015). Mapping of coastal aquifer vulnerable zone in the south west coast of Kanyakumari, South India, using GIS-based DRASTIC model. *Environmental monitoring and assessment*, 187(1), 4073.
<https://doi.org/10.1007/s10661-014-4073-2>.
- Karmann, I. 1994. *Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto Vale do rio Ribeira de Iguape, sudeste do estado de São Paulo*. 1994. 241p (Doctoral dissertation, Tese (Doutorado em Geociências). Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo.
- Karmann, I., Sánchez, L. E. (1979). Distribuição das rochas carbonáticas e províncias espeleológicas do Brasil. *Espeleo-tema*, 13, 105-167.
- 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*, 19(2), 339-353. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0688-8>.
- Kemerich, P. D. D. C., Martins, S. R., Kobiyama, M., Descovi Filho, L., Borba, W. F. D., Souza, E. E. B. D., Fernandes, G. D. Á. (2020). Análise da vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea: comparativo entre a metodologia GOD e DRASTIC. *Revista de geociências do Nordeste. Rio Grande do Norte*. Vol. 6, n. 2 (jul./dez. 2020), p. 45-53.
<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2020v6n2ID19080>.
- Kermavnar, J., Ferlan, M., Marinšek, A., Eler, K., Kobler, A., Kutnar, L. (2020). Effects of various cutting treatments and topographic factors on microclimatic conditions in Dinaric fir-beech forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 295, 108186.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108186>.
- Kessler, H. (1957) - Estimation of Subsurface Water Resources in Karstic Regions. *Assemblée générale de Toronto Vol. II - Groundwater, Symposium Vegetation, Symposium Dew*.
- Kovarik, J. L., Van Beynen, P. E., Niedzielski, M. A. (2017). Groundwater vulnerability mapping for a sub-catchment of the Rio La Venta watershed, Chiapas, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 76(23), 1-11.
<https://doi.org/10.1007/s12665-017-7113-8>.
- Kumar, A., Pramod Krishna, A. (2020). Groundwater vulnerability and contamination risk assessment using GIS-based modified DRASTIC-LU model in hard rock aquifer system in India. *Geocarto International*, 35(11), 1149-1178.
<https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1557259>.
- Kumar, P., Bansod, B. K., Debnath, S. K., Thakur, P. K., Ghanshyam, C. (2015). Index-based groundwater vulnerability mapping models using hydrogeological settings. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.02.001>.
- Le Grand, H. E. (1960). *Geology and Groundwater Resources of Wilmington-New Bern Area*. Division of Ground Water, NC Department of Water Resources.
- Lee, S., Baek, W., Kim, J., Jeong, C., Kang, J. (2024). Groundwater Flow Analysis During Excavation for Underground Tunnel Construction. *Journal of the Korean GEO-environmental Society*, 25(6), 19-24.
<https://doi.org/10.14481/jkges.2024.25.6.19>.
- Lenhare, B. D., Sallun Filho, W. (2018). Application of EPIK and KDI methods for identification and evaluation of karst vulnerability at Intervalles State Park and surrounding region (Southeastern Brazil). *Carbonates and Evaporites*, 34(1),

- 175-187.
<https://doi.org/10.1007/s13146-018-0474-6>.
- Lima, R. F. G. D. (2019). Hidrogeologia e vulnerabilidade do aquífero cárstico salitre na Bacia Una-Utinga, Bahia. Tese de Doutorado.
- Lousada, E. O., Campos, J. E. G. (2011). Estudos isotópicos em águas subterrâneas do Distrito Federal: subsídios ao modelo conceitual de fluxo. *Brazilian Journal of Geology*, 41(2), 355-365. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2011412355365>.
- Machiwal, D., Cloutier, V., Güler, C., Kazakis, N. (2018). A review of GIS-integrated statistical techniques for groundwater quality evaluation and protection. *Environmental Earth Sciences*, 77(19), 1-30. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7872-x>.
- Machiwal, D., Jha, M. K., Singh, V. P., Mohan, C. (2018). Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges. *Earth-Science Reviews*, 185, 901-927. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.009>.
- Maia, P. H. P., Cruz, M. J. M. (2013). Proposta de Modificações no Método Maia para avaliar a Vulnerabilidade do Aquífero Urucuia. *Cadernos de Geociências*, 10(2), 150-157.
- Margat, J. (1968). *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine ala pollution BRGM-Publication 68 SGL 198 HYD*.
- Marín, A. I., Rodríguez, J. F. M., Barberá, J. A., Fernández-Ortega, J., Mudarra, M., Sánchez, D., Andreo, B. (2021). Groundwater vulnerability to pollution in karst aquifers, considering key challenges and considerations: application to the Ubrique springs in southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 29(1), 379-396. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02279-8>.
- Melo, D. H. C. T. B. (2017). Mapeamento da Vulnerabilidade de Aquíferos Cársticos: Exemplos das Bacias Hidrográficas dos Rios Verde, Jacaré e Salitre, Bahia, Brasil. Tese de Doutorado.
- Menezes Ribeiro, D. D., De Moraes Nascimento, S. A., Garcia, A. J. V. (2016). Vulnerabilidade dos Aquíferos Cársticos Sapucari e Maruim, bacia sedimentar de Sergipe-Alagoas. *Águas Subterrâneas*, 30(3), 375-393. <https://doi.org/10.14295/ras.v30i3.28634>.
- Milek, C. B., Kishi, R. T., Gomes, J. (2014). Avaliação do risco de contaminação da água subterrânea do aquífero cárstico no município de Almirante Tamandaré/PR com o uso de mapa de índices de risco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 19(2), 89-100.
- Milek, C. B., Kishi, R. T., Gomes, J. Avaliação de incertezas geológicas na determinação do índice de vulnerabilidade SINTACS em uma área do aquífero cárste em Almirante Tamandaré. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSO HÍDRICOS 19*. Anais.2011.
- National Research Council, (NRC). (1993). *Groundwater Vulnerability Assessment: Predictive Relative Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- Nossa, T. C. B., Leal, L. R. B., Zucchi, M. D. R., Azevedo, A. E. G. D. (2012). Utilização de análises hidroquímicas e da metodologia COP para determinação da vulnerabilidade do aquífero cárstico salitre na região de Irecê-BA. XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços.
- Oliveira, K. B. M., De Moraes, F., Oliveira, L. M. (2017). "Utilização Do Método GOD Para Mapeamento Da Vulnerabilidade À Contaminação Das Águas Subterrâneas No Município De Lagoa Da Confusão, Tocantins, Brasil." VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Campo Grande/MS.
- Oliveira, O. A. (2024). Estudo e mapeamento da vulnerabilidade ambiental em ambiente cárstico da alta bacia hidrográfica do Rio Corrente no nordeste goiano. (Tese de Doutorado em Geografia). Universidade de Brasília, Distrito Federal.
- Parise, M., Gabrovsek, F., Kaufmann, G., Ravbar, N. (2018). Recent advances in karst research: from theory to fieldwork and applications. *Geological Society, London, Special Publications*, 466(1), 1-24. <https://doi.org/10.1144/SP466.26>.
- Peixoto, F. S., Cavalcante, I. N., Araújo, K. V., Silveira, R. N. M. C. (2020). Conservação e proteção da água subterrânea: uma revisão de metodologias de mapeamento de aquíferos para o ordenamento territorial. *Caminhos de Geografia*, 21(75), 1-14. <https://doi.org/10.14393/RCG217541888>.
- Pereira, D. L., Galvão, P., Lucon, T., Fujaco, M. A. (2019). Adapting the EPIK method to Brazilian Hydro (geo) logical context of the São Miguel watershed to assess karstic aquifer vulnerability to contamination. *Journal of South American Earth Sciences*, 90, 191-203. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.12.011>.
- Pételet-Giraud, E., Dörfli, N., Crochet, P. (2000). RISKE: method d'évaluation multicritère de la vulnérabilité des aquifers

- karstiques. Application aux systèmes des Fontanilles et Cent-Fonts (Hérault, Sud de la France) [Risk: methodology for multicriteria evaluation of the vulnerability of karst aquifers. Application to systems Fontanilles and Cent-Fonts Fontanilles (Hérault, southern France)]. *Hydrogéologie* 4: 71–88.
- Plagnes, V., Théry, S., Fontaine, L., Bakalowicz, M., Dörfliger, N. (2005). Karst vulnerability mapping: improvement of the RISKE method. *KARST* 2005. Water resources and environmental problems in karst, 14-19.
- Prasad, R. K., Singh, V. S., Krishnamacharyulu, S. K. G., Banerjee, P. (2011). Application of drastic model and GIS: for assessing vulnerability in hard rock granitic aquifer. *Environmental monitoring and assessment*, 176(1-4), 143-155. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1572-7>.
- Ravbar, N., Goldscheider, N. (2007) Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. *Acta Carsol* 36:397–411. <https://doi.org/10.3986/ac.v36i3.174>.
- Ribeiro, D., Zorn, M. (2021). SUSTAINABILITY AND Slovenian Karst Landscapes: Evaluation of a Low Karst Plain. *Sustainability*, 13(4), 1655. <https://doi.org/10.3390/su13041655>.
- Rodrigues, D. S., Campos, J. E. G., Martins-Ferreira, M. A. C. (2023). Caracterização de aquíferos fissuro-cársticos: Bases conceituais e proposições. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(3), 1288-1303. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.3.p1288-1303>.
- Souza, R. T. (2020). Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo: metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido. Tese de Doutorado.
- Souza, R. T., Heredia, O. S., Travassos, L. E. P., Velásquez, L. N. M., Sampaio, J. L. D. (2020). Influência da Espessura da Camada de solo na Proteção dos aquíferos Cársticos sob os Climas Tropical Úmido e Europeu Mediterrâneo, pelo Método de Vulnerabilidade COP. *Águas Subterrâneas*, 34(1), 50-65. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29762>.
- 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. <https://doi.org/10.4296/cwrj1801025>.
- Taltasse, P. (1972). Mapas de vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP). Universidade de São Paulo (IGc). Publ. Avulsa, (1).
- Tayer, T. C., Velásquez, L. N. M. (2017). Assessment of intrinsic vulnerability to the contamination of karst aquifer using the COP method in the Carste Lagoa Santa Environmental Protection Unit, Brazil. *Environmental earth sciences*, 76(13), 445. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6760-0>.
- Tufano, R., Allocca, V., Coda, S., Cusano, D., Fusco, F., Nicodemo, F., De Vita, P. (2020). Groundwater vulnerability of principal aquifers of the Campania region (southern Italy). *Journal of Maps*, 16(2), 565-576. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1787887>.
- Vale, D., Gonçalves, J. A. C. (2020) A Geodiversidade da Gruta do Limoeiro, Castelo-ES. In *Geologia Aplicada [recurso eletrônico] / Organizadores. – Dados eletrônicos. – Alegre, ES*.
- Van Beynen, P., Brinkmann, R., Van Beynen, K. (2012). A sustainability index for karst environments. *Journal of Cave and Karst Studies*, 74(2), 221-234. <https://doi.org/10.4311/2011SS0217>.
- Veni, G. (2002). Revising the karst map of the united states. *Journal of Cave and Karst Studies*, 64(1), 45-50.
- Viana, J. H. M., Machado, D. A., Loureiro, C. D. O. (2012). Vulnerabilidade natural das águas subterrâneas no entorno da Embrapa Milho e Sorgo. In *Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 19., 2012, Lages. Conservação do solo e da água no Brasil: preceitos e ações no ensino, na pesquisa e na extensão: anais. Rio de Janeiro: SBSC, 2012.
- Vias, J. M., Andreo, B., Perles, M. J., Carrasco, F., Vadillo, I., Jiménez, P. (2002, October). Preliminary proposal of a method for vulnerability mapping in carbonate aquifers. In *Second Nerja Cave Geol Symp Karst and Environment* (pp. 20-23).
- Vieira, L. C. M., Velasquez, L. N. M., Borba, R. P. (2020). Hidrogeoquímica como ferramenta para o reconhecimento de aquíferos em lacunas de perfis litológicos de poços tubulares. *Águas Subterrâneas*, 34(2), 204-220. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29764>.
- Villanueva, T. C. B., Leal, L. R. B., Zucchi, M. D. R., Azevedo, A. E. G. D., Villanueva, P. R. Aplicação do método COP para avaliação da

- vulnerabilidade intrínseca à contaminação do aquífero cárstico Salitre, Irecê-BA, Brasil. Brazilian journal of aquatic science and technology – BJASt, 2015, 19(1). <https://doi.org/10.14210/bjast.v19n1.6718>.
- Vogelbacher, A., Kazakis, N., Voudouris, K.; & Bold, S. (2019). Groundwater vulnerability and risk assessment in a karst aquifer of Greece using EPIK method. *Environments*, 6(11), 116. <https://doi.org/10.3390/environments6110116>.
- Vrba, J., Zaporozec, A. (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability, vol. 16. International Contributions to Hydrogeology, IAH, HeiseVerlag, Hannover.
- Walker, W. H. (1969). ILLINOIS GROUND WATER POLLUTION. *Journal-American Water Works Association*, 61(1), 31-40. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1969.tb03699.x>.
- White, W. B. (1988). *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrain*: Oxford University Press. New York, 464p.
- Zanoni, A. E. (1972). Ground-Water Pollution and Sanitary Landfills. A Critical Review. *Groundwater*, 10(1), 3-16. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1972.tb02895.x>.
- Zwahlen, F. (Ed.). (2003). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. Office for Official Publications of the European Communities.