

Avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas por meio dos métodos AHP e TOPSIS

Assessment of the vulnerability to groundwater contamination by AHP and TOPSIS methods

Adriana Maria Tedesco^{1*} , Gilson Adamczuk Oliveira¹ , Flávio Trojan² 

RESUMO

ABSTRACT

A crescente demanda e a diminuição da disponibilidade de água com qualidade devido à degradação constituem um desafio para os gestores dos recursos hídricos. As águas subterrâneas são recursos hídricos importantes que, em geral, apresentam boa qualidade. Porém, a elevação da contaminação das águas subterrâneas, causada principalmente por atividades antropogênicas e uso do solo, coloca em risco a segurança hídrica. A avaliação dos recursos hídricos subterrâneos e as decisões tomadas para proteção contra a degradação fazem parte de um processo complexo. A avaliação de áreas vulneráveis ao risco de contaminação é uma análise essencial para o planejamento e gestão. Neste estudo, utilizou-se metodologia multicritério para proposição de um modelo de avaliação da vulnerabilidade ao risco de contaminação por meio de informações de poços que fornecem água para o abastecimento público, destacando-se as áreas mais impactadas pela ação antropogênica. Doze poços foram avaliados quanto aos critérios: índice GOD, nitrato, potencial hidrogeniônico, sólidos totais dissolvidos e coliformes totais. A aplicação do método de multicritério AHP e TOPSIS resultou na ordenação dos poços que estão mais vulneráveis e que necessitam de medidas de proteção e controle de degradação. Os poços que são considerados mais vulneráveis estão localizados em meio urbano; assim, pode-se inferir que estão sendo degradados por efluentes lançados no solo sem o devido tratamento.

The growing demand and the declining availability of quality water due to degradation are a challenge for water resource managers. Groundwater is a vital water resource that is generally of good quality. However, with the increase of contamination caused mainly by anthropogenic activities, water safety is put at risk. The assessment in groundwater resources and decision-making to protect against degradation is a complex process. Assessing areas vulnerable to contamination risk is an essential analysis for planning and management. In this study, we used the multi-criteria methodology to propose a model for assessing vulnerability to contamination risk through information from wells that provide water for public supply, highlighting the areas most impacted by anthropogenic action. Twelve wells were evaluated under the following criteria: GOD index, nitrate, hydrogen potential, total dissolved solids, and total coliforms. The application of the AHP and TOPSIS multi-criteria methods resulted in the ordering of the wells that are most vulnerable and that need protection and degradation control measures. The wells that are considered more vulnerable are located in urban areas, so it can be inferred that they are being degraded by activities by effluents released into the soil without proper treatment.

Keywords: groundwater; vulnerability; water contamination; TOPSIS.

Palavras-chave: águas subterrâneas; vulnerabilidade; contaminação da água; TOPSIS.

INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas são fontes seguras e importantes de água potável, principalmente em locais onde as águas superficiais são escassas. No entanto, são recursos potencialmente vulneráveis que podem ser contaminados por atividades

antropogênicas, prejudicando sua utilização e reduzindo sua disponibilidade para o abastecimento (ALVARADO *et al.*, 2016).

A demanda por recursos hídricos tem aumentado com as atividades humanas, resultando em preocupações ecológicas e ambientais. Em geral, a qualidade

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Pato Branco (PR), Brasil.

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Ponta Grossa (PR), Brasil.

***Autora correspondente:** adrianamtedesco@gmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflito de interesses.

Financiamento: nenhum.

Recebido: 02/10/2019 - **Aceito:** 18/08/2020 - **Reg. ABES:** 20190322

da água subterrânea pode ser influenciada por vários processos, dentre os quais destacam-se: meios naturais, como velocidade da água no aquífero, qualidade da recarga, interação com solos e rochas, interação com outros tipos de aquíferos (MENEZES *et al.*, 2014) e atividades antropogênicas que envolvem fatores como o crescimento populacional, a urbanização acelerada, a diversificação das atividades econômicas e agrícolas, o uso inadequado do solo, a ineficiência na coleta e no tratamento de esgotos, bem como a superexploração de recursos hídricos, provocando a degradação quantitativa e qualitativa das águas subterrâneas (SETHY; SYED; KUMAR, 2017; SHAKERKHATIBI *et al.*, 2019).

A qualidade das águas é fortemente influenciada pelo uso e manejo dos solos de uma bacia hidrográfica (FIA *et al.*, 2015), portanto deve ser levada em conta a importância da urbanização e da agricultura para corpos d'água, a fim de prever o potencial poluidor de um determinado uso e desenvolver práticas de gestão (MENEZES *et al.*, 2016).

A vulnerabilidade de um aquífero refere-se ao seu grau de proteção natural contra potenciais ameaças de contaminação e depende das características litológicas e hidrogeológicas dos estratos que o separam da fonte de contaminação, dos gradientes hidráulicos que determinam o transporte das substâncias por meio da sequência de estratos no aquífero. A vulnerabilidade é definida como uma propriedade intrínseca do sistema de água subterrânea que depende da sensibilidade desse sistema aos impactos humanos e naturais (FOSTER *et al.*, 2006; WITKOWSKI; KOWALCZYK; VRBA, 2014; RIBEIRO; PINDO; DOMINGUEZ-GRANDA, 2017). A vulnerabilidade específica é definida como a suscetibilidade de águas subterrâneas a contaminantes específicos ou a um grupo de contaminantes, levando-se em consideração as propriedades contaminantes (EL-FADEL *et al.*, 2014; GOUDARZI *et al.*, 2017; MACHIWAL *et al.*, 2018).

Várias técnicas foram desenvolvidas para avaliar os impactos ambientais associados à contaminação das águas subterrâneas, como, por exemplo, o conceito de vulnerabilidade intrínseca do aquífero, que avalia as características hidrogeológicas, bem como utilizados os métodos: DRASTIC (ALLER; HACKETT; THORNHILL, 1987); SINTACS (CIVITA, 1994); *groundwater overall depth* (GOD) (FOSTER; HIRATA, 1988); e AVI (STEMPVOORT; EWERT; WASSENAAR, 1993).

Para o monitoramento da vulnerabilidade ao risco de contaminação do aquífero com baixo custo, sugere-se a utilização de parâmetros específicos de qualidade das águas subterrâneas, como, por exemplo, as concentrações de nitrato em áreas dominadas pela agricultura. Neste caso, os dados necessários para o estudo são as análises químicas das águas (REBOLLEDO *et al.*, 2016; SETHY; SYED; KUMAR, 2017). Na avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas realizada por (BUVANESHWARI *et al.*, 2017) foi mapeada a concentração de nitratos em dois períodos do ano.

A análise de decisão multicritério (MCDA) consiste em um conjunto de abordagens formais que tem como finalidade auxiliar na determinação de uma decisão importante individual ou em grupo, esclarecendo o problema e avaliando as alternativas por meio de múltiplos critérios (BELTON; STEWART, 2002). De todos os modelos MCDA disponíveis, o processo de hierarquia (AHP) e a técnica para ordem de preferência por similaridade com a solução ideal (TOPSIS) são os métodos mais frequentemente utilizados nas avaliações ambientais (AL-ABADI; AL-KUBAISI; AL-GHANIMY, 2018).

A aplicação de análise de multicritério em recursos hídricos foi identificada em diversas áreas como: Gestão de bacias hidrográficas; Gestão da água

subterrânea; Infraestrutura e seleção; Avaliação de projetos; Alocação de água; Política e planejamento da oferta de água; Qualidade da água; Gestão da qualidade; e Gestão de áreas marinhas (HAJKOWICZ; COLLINS, 2007).

No estudo realizado por (ALVARADO *et al.*, 2016) utilizou-se MCDA como uma ferramenta de decisão para facilitar o processo de priorização de poços que necessitavam de maior proteção contra risco de contaminação. Outros estudos que utilizaram esses métodos para avaliar os índices de qualidade e a vulnerabilidade intrínseca ou específica das águas subterrâneas estão citados em Ayed *et al.* (2017), Kumar, Gautam e Kumar (2014) e Kavurmaci (2016).

Assim, avaliar a vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas auxilia na tomada de medidas para o controle da degradação, pois a restauração da qualidade das águas representa desafios ambientais e econômicos. O objetivo deste estudo foi apresentar um modelo de avaliação das áreas mais vulneráveis à contaminação das águas subterrâneas explorando métodos multicritério, o que resultou em uma ordenação de áreas que necessitam prioritariamente de medidas de proteção e contribuiu para apoiar o processo de tomada de decisão para ações de preservação da qualidade.

METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, foi necessária a busca de: informações sobre poços — quais poderiam ser avaliados para compor as alternativas da análise MCDA; características físico-químicas e bacteriológicas da água; e informações do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), para avaliar a vulnerabilidade por meio do método GOD, a escolha dos critérios e quais os métodos a serem utilizados para avaliação.

Localização e área de estudo

O estudo foi realizado na região sudoeste do Paraná, situada no Sul do Brasil e pertencente ao SASG, que é do tipo fraturado, composto por derrames basálticos da formação Serra Geral, e está sobreposto ao Sistema Aquífero Guarani (SAG) na Bacia do Paraná, correspondendo a 75% da extensão da bacia (MOCELLIN; FERREIRA, 2009). O SASG se comporta como um aquífero livre e, sendo do tipo fraturado o fluxo da água, está associado às estruturas da formação Serra Geral. Sobre o aquífero há um manto com espessuras diferentes, mas de grande importância para a recarga desse sistema (BORGES *et al.*, 2017). É caracterizado como heterogêneo e anisotrópico, sendo um dos aquíferos mais importantes do estado do Paraná. Na região, a qualidade das águas subterrâneas é afetada negativamente pela poluição de fontes pontuais e não pontuais, como atividades agrícolas, águas residuais e outras substâncias que causam degradação desses recursos.

Alternativas

As alternativas selecionadas para este estudo foram 12 poços utilizados para abastecimento público de água. As informações para este estudo foram retiradas do banco de dados da Companhia de Saneamento do Paraná, que tem a concessão e realiza as análises físico-químicas e biológicas de controle de qualidade e demais informações dos poços que foram utilizadas para o estudo. Os poços selecionados têm vazões médias de 15,3 m³.h⁻¹, apresentam profundidade média de 181 m, sendo que a maioria está localizada em áreas urbanas. Os poços foram identificados como: A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A11 e A12.

Critérios

Os critérios podem ser considerados como eixos que direcionam a avaliação do decisor permitindo a realização de comparações entre as alternativas, constituem a representação do objetivo. Os critérios de avaliação podem ser classificados em atributos diretos ou indiretos.

A escolha dos critérios para análise da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas foi obtida por meio das análises dos parâmetros de qualidade dos poços, sendo selecionados os parâmetros específicos com base na sua relevância.

Para compor o critério 1, foi realizada a avaliação da vulnerabilidade dos poços por intermédio do método GOD, proposto por Foster e Hirata (1988), que, pela simplicidade de aplicação e praticidade nas análises dos resultados, tem sido amplamente utilizado na avaliação de aquíferos e como auxílio no gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos e no planejamento de políticas públicas.

O método GOD é baseado na análise de três parâmetros, representados por “G” (*groundwater hydraulic confinement*), que é o grau de confinamento do aquífero, que varia de 0 a 1; “O” (*overlying strata*), que corresponde ao tipo de litologia encontrada na zona não saturada, variando de 0,4 a 1; e “D” (*depth to groundwater table*), que corresponde à profundidade do nível d’água, variando de 0,6 a 1 (FOSTER *et al.*, 2006). É representado pela multiplicação dos parâmetros: $G \times O \times D$. Para este estudo, foi realizado o cálculo do índice GOD para os poços e utilizado como um dos critérios para a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas. O resultado da avaliação do método origina as escalas de vulnerabilidade (Tabela 1) que foram utilizadas para gerar os resultados dos valores do critério 1.

O resultado da avaliação da vulnerabilidade dos 12 poços por meio do método GOD para este estudo resultou em vulnerabilidade entre 0,25 e 0,42, ou seja, baixa a média vulnerabilidade à contaminação. Portanto, estão sendo impactados, visto que os municípios em que os poços estão localizados não têm sistema de coleta e tratamento de esgoto, podendo acarretar contaminação do recurso hídrico subterrâneo.

Para o critério 2, foi considerada a concentração de nitrato, que é um dos poluentes que mais afetam os aquíferos em todo o mundo. A contaminação das águas subterrâneas por nitrato tem causado preocupação, pois esse composto representa um importante indicador de contaminação antropogênica, por apresentar grande persistência e alta mobilidade, podendo atingir extensas áreas e permanecer dissolvido nas águas por várias décadas (SHAKERKATIBI *et al.*, 2019).

A concentração natural de nitrato nas águas subterrâneas é baixa, podendo aumentar devido ao uso excessivo de fertilizantes nitrogenados e ao lançamento

de esgoto no solo (GAO *et al.*, 2020). A contaminação por nitratos pode ter origem de vários caminhos diferentes, incluindo as fontes pontuais e difusas (ARAUZO; MARTÍNEZ-BASTIDA, 2015). Devido à persistência, sua remoção da água, para atender ao padrão de potabilidade, envolve altos investimentos, sendo tecnicamente inviável, prejudicando, assim, os abastecimentos público e privado (FOSTER *et al.*, 2006; BUVANESHWARI *et al.*, 2017).

Para o critério 3, foi selecionado o potencial hidrogeniônico (pH), que indica acidez, neutralidade ou alcalinidade da água. O pH de uma substância pode variar dependendo da concentração de sais, metais, ácidos, bases, substâncias orgânicas e temperatura, e pode influenciar diversos equilíbrios químicos, sendo um parâmetro importante em muitos estudos no campo do saneamento ambiental, pois por meio dessa análise pode-se verificar a qualidade da água e quais os tipos de efluentes lançados.

O critério 4 foi definido pela concentração de sólidos totais dissolvidos (STD), que considera todas as substâncias orgânicas e inorgânicas contidas em um líquido sob formas moleculares, ionizadas ou microgranulares. A entrada de sólidos na água pode ocorrer de forma natural (processos erosivos) ou antropogênica (lançamento de efluentes). As propriedades físico-químicas das águas subterrâneas são fatores fundamentais para a avaliação da qualidade da água, portanto é necessário investigar esses aspectos.

Como critério 5 foi considerada a presença de coliformes totais (CT), que são bactérias do grupo coliforme largamente utilizadas na avaliação da qualidade das águas, servindo de parâmetro microbiológico básico às leis de consumo criadas pelos governos e pelas empresas fornecedoras que se utilizam desse número para garantir a qualidade da água para o consumo humano. Os CT são bactérias Gram-negativas, aeróbias ou anaeróbias, que não formam esporos e são associadas à decomposição de matéria orgânica em geral. A investigação dos microrganismos pode ser uma análise valiosa para identificar padrões de contaminação espacial e temporal resultantes de impactos antropogênicos (LORENZO *et al.*, 2015).

No estudo das águas subterrâneas, os parâmetros microbiológicos têm papel importante para a saúde pública, devido ao enfoque dos aspectos sanitários e ao estudo do comportamento desses indicadores de poluição. Conforme a Portaria de Consolidação nº 5/2017, os indicadores mais utilizados são os índices de CT e coliformes termotolerantes, visto que sua presença na água não representa, por si só, um perigo à saúde, mas indica a possível presença de outros microrganismos causadores de doenças.

As análises dos parâmetros físico-químicos e bacteriológicos foram realizadas conforme Portaria de Consolidação nº 5, do Ministério da Saúde do Brasil (BRASIL, 2017), sendo que para cada parâmetro há um procedimento padrão para a realização da análise. Com relação aos critérios analisados, os valores encontrados são apresentados na Tabela 2.

Normalização dos critérios

Para normalização dos dados da matriz de decisão para aplicação do método de ordenação dos poços, foram utilizadas as seguintes normas: 9, para os critérios nitrato e STD; e 30, para o critério pH, conforme técnicas de normalizações propostas por (JAHAN; EDWARDS, 2015). As normalizações aplicadas para os critérios estão dispostas na Tabela 3.

Com as informações iniciais dos critérios de cada poço foi gerada a matriz de avaliação. Após a aplicação das fórmulas de normalização para cada critério, foram gerados os dados para aplicação no método TOPSIS, conforme a Tabela 4.

Tabela 1 - Índice de vulnerabilidade método Groundwater Overall Depth.

| Valores | Nível de vulnerabilidade |
|---------|--------------------------|
| 0-0,1 | Insignificante |
| 0,1-0,3 | Baixa |
| 0,3-0,5 | Média |
| 0,5-0,7 | Alta |
| 0,7-1 | Extrema |

Fonte: Foster e Hirata (1988).

Tabela 2 - Dados dos critérios.

| Poço | GOD | Nitrato | STD | pH | C. totais |
|------|-------|---------|-----|-----|-----------|
| P 01 | 0,336 | 2,50 | 130 | 6,7 | Presença |
| P 02 | 0,252 | 0,15 | 185 | 9,5 | Ausência |
| P 03 | 0,420 | 1,90 | 149 | 9,4 | Ausência |
| P 04 | 0,336 | 5,05 | 76 | 5,9 | Presença |
| P 05 | 0,252 | 2,73 | 132 | 7,4 | Ausência |
| P 06 | 0,252 | 5,07 | 167 | 7,5 | Presença |
| P 07 | 0,420 | 0,53 | 101 | 6,7 | Ausência |
| P 08 | 0,420 | 3,90 | 115 | 6,2 | Presença |
| P 09 | 0,420 | 0,50 | 121 | 6,7 | Presença |
| P 10 | 0,336 | 0,45 | 109 | 8,4 | Ausência |
| P 11 | 0,252 | 0,10 | 200 | 7,9 | Presença |
| P 12 | 0,336 | 3,26 | 125 | 7,8 | Presença |

GOD: Groundwater Overall Depth; STD: sólidos totais dissolvidos; C. totais: coliformes totais.

Fonte: resultados de análises dos parâmetros da empresa estudada.

Tabela 3 - Fórmulas para normalização dos critérios.

| Critério | Escala original | Escala de avaliação | |
|----------------------------|---------------------------------|----------------------|--|
| Nitrato | Máximo 10 mg.L ⁻¹ | Norma 9 | $v_j = \frac{v_j}{10 \text{ mg/L}}$ |
| pH | Entre 6 e 9,5 | Norma 30 | $1 - \frac{ x_{ij} - T_j }{\text{Max}\{x_{ij}^{\text{max}}, T_j\} - \text{Min}\{x_{ij}^{\text{min}}, T_j\}}$ |
| Sólidos totais dissolvidos | Máximo 1.000 mg.L ⁻¹ | Norma 9 | $v_j = \frac{v_j}{1000 \text{ mg/L}}$ |
| Coliformes totais | Ausência em 100 mL | Presença Ausência | 1 0 |

Fonte: adaptado de Jahan e Edwards (2015).

Tabela 4 - Resultado da aplicação da normalização.

| Alternativas | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A1 | 0,336 | 0,190 | 0,914 | 0,130 | 1,000 |
| A2 | 0,252 | 0,000 | 0,286 | 0,174 | 0,000 |
| A3 | 0,420 | 0,000 | 0,314 | 0,159 | 0,000 |
| A4 | 0,336 | 0,505 | 0,714 | 0,080 | 1,000 |
| A5 | 0,252 | 0,273 | 0,886 | 0,143 | 0,000 |
| A6 | 0,252 | 0,507 | 0,857 | 0,139 | 1,000 |
| A7 | 0,420 | 0,053 | 0,914 | 0,099 | 0,000 |
| A8 | 0,420 | 0,390 | 0,771 | 0,111 | 1,000 |
| A9 | 0,420 | 0,000 | 0,914 | 0,118 | 1,000 |
| A10 | 0,336 | 0,045 | 0,600 | 0,116 | 0,000 |
| A11 | 0,252 | 0,000 | 0,743 | 0,195 | 1,000 |
| A12 | 0,336 | 0,326 | 0,771 | 0,121 | 1,000 |

Fonte: elaboração própria.

Definição da importância dos critérios

Para definir a importância dos critérios, foi utilizado o AHP (*analytic hierarchy process*) (SAATY, 1977), um método de análise multicritério amplamente utilizado no apoio à tomada de decisão que envolve complexidade e subjetividade. O princípio do método é decompor fatores que afetam os problemas complexos e categorizar esses fatores em diferentes níveis em uma estrutura hierárquica, auxiliando a tomada de decisão e permitindo a integração entre critérios qualitativos e quantitativos, tendo como objetivo analisar o julgamento de especialista no processo de decisão, transformando os problemas complexos em problemas mais simples por hierarquia de decisão (NOH; LEE, 2003).

A importância dos critérios foi definida com o auxílio de três especialistas da companhia de saneamento da região estudada, onde as matrizes de comparação são traduzidas de uma linguagem verbal para a numérica. A escala de Saaty tem nove graduações, por meio das quais são definidos cinco como principais. Para este estudo, foi adaptada a escala de Saaty, conforme a Tabela 5.

O método AHP direciona os especialistas a evidenciar a importância relativa de cada critério na hierarquia estabelecida. Esses julgamentos são traduzidos em números, que são referidos como pesos. Segundo Ji e Jiang (2003) relatam a importância da escala na aplicação do AHP, pois tem impacto significativo na consistência e na precisão dos resultados. A determinação do vetor de prioridades a partir de matrizes de comparação pareada é parte importante do método, que tem diferentes formas para extrair o vetor de prioridades, como a normalização aditiva, proposta por (SRDJEVIC, 2005). Nesse método utiliza-se o índice de consistência harmônica, que considera o valor máximo de 0,10 para matrizes de ordem cinco (STEIN; MIZZLI, 2007).

A aplicação da avaliação da importância dos critérios foi feita por meio do método AHP, sendo definidos os pesos por três especialistas avaliadores selecionados com conhecimento na área, para avaliar os critérios e dar a importância para eles conforme a sua opinião. Na sequência, foram agrupados e calculados por meio da média geométrica normalizada gerando os pesos dos critérios para este estudo, pois o método requer peso para designar a importância dos critérios. A Tabela 6 apresenta os respectivos pesos gerados de cada critério.

Método TOPSIS

Com os critérios normalizados e seus respectivos pesos obtidos, utilizou-se para a ordenação das alternativas o método TOPSIS (HWANG; YOON, 1981),

Tabela 5 - Escala de Saaty adaptada.

| Valor | Definição |
|-------|--------------------------------|
| 0,2 | Absolutamente menos importante |
| 0,25 | Fortemente menos importante |
| 0,33 | Na Média menos importante |
| 0,5 | Fracamente menos importante |
| 1,0 | Importância igual |
| 2,0 | Fracamente mais importante |
| 3,0 | Média importância |
| 4,0 | Fortemente mais importante |
| 5,0 | Absolutamente mais importante |

Fonte: adaptado de Saaty (1977).

Tabela 6 - Pesos dos critérios.

| Critério | Peso |
|----------|-------|
| C1 | 0,091 |
| C2 | 0,377 |
| C3 | 0,107 |
| C4 | 0,123 |
| C5 | 0,301 |

Fonte: elaboração própria.

caracterizado por sua facilidade na utilização e robustez de resultados. Por meio da construção da matriz de decisão $m \times n$, na qual “m” representa as alternativas e “n” os critérios de avaliação, é possível iniciar a aplicação das etapas sugeridas pela metodologia descrita pelas Equações de 1 a 6:

- Cálculo da matriz normalizada: $X_{ij} = \frac{x_{ij}}{(\sum_{i=1}^m x^2_{ij})^{1/2}} \rightarrow$ (1);
- 2ª etapa – normalização ponderada da matriz: $v_{ij} = w_j \cdot x'_{ij} \rightarrow$ (2);
- 3ª etapa – soluções positivas (A^+) e negativas (A^-) ideais;
- $A^+ = \{\max_j n_{ij} | j = 1, 2, \dots, m\} = \{n^+_1, \dots, n^+_j, \dots, n^+_m\} \rightarrow$ (3);
- $A^- = \{\min_j n_{ij} | j = 1, 2, \dots, m\} = \{n^-_1, \dots, n^-_j, \dots, n^-_m\} \rightarrow$ (4);
- 4ª etapa – distâncias positiva e negativa ideal d^+ e d^- ;
- $S^+_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v^+_j)^2}$ e $S^-_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v^-_j)^2} \rightarrow$ (5);
- 5ª etapa – coeficiente de proximidade ideal: $C^+_i = S^-_i / (S^+_i + S^-_i) \rightarrow$ (6);
- Ranking das alternativas.

RESULTADOS

Após realizados todos os procedimentos para aplicação do método TOPSIS e feita a sua aplicação para a avaliação da vulnerabilidade, foi gerado um ranking de alternativas, sendo que, para este estudo, foi utilizado o ranking inverso, ou seja, a pior alternativa é considerada a mais vulnerável à contaminação e a melhor alternativa é a menos vulnerável. A ordenação das alternativas quanto à vulnerabilidade é apresentada na Tabela 7.

De acordo com a ordenação, foi possível verificar que a alternativa A6 se apresenta como a mais vulnerável à contaminação, de acordo com os critérios estabelecidos neste estudo, e que a alternativa A7 é a menos vulnerável. Após aplicação da metodologia são obtidas informações sobre as áreas que estão mais vulneráveis. Assim, as ações de controle nas áreas identificadas como mais vulneráveis à contaminação podem ser priorizadas para evitar degradação e perdas das fontes de água.

Em projetos relacionados aos recursos hídricos, ganhos futuros aparecem de forma indireta, o que torna a decisão por investimentos ainda mais complexa. Portanto, conduzir uma análise técnica e econômica ampla subsidia os decisores a definir possíveis opções que são particularmente importantes na gestão de recursos hídricos (GOFFI *et al.*, 2018).

A avaliação da vulnerabilidade é um elemento essencial na avaliação da contaminação das águas subterrâneas. Essa abordagem fornece uma análise visual, auxiliando os gestores na tomada de decisão e a alcançar o gerenciamento sustentável da água. Há variações na utilização dos métodos que avaliam a vulnerabilidade, e sua eficácia está no que se quer avaliar; por exemplo, o método GOD é adequado para projetar grandes áreas, como no gerenciamento de terras;

Tabela 7 - Ranking das alternativas.

| Alternativas | Ordenação |
|--------------|-----------|
| A6 | 1º |
| A4 | 2º |
| A8 | 3º |
| A12 | 4º |
| A1 | 5º |
| A5 | 6º |
| A11 | 7º |
| A9 | 8º |
| A2 | 9º |
| A3 | 10º |
| A10 | 11º |
| A7 | 12º |

Fonte: elaboração própria.

o DRASTIC é mais preciso em estudos detalhados geoambientais (MARIA, 2018). No estudo realizado avaliou-se a vulnerabilidade específica por meio dos métodos AHP e TOPSIS, sendo mais preciso na tomada de decisão no âmbito local e demanda poucos recursos para a sua realização.

Nesse sentido, a avaliação apresentada neste trabalho permite um resultado amplo das características dos sistemas de captação investigados, ordenando as fontes subterrâneas que estão mais vulneráveis ou sob ameaça das atividades antropogênicas que as degradam. Assim, auxilia as empresas de saneamento a buscar e direcionar recursos nas áreas mais suscetíveis, para que sejam evitadas as perdas de fontes de captação, eventos que geram prejuízos para a empresa e ao meio ambiente.

CONCLUSÕES

A avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas, sob a perspectiva do apoio multicritério à tomada de decisão, apresenta um modelo de avaliação que resultou na ordenação dos poços que estão mais vulneráveis nos aspectos intrínsecos e específicos, indicando as áreas em que as medidas de proteção prioritárias são necessárias em face de uma ameaça de poluição das águas subterrâneas, facilitando aos gestores a tomada de decisão mais rápida e eficiente para o controle da degradação.

Conforme exposto nos resultados, as alternativas mais vulneráveis estão localizadas em áreas urbanas, podendo-se inferir que há influência das atividades antropogênicas na degradação da qualidade das águas subterrâneas, principalmente das fontes de poluentes originárias das fossas negras ou do esgotamento subterrâneo sem tratamento. Nesses locais, não há coleta e tratamento de esgoto, ou seja, os efluentes são lançados em fossas e, com o aumento da população, a tendência é de aumento da degradação das águas subterrâneas, se medidas de proteção não forem tomadas.

A ordenação proposta é importante para avaliação e proteção preventiva das reservas de águas, pois os resultados facilitam o desenvolvimento de ações de prevenção, evitando a degradação ou a possível perda desses sistemas produtivos. Portanto, há necessidade de se proteger e buscar o uso sustentável, para que se mantenham recursos hídricos disponíveis e de qualidade.

Os avanços tecnológicos priorizam a disponibilidade de produtos e técnicas que melhoram o tratamento das águas poluídas, para torná-las potáveis aos consumidores. Porém, a premissa deve ser a preservação das fontes e este estudo viabiliza o cenário das fontes para tomada de decisão quanto à preservação e ao uso sustentável.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Tedesco, M. A.: Administração do Projeto, Conceituação, Metodologia, Curadoria de Dados, Análise Formal, Escrita – Primeira Redação, Recursos, Escrita – Revisão e Edição. Oliveira, A. G.: Visualização, Supervisão. Trojan, F.: Metodologia, Visualização, Supervisão, Validação.

REFERÊNCIAS

- AL-ABADI, A.M.; AL-KUBAISI, Q.Y.; AL-GHANIMY, M.A. Mapping groundwater zones contaminated by hydrocarbons in the Dammam aquifer in the Karbala-Najaf plateau, Iraq. *Environmental Earth Sciences*, v. 77, n. 18, p. 633, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7827-2>
- ALLER, L.; HACKETT, G.; THORNHILL, J. DRASTIC: standardized System for Evaluating Ground ater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. Estados Unidos: EPA, 1987.
- ALVARADO, A.; ESTELLER, M.V.; QUENTIN, E.; EXPÓSITO, J.L. Multi-Criteria Decision Analysis and GIS Approach for Prioritization of Drinking Water Utilities Protection Based on their Vulnerability to Contamination. *Water Resources Management*, v. 30, n. 4, p. 1549-1566, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1239-4>
- ARAUZO, M.; MARTÍNEZ-BASTIDA, J.J. Environmental factors affecting diffuse nitrate pollution in the major aquifers of central Spain: groundwater vulnerability vs. groundwater pollution. *Environmental Earth Sciences*, v. 73, n. 12, p. 8271-8286, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3989-8>
- AYED, B.; JMAL, I.; SAHAL, S.; BOURI, S. Assessment of groundwater vulnerability using a specific vulnerability method: Case of Maritime Djeffara shallow aquifer (Southeastern Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, v. 10, n. 12, p. 262, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3035-8>
- BELTON, V.; STEWART, T. *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Springer Science e Business Media, 2002.
- BORGES, V.M.; FAN, F.M.; REGINATO, P.A.R.; ATHAYDE, G.B. Groundwater recharge estimating in the Serra Geral aquifer system outcrop area - Paraná State, Brazil. *Águas Subterrâneas*, v. 31, n. 4, p. 338-346, 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i4.28872>
- BRASIL. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, 2017.
- BUVANESHWARI, S.; RIOTTE, J.; SEKHAR, M.; KUMAR, M.S.M.; SHARMA, A.K.; DUPREY, J.L.; AUDRY, S.; GIRIRAJA, P.R.; PRAVEENKUMARREDDY, Y.; MOGER, H.; DURAND, P.; BRAUN, J.-J.; RUIZ, L. Groundwater resource vulnerability and spatial variability of nitrate contamination: Insights from high density tubewell monitoring in a hard rock aquifer. *Science of the Total Environment*, v. 579, p. 838-847, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.017>
- CIVITA, M. Le Carte Délia. Vulnerabilitédegli Acquiferiall'In-qlnamento Maps of aquifer vulnerability to pollution: Teoria e Pratica. *Pitagora*, 1994.
- EL-FADEL, M.; TOMASZKIEWICZ, M.; ADRA, Y.; SADEK, S.; NAJM, M.A. GIS-based assessment for the development of a groundwater quality index towards sustainable aquifer management. *Water Resources Management*, v. 28, n. 11, p. 3471-3487, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0683-2>
- FIA, R.; TADEU, H.C.; MENEZES, J.P.C.; FIA, F.R.L.; OLIVEIRA, L.F.C. Qualidade da água de um ecossistema lótico urbano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 1, p. 267-275, 2015.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. *Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais*. World Bank, 2006.
- FOSTER, S.D.S.; HIRATA, R.C.A. *Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data*. Lima: CEPIS/PAHO/WHO, 1988. v. 78, n. 9.
- GAO, S.; LI, C.; JIA, C.; ZHANG, H.; GUAN, Q.; WU, X.; WANG, J.; LV, M. Health risk assessment of groundwater nitrate contamination: a case study of a typical karst hydrogeological unit in East China. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, n. 9, p. 9274-9287, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07075-w>
- GOFFI, A.S.; TROJAN, F.; LIMA, J.D.; LIZOT, M.; THESARI, S.S. Economic feasibility for selecting wastewater treatment systems. *Water Science and Technology*, v. 78, n. 12, p. 2518-2531, 2018. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.012>
- GOUDARZI, S.; JOZI, S.A.; MONAVARI, S.M.; KARBASI, A.; HASANI, A.H. Assessment of groundwater vulnerability to nitrate pollution caused by agricultural practices. *Water Quality Research Journal of Canada*, v. 52, n. 1, p. 64-77, 2017. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2017.031>
- HAJKOWICZ, S.; COLLINS, K. A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Resources Management*, v. 21, n. 9, p. 1553-1566, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9112-5>
- HWANG, C.L.; YOON, K.P. *Multiple attributes decision making methods and applications*. Berlim: Springer-Verlag, 1981.
- JAHAN, A.; EDWARDS, K.L. A state-of-the-art survey on the influence of normalization techniques in ranking: Improving the materials selection process in engineering design. *Materials and Design*, v. 65, p. 335-342, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.022>
- JI, P.; JIANG, R. Scale transitivity in the AHP. *Journal of the Operational Research Society*, v. 54, n. 8, p. 896-905, 2003. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601557>
- KAVURMACI, M. Evaluation of groundwater quality using a GIS-MCDA-based model: a case study in Aksaray, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, n. 18, p. 1258, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6074-7>

- KUMAR, T.; GAUTAM, A.K.; KUMAR, T. Appraising the accuracy of GIS-based Multi-criteria decision making technique for delineation of Groundwater potential zones. *Water Resources Management*, v. 28, n. 13, p. 4449-4466, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0663-6>
- LORENZO, T.; CIFONI, M.; LOMBARDO, P.; FIASCA, B.; GALASSI, D.M.P. Ammonium threshold values for groundwater quality in the EU may not protect groundwater fauna: evidence from an alluvial aquifer in Italy. *Hydrobiologia*, v. 743, p. 139-150, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2018-y>
- MACHIWAL, D.; JHA, M.K.; SINGH, V.P.; MOHAN, C. Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges. *Earth-Science Reviews*, v. 185, p. 901-927, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.009>
- MARIA, R. Comparative studies of groundwater vulnerability assessment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 118, n. 1, 2018.
- MENEZES, J.P.; BERTOSSI, A.P.A.; SANTOS, A.R.; NEVES, M.A. Correlation between land use and groundwater quality. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 19, n. 2, p. 173-186, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522014000200008>
- MENEZES, J.P.C.; BITTENCOURT, R.P.; FARIAS, M.S.; BELLO, I.P.; FIA, R.; OLIVEIRA, L.F.C. Relação entre padrões de uso e ocupação do solo e qualidade da água em uma bacia hidrográfica urbana. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 3, p. 519-534, 2016. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016145405>
- MOCELLIN, R.C.; FERREIRA, F.J.F. Conectividade e compartimentação dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani no sudoeste do estado do Paraná, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 39, n. 3, p. 567-579, 2009.
- NOH, J.; LEE, K.M. Application of multiattribute decision-making methods for the determination of relative significance factor of impact categories. *Environmental Management*, v. 31, n. 5, p. 633-641, 2003. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2907-0>
- REBOLLEDO, B.; GIL, A.; FLOTATS, X.; SÁNCHEZ, J.A. Assessment of groundwater vulnerability to nitrates from agricultural sources using a GIS-compatible logic multicriteria model. *Journal of Environmental Management*, v. 171, p. 70-80, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.041>
- RIBEIRO, L.; PINDO, J.C.; DOMINGUEZ-GRANDA, L. Assessment of groundwater vulnerability in the Daule aquifer, Ecuador, using the susceptibility index method. *Science of the Total Environment*, v. 574, p. 1674-1683, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.004>
- SAATY, T.L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, v. 15, n. 3, p. 234-281, 1977. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- SETHY, S.N.; SYED, T.H.; KUMAR, A. Evaluation of groundwater quality in parts of the Southern Gangetic Plain using water quality indices. *Environmental Earth Sciences*, v. 76, n. 3, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6434-y>
- SHAKERKHATIBI, M.; MOSAFERI, M.; POURAKBAR, M.; AHMADNEJAD, M.; SAFAVI, N.; BANITORAB, F. Comprehensive investigation of groundwater quality in the north-west of Iran: Physicochemical and heavy metal analysis. *Groundwater for Sustainable Development*, v. 8, p. 156-168, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.10.006>
- SRDJEVIC, B. Combining different prioritization methods in the analytic hierarchy process synthesis. *Computers and Operations Research*, v. 32, n. 7, p. 1897-1919, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2003.12.005>
- STEIN, W.E.; MIZZI, P.J. The harmonic consistency index for the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, v. 177, n. 1, p. 488-497, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.10.057>
- STEMPVOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. Aquifer Vulnerability Index: a Gis - Compatible Method for Groundwater Vulnerability Mapping. *Canadian Water Resources Journal*, v. 18, n. 1, p. 25-37, 1993. <https://doi.org/10.4296/cwrj1801025>
- WITKOWSKI, A.J.; KOWALCZYK, A.; VRBA, J. Groundwater Vulnerability Assessment and Mapping. CRC Press, 2014.