

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS**

**ADRIANA MARIA TEDESCO**

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**  
**POR MEIO DOS MÉTODOS AHP E TOPSIS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**PATO BRANCO - PR**

**2018**

**ADRIANA MARIA TEDESCO**

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS  
POR MEIO DOS MÉTODOS AHP E TOPSIS**

Dissertação apresentada como requisito para à obtenção do título Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, do programa de pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Trojan

**PATO BRANCO - PR**

**2018**

T256a Tedesco, Adriana Maria.

Avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas por meio dos métodos AHP e TOPSIS / Adriana Maria Tedesco. – 2018.

98 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Trojan

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. Pato Branco, PR, 2018.

Bibliografia: f. 86 - 93.

1. Águas subterrâneas. 2. Água - Contaminação. 3. Abastecimento de água. 4. Água – Qualidade. I. Trojan, Flávio, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. III. Título.

CDD 22. ed. 670.42

Ficha Catalográfica elaborada por  
Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630  
Biblioteca da UTFPR Campus Pato Branco



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Pato Branco  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
*Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Produção e Sistemas*



## **TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº42**

A Dissertação de Mestrado intitulada “**Avaliação da Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas: por meio dos métodos AHP e TOPSIS**”, defendida em sessão pública pela candidata **Adriana Maria Tedesco**, no dia 08 de novembro de 2018, foi julgada para à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, área de concentração Gestão dos Sistemas Produtivos, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas.

### **BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Flávio Trojan - Presidente - UTFPR

Profª Drª Rosana Cristina Biral Leme - UNIOESTE

Prof. Dr. Gilson Adamczuk Oliveira - UTFPR

Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Trentin - UTFPR

Prof. Dr. Dalmarino Setti - UTFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo à assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Pato Branco, 22 de novembro de 2018.

Carimbo e assinatura do Coordenador do Programa.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus e à Nossa Senhora por esta conquista, por terem me iluminado, me dado força e saúde para superar as dificuldades.

À todos da minha família, em especial aos meus pais, ao meu filho Gabriel, a Vlademir e a Adiane, que estiveram comigo e me apoiaram.

Ao meu orientador Prof. Dr. Flávio Trojan pela paciência, compreensão e ajuda.

À esta Universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram esta conquista.

Agradeço aos membros da banca os professores Dr. Gilson Adamzuck Oliveira, Dr. Marcelo Trentin, Dr. Dalmarino Setti e a Professora Dra. Rosana Cristina Biral Leme por toda ajuda, aprendizado e contribuições para este trabalho.

À secretária do programa PPGEPS Adriani Michelon pela atenção e ajuda.

À Companhia de Saneamento do Paraná, regional de Pato Branco pela colaboração e disponibilização das informações.

Às colegas e amigas Cassiane e Poliana com as quais compartilhei aprendizado e angústias durante este período.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

Obrigada!

"Nunca o homem inventará nada mais simples, nem mais belo do que uma manifestação da natureza. Dada a causa, a natureza produz o efeito no modo mais breve em que pode ser produzido".

(Leonardo da Vinci)

## RESUMO

TEDESCO, A.M. **Avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas por meio dos Métodos AHP e TOPSIS**. 2018. 98 folhas. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

As águas subterrâneas são recursos hídricos importantes que apresentam boa qualidade e melhores condições de proteção aos efeitos das atividades antropogênicas. Porém, a elevação da contaminação das águas subterrâneas, causada principalmente por atividades antropogênicas tais como: lançamento de resíduos sem tratamento, aplicação descontrolada de fertilizantes na agricultura e outros produtos agrícolas nos solos estão levando à degradação desses recursos hídricos. A poluição tem aumentado significativamente a cada ano ao passo que a demanda por água de qualidade também aumentou. Portanto, esse desequilíbrio deve ser levado em consideração e há a necessidade de tomada de medidas de proteção e recuperação dos recursos. Esse uso insustentável torna as fontes escassas e coloca em risco a segurança hídrica. A avaliação dos recursos hídricos subterrâneos e as tomadas decisões para proteção contra a degradação é um processo relevante e complexo. A avaliação de áreas vulneráveis é uma análise essencial para o planejamento e gestão, e a utilização de métodos apropriados podem gerar informações precisas e eficientes para a tomada de decisão. Neste estudo, utilizou-se a metodologia multicritério para proposição de um modelo de avaliação da vulnerabilidade através de poços que fornecem água para o abastecimento público. O modelo propôs uma ordenação de áreas, destacando as mais vulneráveis aos impactos antropogênicos na região. Doze poços foram avaliados sob os critérios: índice GOD (Parâmetro intrínseco), Nitrato, pH, STD e Coliformes totais (Parâmetros específicos). Realizou-se, a aplicação do método de multicritério AHP e TOPSIS para avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas, onde o resultado propôs uma ordenação dos poços que estão mais vulneráveis e que necessitam de medidas de proteção e controle de degradação. A alternativa A6 apresentou maior vulnerabilidade e a A7 como menos vulnerável. 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.

**Palavras-chave:** Águas Subterrâneas. Vulnerabilidade. Contaminação da Água. Abastecimento público.

## ABSTRACT

TEDESCO, A.M. **Assessment of groundwater vulnerability through AHP and TOPSIS methods**. 2018. 98 sheets. Dissertation of Masters in Production Engineering and Systems - Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2018.

Groundwater is an important water resource that has good quality and better protection for anthropogenic activities. However, the production of food for fertilizer eradication in agriculture and in the production of agricultural products in soybean plantations is no longer old. Mining has had a significant impact every year and a demand for quality water has also increased. Therefore, this imbalance must be taken into account and necessary to take measures of protection and recovery of resources. This unsustainable use makes them scarce and puts water safety at risk. The assessment of water and residential resources is a protective measure against degradation is a relevant and complex process. Area assessment is essential information for the planning and use of useful and detailed information for decision making. In this study, a multi-criteria methodology was used to propose a vulnerability assessment model through the wells that water for the public supply. The model proposed a classification of areas, highlighting the vulnerabilities to the anthropogenic impacts in the region. Twelve wells were evaluated under the following criteria: GOD index (Intrinsic parameter), Nitrate, pH, STD and total Coliforms (Specific parameters). An application of the multi-criteria AHP and TOPSIS was carried out to assess the vulnerability of groundwater, where the result is an ordering of wells that are most vulnerable and have the least capacity for protection and degradation. The alternative A6 was more vulnerable and A7 was less vulnerable. The wells that are most vulnerable are located in the urban environment, so it can be inferred that they are being degraded by effluents thrown into the soil without proper treatment.

**Keywords:** Groundwater. Vulnerability. Water contamination. Public Supply.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama do processo .....	61
Figura 2 - Mapa da área de estudo .....	62
Figura 3 - Poços desativados .....	72
Figura 4 - Comparação vazão captada e outorgada .....	73
Figura 5 - Concentração de nitrato área urbana e rural .....	75
Figura 6 - Tendência próximos 10 anos áreas urbanas .....	76
Figura 7 - Tendência próximos 10 anos áreas rurais .....	77
Figura 8 - Análise de sensibilidade critério GOD .....	79
Figura 9 - Análise de sensibilidade critério Nitrato .....	79
Figura 10 - Análise de sensibilidade critério pH .....	80
Figura 11 - Análise de sensibilidade critério STD .....	80
Figura 12 - Análise de sensibilidade critério CT .....	81
Figura 13 - Análise de sensibilidade global .....	81
Quadro 1 - Contaminantes e fontes de poluição .....	39
Quadro 2 - Descrição das abordagens dos métodos multicritério .....	53

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Escala de Saaty .....	57
Tabela 2 - Características dos poços .....	62
Tabela 3 - Volumes captados.....	63
Tabela 4 - Escala de Saaty adaptada .....	66
Tabela 5 - Normalização dos critérios .....	67
Tabela 6 - Critérios normalizados.....	69
Tabela 7 - Pesos dos critérios .....	71
Tabela 8 - Parâmetros de qualidade .....	74
Tabela 9 - Ranking das alternativas .....	77

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
CT	Coliformes totais
CWA	<i>Clean Water Act</i>
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
MCDA	<i>Multiple Criteria Decision Analysis</i>
MS	Ministério da Saúde
MS	Ministério da Saúde
OD	Oxigênio dissolvido
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organizações das Nações Unidas
Ph	Potencial Hidrogeônico
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PROKNOW-C	<i>Knowledge Development Process – Constructivist</i>
SAGA	Sistema Aquífero Grande Amazônia
SASG	Sistema aquífero Serra Geral
SNIS	Sistema Nacional de informação sobre Saneamento
STD	Sólidos totais dissolvidos
TOPSIS	<i>Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution</i>
UNICEF	Fundo das Nações Unidas para a Infância
VMP	Valor Máximo Permitido
WQI	<i>Water Quality Index</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	14
1.2 PROBLEMA .....	17
1.3 OBJETIVOS .....	18
1.3.1 Objetivo Geral .....	18
1.3.2 Objetivo Específico.....	19
1.4 JUSTIFICATIVA .....	19
1.5 ESTRUTURAS DA DISSERTAÇÃO .....	20
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>22</b>
2.1 CARACTERÍSTICAS DOS AQUÍFEROS .....	22
2.1.1. Formação dos Aquíferos e os principais aquíferos brasileiros .....	22
2.1.2 Sistema Aquífero Serra Geral .....	24
2.1.3 Poços de captação .....	25
2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	27
2.3 ASPECTO E DEGRADAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	28
2.3.1 Usos e importância das águas Subterrâneas.....	28
2.3.2 Impactos das águas subterrâneas .....	30
2.3.3 Parâmetros de qualidade da água .....	33
2.3.4 Parâmetros Físico-químicos.....	35
2.3.5 Parâmetros Biológicos.....	37
2.4 FONTES DE CONTAMINAÇÃO.....	38
2.4.1 Contaminação por Nitrato.....	39
2.4.2 Coliformes totais e termotolerantes .....	42
2.4.3 Fontes de contaminações e sua migração para as águas subterrâneas.....	43
2.4.4 Interação com água de superfície .....	45
2.4.5 Intrusão salina .....	45
2.4.6 De quem é a responsabilidade de proteger as águas subterrâneas? .....	46
2.5 VULNERABILIDADE INTRÍNSECA E ESPECÍFICA.....	47
2.6 MÉTODOS TRADICIONAIS PARA A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE ....	49
2.7 MÉTODOS ATUAIS PARA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE .....	51

2.8 MÉTODOS DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO .....	52
2.8.1 Método AHP .....	56
2.8.2 Método Topsis .....	58
2.8.3 Análise sensibilidade .....	59
<b>3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>60</b>
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....	60
3.2 ETAPAS DA PESQUISA.....	60
3.2.1 Procedimentos da pesquisa bibliográfica .....	60
3.2.2 Caracterização da área de estudo .....	61
3.2.3 Avaliação dos sistemas produtivos de águas.....	63
3.2.4 Definição das alternativas .....	64
3.2.5 Definição dos critérios .....	64
3.2.6 Definição da importância dos critérios.....	65
3.2.7 Normalização da matriz.....	66
3.2.8 Método Topsis.....	67
3.2.9 Análise de Sensibilidade .....	68
<b>4 APLICAÇÃO DO MÉTODO .....</b>	<b>69</b>
4.1 DESENVOLVIMENTO DA MATRIZ DE AVALIAÇÃO .....	69
4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA PONDERAÇÃO DOS CRITÉRIOS .....	70
4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO TOPSIS.....	71
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>72</b>
5.1 PERDAS DE SISTEMAS PRODUTIVOS.....	72
5.2 AVALIAÇÃO DA SUPEREXPLORAÇÃO.....	73
5.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE .....	74
5.4 ANÁLISES DE TENDÊNCIA .....	75
5.5 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE .....	77
5.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	78
<b>6 CONSIDERAÇÕES.....</b>	<b>82</b>
6.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A AVALIAÇÃO DOS POÇOS .....	82
6.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	85
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>94</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as seguintes seções: (I) Contextualização; (II) Problema; (III) Objetivos; (IV) Justificativa e (V) Estrutura da dissertação.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As águas encontradas no subsolo são fontes importantes para o abastecimento humano, principalmente em locais afastados das fontes de águas superficiais, tais como os rios, córregos e lagos. Segundo Alvarado *et al.* (2016) os recursos hídricos subterrâneos constituem uma fonte segura para consumo humano e a perda da qualidade pode prejudicar sua utilização e reduzir a disponibilidade para o abastecimento.

O uso excessivo de contaminantes no solo oriundo das atividades agrícolas e a urbanização tornam essas fontes extremamente vulneráveis à degradação. Neste contexto o crescimento populacional, a urbanização e a diversificação das atividades econômicas e agrícolas contribuem para a superexploração das águas subterrâneas, e conseqüentemente, para a sua degradação quantitativa e qualitativa (NESHAT; PRADHAN, 2015); (ALLOUCHE *et al.*, 2017); (SETHY; SYED; KUMAR, 2017); (ZAHEDI; AZARNIVAND; CHITSAZ, 2017); (HAIDER; AL-SALAMAH; GHUMMAN, 2017).

O inadequado gerenciamento, associado à dependência crescente da sociedade sobre recursos hídricos subterrâneos, têm exposto à riscos cada vez maiores estes mananciais (HIRATA; SUHOGUSOFF; FERNANDES, 2007); (TOMASZKIEWICZ; ABOU NAJM; EL-FADEL, 2014); (SAHOO *et al.*, 2016).

Em muitas regiões do mundo os recursos subterrâneos representam a principal fonte de abastecimento de água. No Brasil este recurso abastece mais de 82 milhões de habitantes e em torno de 52% dos municípios brasileiros, assim retratando que os sistemas de abastecimento estão mais dependentes de fontes subterrâneas, devido à poluição dos recursos superficiais, impróprios para consumo, ou que demandam elevados investimentos para tratamento e recuperação (HIRATA; FERNANDES; BERTOLO, 2016).

Conforme o Relatório das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos de 2017, aproximadamente, dois terços da população mundial vivem em áreas com escassez de água, e a disponibilidade de recursos hídricos também está intrinsecamente ligada à qualidade da água, pois a poluição limita o seu uso. O uso da tecnologia permitiu a exploração cada vez maior de água subterrânea, mas, a retirada maior que a recarga está esgotando os aquíferos como ocorre na Índia, China, Estados Unidos, Norte da África e Oriente Médio, causando um déficit hídrico.

A questão do saneamento é um problema que afeta a qualidade da água a nível mundial. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) com dados referentes a 2015, apenas 50,3% dos brasileiros têm acesso à coleta de esgoto. Essa problemática gera impacto na qualidade das águas superficiais e subterrâneas, principalmente nas áreas urbanas (BRASIL, 2017).

A ausência ou deficiência no sistema de esgotamento sanitário em cidades com elevada densidade populacional influencia diretamente na degradação da qualidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, pois os resíduos são lançados sem tratamento nestes recursos e no solo, por meio de fossas negras ou sumidouros e vazamentos de redes de esgoto (ZOBY, 2008).

O impacto dos lançamentos de esgotos sobre a qualidade das águas subterrâneas pode ser detectado através de elevadas concentrações de nitrato e do surgimento de bactérias patogênicas e vírus (HIRATA; FERNANDES; BERTOLO, 2016).

O desenvolvimento da agricultura, com diversificação de produtos, implantação de novas técnicas de plantio e cultivo incrementaram a produtividade, mas também, criaram novas fontes de contaminações das águas superficiais e subterrâneas. Este cenário de degradação tende a aumentar à medida que a população cresce e as atividades industriais e agrícolas se expandem (GOUDARZI *et al.*, 2017); (HAIDER; AL-SALAMAH; GHUMMAN, 2017).

Portanto, o desenvolvimento econômico acelerado das últimas décadas trouxe inúmeros benefícios à sociedade, como avanços tecnológicos e científicos, mas provocou impactos ao meio ambiente (HIRATA; SUHOGUSOFF; FERNANDES, 2007); (ZAHEDI; AZARNIVAND; CHITSAZ, 2017). A produção de água potável, para suprimento das necessidades das aglomerações urbanas, encontra-se extremamente fragilizada devido à crescente demanda associada à falta de políticas de conservação e também, pela falta de cultura da preservação por parte da população que trata a

água como sendo um recurso inesgotável (DO EGITO; FONTANA; MORAIS, 2015). Com o comprometimento da disponibilidade de água nos aquíferos coloca em risco a segurança hídrica mundial (LI *et al.*, 2016).

Diante dos problemas observados, há a necessidade de planejamento e gestão de recursos hídricos, mesmo que complexa envolvendo uma série de alternativas para a conservação e uso eficiente da água, tendo como prioridade as áreas urbanas para evitar o agravamento do problema e a escassez (ALVARADO *et al.*, 2016).

Existe uma necessidade iminente de realizar estudos das águas subterrâneas e de implementar estratégias de proteção para manter a sustentabilidade da água. A escassez e a contaminação deste recurso são sérios problemas em todo o mundo (HANCOX *et al.*, 2009). Portanto avaliar a vulnerabilidade tornou-se extremamente importante para tomada de medidas para o controle da degradação.

Segundo Foster (1987) uma definição útil e consistente considera a vulnerabilidade à contaminação, como sendo as características intrínsecas dos estratos que separam o aquífero determinando sua suscetibilidade ao receber uma carga contaminante aplicada na superfície.

Outras considerações para vulnerabilidade à poluição destinam-se a ser uma ferramenta de rastreio para identificar onde medidas de proteção são prioritárias frente a uma ameaça de poluição das águas subterrâneas. Dessa forma, os métodos são aplicados na avaliação sistemática dos riscos de poluição das águas subterrâneas e nas avaliações de impacto ambiental para um determinado grupo de poluentes (FOSTER; HIRATA; ANDREO, 2013).

Conforme Foster *et al.* (2006) surgiram vários métodos intrínsecos e específicos para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas que se adaptaram as determinadas áreas ou características aquíferas. Entretanto não se tem certeza qual o método mais eficaz, pois depende de vários fatores para essa definição, onde se considera que:

- A água subterrânea é vulnerável à contaminação
- A incerteza é inerente a qualquer avaliação de vulnerabilidade à contaminação
- Os sistemas mais complexos de avaliação apresentam o risco de confundir o que é evidente e tornar imprecisas as habilidades.

As delimitações de zonas potenciais para conservação de águas subterrâneas estão se tornando um fator importante na implementação de programas de proteção

e gerenciamento (SAHOO *et al.*, 2016). A restauração das águas subterrâneas degradadas e de aquíferos constituem grandes desafios ambientais.

Portanto para avaliar a vulnerabilidade dos recursos hídricos, a seleção de um método adequado baseia-se na disponibilidade de dados quantitativos e qualitativos das características hidrográficas, considerando-se os parâmetros mais relevantes (AYED *et al.*, 2017).

Uma maneira de identificar os parâmetros relevantes é o desenvolvimento de índices de qualidade por meio de métodos multicritério, que possibilitem a ordenação das fontes de águas subterrâneas que estão mais vulneráveis à contaminação por atividades antropogênicas.

Neste contexto, a realização de estudos científicos e desenvolvimento de estratégias para proteção das águas subterrâneas é uma necessidade. E, identificar os riscos que afetam a qualidade e a disponibilidade desse recurso é uma ação essencial para o desenvolvimento de políticas e leis que possam proteger essas áreas sensíveis à contaminação (KAVURMACI, 2016); (HAIDER; AL-SALAMAH; GHUMMAN, 2017).

Este estudo se mostra relevante no sentido de avaliar se as fontes subterrâneas estão sendo impactadas pelas atividades antropogênicas. Isso envolve vários fatores que podem comprometer a qualidade das águas subterrâneas, e os resultados de estudos científicos podem conduzir a uma gestão sustentável auxiliando na efetivação de políticas de controle e preservação.

## 1.2 PROBLEMA

Fatores como urbanização acelerada, ineficiência na coleta e tratamento de esgotos sanitários e superexploração de recursos hídricos estão influenciando a qualidade das águas subterrâneas. Neste contexto, o mapeamento e a avaliação de áreas vulneráveis é uma análise essencial para o planejamento e a tomada de decisão para a preservação. A utilização de métodos apropriados geram informações precisas e eficientes para a tomada de decisão em sistemas de monitoramento de água, através das amostras dos mananciais (ALLOUCHE *et al.*, 2017).

Os métodos conhecidos para avaliar as águas subterrâneas são comumente classificados em três categorias: método de sobreposição e índice (que são métodos baseados em processos determinísticos), métodos baseados em processos físicos; e métodos estatísticos (FOCAZIO, 2002); (NOBRE *et al.*, 2007).

A seleção do método correto a ser aplicado em um problema depende das características, das preferências dos decisores e do tipo de resultados que deseja alcançar. A aplicação de métodos mais comumente utilizado pode gerar resultados discordantes ou contraditórios. Portanto escolha do método não deve ser realizada por sua popularidade ou facilidade de aplicação, mas pela eficiência e coerência com o problema (MOREIRA, 2007).

Inúmeras técnicas de avaliação com finalidades distintas são frequentemente utilizadas para resolução de problemas, mas fica evidente a dificuldade de avaliar a vulnerabilidade de sistemas em vários aspectos concomitantemente. Normalmente são levados em consideração apenas alguns aspectos mais evidentes do problema de avaliação, diante disso, os métodos de análise multicritério podem contribuir para promover melhoria nesse contexto (REZAEI; SAFAVI; AHMADI, 2013); (VALLE JUNIOR *et al.*, 2015).

As questões relacionadas à priorização de alternativas ou à tomada de decisão em empresas de serviços de saneamento estão sempre ligadas a conflitos de preferência entre os gestores que têm interesses conflitantes, porém devem convergir para atender aos objetivos majoritários da empresa (TROJAN; MORAIS, 2012).

Diante dessas considerações, define-se a seguinte problemática, a ser elucidada a partir do questionamento. Como avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas ordenando as áreas mais suscetíveis à contaminação, considerando os vários critérios envolvidos nesse processo, a fim de direcionar ações para controle e preservação desses recursos?

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo de avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas, para priorização das áreas que necessitam

de medidas de proteção, explorando um estudo multicritério que apresente uma ordenação de áreas vulneráveis à contaminação, com isso contribuir para apoiar o processo de tomada de decisão para ações de preservação da qualidade dessas fontes naturais.

### 1.3.2 Objetivo Específico

Para alcançar o objetivo geral são definidos alguns objetivos específicos:

- I. Identificar estudos que utilizaram métodos multicritério em avaliações de sistemas vulneráveis;
- II. Estabelecer as alternativas e os critérios relevantes na problemática
- III. Estruturar o modelo multicritério para avaliação da vulnerabilidade de águas subterrâneas;
- IV. Realizar a análise de sensibilidade para avaliar o modelo.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

Água subterrânea é um recurso natural importante para vários setores da organização de um país, tais como a economia, a sociedade e o meio ambiente. Para as atividades relacionadas com a agricultura e indústria a demanda por água vem aumentando anualmente. Ainda existem demandas relacionadas ao abastecimento de cidades.

Esse cenário associado ao crescimento de empreendimentos econômicos instalados desordenadamente gerado aumento de contaminantes, lançados nos aquíferos oriundos de fossas negras, depósitos de lixo urbanos e resíduos industriais, entre outros. Com a expansão agrícola e aumento da produção, novas composições químicas são utilizadas tanto nos fertilizantes quanto nos produtos de controle de pragas, e assim criam novas fontes de contaminação da água superficial e subterrânea (HIRATA; FERNANDES; BERTOLO, 2016).

Segundo Pizzol *et al.* (2015) mais de 97% de toda água doce disponível é representada pela água subterrânea, e a gestão da água é um dos desafios que a

maioria das cidades enfrentam e a falta de abordagens eficazes na gestão de recursos hídricos trazem efeitos adversos, como o declínio dos níveis de água nos aquíferos, intrusão salina, degradação da terra, poluição da água e outros problemas ambientais, sociais e econômicos.

A Organização das Nações Unidas prevê que em 2030 a população global vai necessitar 40% a mais de água e o uso insustentável deste recurso poderá gerar um problema a nível mundial. Neste sentido, é importante o desenvolvimento de metodologias que auxiliam na identificação de áreas vulneráveis para auxiliar na tomada de decisão quanto as formas de gerenciar e proteger as fontes de água.

Uma maneira para melhor orientar as medidas de proteção é realizar um mapeamento da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação, que está relacionada às características intrínsecas e específicas do aquífero, servindo como subsídio para a gestão do uso e ocupação do solo, visando o planejamento e monitoramento das regiões mais vulneráveis (OKE; FOURIE, 2017).

Desta forma, este estudo procura apresentar uma contribuição ao setor de abastecimento de água que necessita de fontes de água confiáveis para atender a demanda da população. A metodologia utilizada procura identificar e ordenar as fontes de água subterrâneas mais vulneráveis, para assim direcionar medidas de preservação e controle de descargas de poluentes principalmente em áreas mais susceptíveis como as áreas de recargas.

Essas medidas de proteção são necessárias para poços e nascentes e são orientadas através do mapeamento das áreas e geração de informações sobre os locais a serem investigados, em que há risco de contaminação.

## 1.5 ESTRUTURAS DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em: Introdução, Referencial teórico, Procedimentos metodológicos, Aplicação do método e Considerações.

O Capítulo 1 é composto pela introdução contendo: contextualização, problema, objetivos, justificativa e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico onde aborda sobre o tema e demais informações importantes referentes ao estudo.

O Capítulo 3 apresenta os procedimentos metodológicos abrangendo: classificação da pesquisa, etapas da pesquisa, procedimentos da pesquisa bibliográfica, caracterização da área, escolha do método, definição das alternativas, definição dos critérios, importância dos critérios, normalização da matriz, Método TOPSIS e análise de sensibilidade.

No Capítulo 4 consiste na aplicação do modelo, desenvolvimento da matriz de avaliação, aplicação do método AHP para ponderação dos critérios, aplicação do método TOPSIS.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados dos procedimentos realizados: perdas de sistemas produtivos, avaliação da superexploração, avaliação da qualidade, análises de tendência, avaliação da vulnerabilidade e análises de sensibilidade.

No Capítulo 6 apresenta as considerações do estudo, sugestões para trabalhos futuros, referências e apêndices.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada informações sobre a problemática que envolve as águas subterrâneas, que abrange o tipo de aquífero, as principais fontes de contaminação, bem como o padrão de potabilidade que deve ser mantido e demais informações.

### 2.1 CARACTERÍSTICAS DOS AQUÍFEROS

Aquífero é uma formação geológica do subsolo, constituída por rochas permeáveis, que armazenam água em seus poros ou fraturas. Uma litologia é aquífera se possui os poros saturados de água e permite a transmissão dessa água armazenada. Salienta-se que o aquífero constitui uma reserva permanente e uma reserva reguladora de água, é abastecido através da infiltração da água da chuva e de outras fontes subterrâneas (BORGHETTI; BORGHETTI; FILHO, 2004).

Ainda conforme o autor, as reservas reguladoras correspondem ao escoamento de base dos rios, e as áreas por onde ocorre o abastecimento do aquífero que é chamada zona de recarga, que pode ser direta ou indireta. O escoamento de parte da água do aquífero ocorre na zona de descarga. Para explorar e garantir o uso sustentável de um aquífero, é necessário o conhecimento sobre a recarga anual no qual o mesmo é submetido

#### 2.1.1. Formação dos Aquíferos e os principais aquíferos brasileiros

A litologia do aquífero pode ser porosa, fissural ou cárstica, determinando a velocidade da água, a qualidade e a sua reservação.

- Aquífero poroso: é um tipo de aquífero mais relevante por abranger grandes áreas e ter uma capacidade maior de armazenamento de água. Esses aquíferos se formam a partir da sedimentação e sua principal característica é a grande porosidade, permitindo o escoamento da água em qualquer direção. Um exemplo de aquífero poroso é o Aquífero Alter do Chão localizado na região norte do Brasil (BORGHETTI; BORGHETTI; FILHO, 2004).

- Aquífero cárstico: é associado a rochas calcáreas ou carbonáticas, apresenta uma grande sensibilidade ao desgaste pela ação da água, as fraturas nessas rochas alargam-se pelo fluxo de água, formando rios subterrâneos (ABAS, 2018).
- Aquífero fraturado ou fissurado: formado por rochas ígneas ou metamórficas, a capacidade de armazenamento está relacionada à quantidade de fraturas (FILHO *et al.*, 2011).

Quanto ao armazenamento da água os aquíferos podem ser livres ou confinados:

- Aquífero livre ou freático: o nível da água varia conforme a quantidade de chuva é o tipo de aquífero mais comum e mais explorado, sendo mais susceptíveis a problemas de contaminação.
- Aquífero confinado ou artesianos: ocorre quando a água subterrânea está confinada sob uma pressão superior do que a pressão atmosférica, devido à existência de uma camada confinante impermeável sobre o aquífero (BORGHETTI; BORGHETTI; FILHO, 2004).

O Brasil conta com dois dos maiores aquíferos do mundo o SAGA (Sistema Aquífero Grande Amazônia) e o SAG (Sistema Aquífero Guarani). O SAGA é constituído pelas formações dos aquíferos Solimões, Içá e Alter do Chão. Com uma extensão três vezes maior que o aquífero Guarani, é uma conexão hidrogeológica, com grande potencialidade hídrica, que abrange a Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, Peru e Venezuela. E o Aquífero Guarani, que abrange oito estados brasileiros (Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul), além disso, abrangendo regiões da Argentina, Uruguai e do Paraguai.

Outros aquíferos também merecem destaque, como: Serra Geral (abrange a região centro-sul do Brasil e estendendo-se ao longo das fronteiras do Paraguai, Uruguai e Argentina), Cabeças (Bacia do Parnaíba), Urucuia Areado (Bahia, Minas Gerais, Goiás, Piauí e Maranhão) e Furnas (Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Paraná e São Paulo)

Os aquíferos independente da profundidade, podem sofrer interferências advindas das diferentes formas de uso e ocupação do solo, e isso pode alterar a quantidade e a qualidade da água armazenada. Algumas interferências podem ocorrer de maneira direta (poços, drenos, túneis, minerações, contaminações diretas, entre

outros), e de maneira indireta, quando a intervenção afeta o aquífero por vias indiretas (impermeabilização do terreno, desmatamentos, lançamentos de contaminantes na superfície, barramento de rios e criação de reservatórios, entre outros) (FILHO *et al.*, 2011).

### 2.1.2 Sistema Aquífero Serra Geral

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) é do tipo fissural ou fraturado, composto por derrames basálticos da formação Serra Geral está sobreposto ao Sistema Aquífero Guarani (SAG), na Bacia do Paraná, sua formação é constituída por basaltos toleíticos a andesitos basálticos, correspondendo a 75% da extensão da bacia. Existindo conectividade e compartimentação dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani no Sudoeste do estado do Paraná (MOCELLIN; FERREIRA, 2009).

O SASG se comporta como um aquífero livre, e sendo um aquífero fraturado, o fluxo da água está associado às estruturas tectônicas e atectônicas da formação Serra Geral. Sobre o aquífero, há um manto de alteração que possui espessuras diferentes, mas de grande importância para a recarga desse sistema. Em função dos tipos de solos, suas propriedades físicas, bem como das condições de relevo e cobertura vegetal, há regiões onde a recarga vai ocorrer com maior ou menor intensidade (BORGES *et al.*, 2017).

A recarga ocorre através da chuva, principalmente em áreas com manto de alteração, topografia pouco acidentada e considerável cobertura vegetal. A água subterrânea do SASG está condicionada a fatores genéticos do pacote basáltico e à presença fraturas que condicionam a circulação das águas nestas rochas, aumentando a capacidade de armazenamento de água (SILVA, 2007).

As entradas de água foram identificadas em profundidades de até 170 metros. As vazões médias dos poços do SASG, oscilam entre 5 e 35 m<sup>3</sup>/h, sendo que existem poços cuja produção atinge valores superiores a 100 m<sup>3</sup>/h. Como a maior parte da água subterrânea se origina da chuva que se infiltra diretamente ou indiretamente na superfície do solo, como consequência, as atividades que se desenvolvem na superfície podem ameaçar a qualidade da água subterrânea. O SASG é caracterizado heterogêneo e anisotrópico, assim o volume de água a ser extraído é diferente em cada área, sendo a capacidade de produção regulada pela recarga natural, onde deve

estar subordinada ao regime diário de bombeamento, para uma exploração sustentável do recurso hídrico subterrâneo (ROSA FILHO, *et al.*, 2006).

Ainda segundo o autor, é um dos aquíferos mais importantes do estado, suas águas propiciam o abastecimento de muitos habitantes, em muitos casos, como fonte exclusiva de abastecimento. As águas são de boa qualidade, podendo ser utilizada para diversos usos sem tratamento. Mas, apresentam alguns problemas relacionados às causas naturais (altos teores de ferro, manganês e fluoretos) ou antropogênicas (contaminação química e bacteriológica). Em estudos realizados verificou-se que a tipologia das águas armazenadas nas rochas basálticas como ocorre no SASG, é preferencialmente bicarbonatada cálcica, com baixos teores de sólidos totais dissolvidos.

### 2.1.3 Poços de captação

Os poços tubulares são obras de engenharia que permitem acesso a reservatórios de água subterrânea nos diversos aquíferos, sua perfuração é executada com sonda perfuratriz verticalmente com diâmetro variável, onde a profundidade pode variar conforme a região e do tipo de poço.

Os poços podem ser dos seguintes tipos:

- Poço raso: capta água superficial do lençol freático, estão mais sujeitos à contaminação e a quantidade de água pode variar
- Poço Semiartesiano: precisa de uma bomba para que a água seja retirada
- Poço artesiano ou tubular: quando perfurado jorra água espontaneamente. O que define se o poço é artesiano ou semiartesiano é se a água jorra espontaneamente, não tendo relação com sua profundidade.

A construção, operação e manutenção dos poços, apresentam algumas vantagens econômicas em relação as águas superficiais (REBOUÇAS; BRAGA; TUNDISI, 2006).

Quanto ao espaço físico são estações compactas e automáticas de tratamento de água, que representam baixos custos para implantação e operação. Os custos relacionados com a exploração de água subterrânea se tornam elevados em situações em que a água se localiza em grandes profundidades, onde está associada com quedas de vazões, e neste caso se torna desvantajoso (BERTOLO *et al.*, 2015).

Segundo o mesmo autor, quanto à qualidade geralmente são águas que necessitando de pouca adição de produtos químicos para tratamento, tornando-se uma boa fonte de abastecimento e com a vantagem que não geram resíduos sólidos como as estações de tratamento de água convencionais com águas superficiais

Outra grande vantagem do uso da água subterrânea no abastecimento público é a sua grande resiliência em longos períodos de seca. Os aquíferos se caracterizam por armazenar grandes quantidades de água, o que permite manter extrações elevadas sem a necessidade de recarga (CONICELLI; HIRATA, 2016).

Mas poços de captação mal construídos podem ser focos de contaminação dos aquíferos com entrada de água contaminada que os reabastecem. As construções de poços tubulares sem controle sem obediência às normas técnicas e legislação podem provocar contaminação dos aquíferos, superexploração ou consequências mais específicas como a intrusão salina em caso de áreas litorâneas, a subsidência de solos em terrenos mais instáveis (BOHN; GOETTEN, 2015).

No Brasil o aumento da captação de águas subterrâneas levou a perfuração de poços sem critérios técnicos adequados, colocando em risco a qualidade das águas subterrâneas. Os principais fatores que representam risco de contaminação das águas subterrâneas são: o não isolamento das camadas durante a perfuração; ausência de laje de proteção sanitária e altura inadequada da boca do poço; proximidade com fossas, postos de gasolina e lixões; não desinfecção do poço após a construção; não cimentação do poço (ZOBY, 2008).

Os recursos hídricos constituem-se de bens públicos onde qualquer pessoa tem direito ao acesso e utilização, cabendo ao poder público a sua administração e controle. Portanto a exploração da água subterrânea deve ser solicitada formalmente ao órgão fiscalizado. No entanto, mais de 70% dos poços tubulares não possuem autorização para funcionar, assim essa ilegalidade, faz com que o controle sobre a construção dos poços e o monitoramento regular das captações fique comprometido (BERTOLO *et al.*, 2015).

A carência de informação básica relativa aos poços perfurados e de monitoramento traduz-se na escassez de dados confiáveis sobre a potencialidade hídrica dos aquíferos e a exploração. Portanto, há a falta de levantamentos básicos de hidrogeologia que auxiliam na tomada de decisões para o planejamento e gerenciamento efetivo dos recursos hídricos (HIRATA; ZOBY; OLIVEIRA, 2010).

O usuário tem que ter acesso à informação adequada, para que tenha consciência e possa utilizar este recurso adequadamente. Para isso, são necessárias informações compreensíveis e confiáveis, permitindo assim, a conscientização. Propor um sistema, baseado em recompensas, poderia ser uma alternativa para atrair o usuário, e conscientizá-lo que a legalidade do seu poço é uma segurança de seu investimento e uma garantia de quantidade de água por parte do estado (LOPEZ-GUNN; CORTINA, 2006).

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Conforme Resolução do Conama Nº 396/2008 no Art. 3º As águas subterrâneas são classificadas em:

- Classe Especial: águas dos aquíferos ou conjunto de aquíferos destinadas à preservação de ecossistemas em unidades de conservação de proteção integral bem como as que compõe as águas superficiais
- Classe 1: águas dos aquíferos ou conjunto de aquíferos, sem alteração de sua qualidade por atividades antropogênicas, e com adequadas características hidrogeoquímicas naturais;
- Classe 2: águas dos aquíferos ou conjunto de aquíferos, sem alteração de sua qualidade por atividades antropogênicas, que necessitam de tratamento devido às suas características hidrogeoquímicas naturais;
- Classe 3: águas dos aquíferos ou conjunto de aquíferos com alteração na qualidade por atividades antropogênicas, não sendo necessário o tratamento para essas alterações, mas podem exigir tratamento adequado para às suas características hidrogeoquímicas naturais;
- Classe 4: águas dos aquíferos ou conjunto de aquíferos com alteração na qualidade por atividades antropogênicas, podendo ser utilizadas sem tratamento para usos menos restritivo;
- Classe 5: águas dos aquíferos ou conjunto de aquíferos com alteração na qualidade por atividades antropogênicas, podem ser utilizadas para usos que não possuem requisitos de qualidade.

No Art. 5º relata que as condições de qualidade devem ser mantidas. Para avaliação da qualidade no Art.12º define que devem ser considerados no mínimo os parâmetros sólidos totais dissolvidos, nitrato e coliformes termotolerantes. No Art. 13º relata que para monitoramento da qualidade da água os órgãos responsáveis devem avaliar sólidos totais dissolvidos, nitrato, coliformes termotolerantes, pH, turbidez, condutividade elétrica e medição de nível de água.

## 2.3 ASPECTO E DEGRADAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

### 2.3.1 Usos e importância das águas Subterrâneas

A água subterrânea é um componente do ciclo hidrológico que assegura o fluxo de água nos rios em época de estiagem, desempenhando a função de diluição de esgoto e de efluentes, transporte de sedimentos e manutenção dos ecossistemas. As águas subterrâneas apresentam boa qualidade e melhores condições de proteção a possíveis efeitos das atividades antropogênicas ou uso e ocupação do solo, que possam alterar a qualidade e a quantidade da água (GORAI; KUMAR, 2013); (HIRATA; FERNANDES; BERTOLO, 2016).

Dessa forma, os mananciais subterrâneos têm assumido cada vez mais o papel de fonte estratégica de recurso hídrico, para as gerações atuais e para as futuras gerações, principalmente nos cenários que se apresentam com crescimento demográfico, aglomerações urbanas, pressões ambientais e mudanças climáticas, garantindo o fluxo permanente nos cursos d'água superficiais nos períodos de estiagem (FILHO *et al.*, 2011).

Conforme a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), água é considerada um bem de domínio público e um recurso natural finito e com valor econômico. Podendo ser explorada a partir da solicitação da outorga ao poder público. Entretanto a legislação estabelece que não necessitam desta autorização os casos de uso de recursos hídricos para a satisfação das necessidades individuais, de pequenos núcleos populacionais para atender às necessidades em área rural ou urbana e, para os usos insignificantes com vazões de até 0,4 l/s (BRASIL, 1997).

A PNRH prevê que a gestão dos recursos hídricos deve proporcionar os usos múltiplos das águas, de forma descentralizada e participativa, contando com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades, determinando que, em situações de escassez o uso prioritário da água é para o consumo humano e a dessedentação de animais.

O objetivo da PNRH é definir diretrizes e políticas públicas voltadas para a melhoria da oferta de água, em quantidade e qualidade, gerenciando as demandas e considerando ser a água um elemento estruturante para a implementação das políticas setoriais, por meio do desenvolvimento sustentável e da inclusão social.

A exploração de água subterrânea está condicionada a fatores quantitativos, qualitativos e econômicos, sendo que explicita os objetivos da PNRH:

- Assegurar a disponibilidade de água em qualidade e quantidade
- Prevenção e defesa contra eventos hidrológicos
- Promover uma utilização racional e integrada dos recursos hídricos

Apesar da abundância, os recursos hídricos brasileiros são fontes esgotáveis, o acesso à água não é igual para todos. As características geográficas de cada região e as mudanças climáticas afetam a distribuição das águas superficiais, buscando-se as águas subterrâneas para suprir a demanda (ARAUJO, 2017).

As águas subterrâneas têm um papel estratégico em tempos de mudança climática, devido às suas características, os aquíferos podem fornecer água durante longos períodos de estiagem (HIRATA; CONICELLI, 2012). A demanda por água de qualidade acompanha o crescimento populacional e o desenvolvimento, entretanto a vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas e a dificuldade de remediação dos aquíferos enfatizam a importância da proteção desses recursos para manter sua qualidade para um futuro de incerteza climática (HAIDER; AL-SALAMAH; GHUMMAN, 2017); (LAPWORTH *et al.*, 2017).

Segundo Hirata; Conicelli (2012) a mitigação possível desses problemas baseia-se nos seguintes fatores:

- Conhecer as características dos aquíferos
- Conscientização da população
- Gestão eficaz desses recursos

À medida que as quantidades confiáveis de águas superficiais se tornam limitadas e sua qualidade degrada-se, a dependência das águas subterrâneas dos

sistemas aquíferos aumenta, assim as águas subterrâneas estão ameaçadas de contaminação (HANCOX *et al.*, 2009).

As ações antropogênicas podem alterar o balanço hídrico local e regional através do desmatamento, uso do solo, irrigação e construção de barragens e na escala global as mudanças climáticas afetam a disponibilidade hídrica (REBOUÇAS; BRAGA; TUNDISI, 2006).

Portanto conhecer os corpos rochosos, sua distribuição espacial, suas estruturas e porosidades, bem como caracterizar os aquíferos, sua natureza, suas propriedades hidráulicas, a dinâmica, a qualidade, as profundidades, as vulnerabilidades, entre outros aspectos técnicos para auxiliar no apoio da gestão, são informações necessárias para conhecer e utilizar de forma sustentável as águas subterrâneas (FILHO *et al.*, 2011).

A falta de abordagens eficazes na gestão dos recursos hídricos traz efeitos adversos como o declínio dos níveis dos aquíferos, intrusão salina, degradação da terra e da água e outros problemas ambientais, sociais e econômicos. O planejamento sistemático do desenvolvimento das águas subterrâneas usando técnicas modernas é essencial para a adequada utilização e gestão deste recurso (KUMAR; GAUTAM; KUMAR, 2014).

### 2.3.2 Impactos das águas subterrâneas

A qualidade da água esta relacionada as características da água para determindo uso, baseado em características físicas, químicas e biológicas. Compreender os processos e fatores que controlam a qualidade da água é importante para a proteção dos ecossistemas (GORAI; KUMAR, 2013). O monitoramento dos parâmetros que afetam qualidade da água no meio ambiente é muito importante para o planejamento e gestão dos recursos hídricos (KUMAR; GAUTAM; KUMAR, 2014).

A água subterrânea é naturalmente de boa qualidade para consumo humano, no entanto, as águas subterrâneas são recursos vulneráveis, dependendo das condições, podem ser contaminadas por qualquer uso da terra, quando a qualidade é afetada consequências devastadoras podem ocorrer (LAVOIE *et al.*, 2015).

De acordo com Foster *et al.* (2006) a poluição dos aquíferos ocorre nos pontos em que a carga contaminante gerada pelas atividades antropogênicas excede a capacidade de atenuação natural dos solos e das camadas de cobertura. Os perfis

naturais de subsolo atenuam ativamente muitos poluentes da água, sendo considerados eficazes para o despejo seguro de resíduos. A autoeliminação dos contaminantes durante o transporte subsuperficial na zona não saturada é resultado da degradação bioquímica e de reações químicas.

Nem todos os perfis de subsolo e camadas subjacentes são igualmente eficazes na atenuação dos contaminantes. Assim, os aquíferos se tornam vulneráveis à poluição, onde as rochas são altamente fissuradas, o fluxo de água é mais rápido e o grau de atenuação varia de acordo com os tipos de contaminantes e o ambiente hidrogeoquímico (ZEIDAN, 2017).

O movimento de contaminantes através do subsolo é complexo e difícil de prever, onde os diferentes tipos de contaminantes reagem de forma diferente com os solos, sedimentos e outros materiais geológicos e, se deslocam por diferentes caminhos e velocidades diferentes (HIRATA *et al.*, 2015).

A degradação das águas subterrâneas ocorre quando existe uma exploração excessiva, isso não só reduz os recursos hídricos disponíveis, mas afeta o rendimento, podendo resultar em outros efeitos sérios e potencialmente caros, incluindo a intrusão salina em áreas litorâneas (ZEIDAN, 2017).

A superexploração das águas subterrâneas para atender as crescentes demandas domésticas, agrícolas e industriais resultou na degradação da qualidade, por meio natural e antropogênico, assim ameaçando os ecossistemas e conseqüentemente as vidas de nossas futuras gerações (LAVOIE *et al.*, 2015); (CONICELLI; HIRATA, 2016).

Os aquíferos freáticos, especialmente nas áreas em que a zona vadosa é pouco espessa e o lençol freático é raso são mais vulneráveis a contaminação. Os aquíferos semiconfinados que possuem camadas pouco espessas e permeáveis são também considerados vulneráveis, pois a atividade antropogênica na superfície modifica os mecanismos de recarga dos aquíferos alterando a taxa, a frequência e a qualidade da recarga do aquífero (ZEIDAN, 2017).

À medida que a mineração se desenvolveu, grandes quantidades de águas subterrâneas foram extraídas para uso e o aumento da população demandou maiores quantidades de água para suprir as necessidades. Assim, quando a água subterrânea é extraída a uma taxa maior que sua recarga natural, os aquíferos tornam-se esgotados e podem tornar-se inutilizáveis. Outro fator é a ocupação inadequada das

áreas de recarga que provoca a degradação da qualidade e altera a disponibilidade hídrica dos aquíferos (ZEIDAN, 2017).

Diversos são os fatores que podem comprometer a qualidade da água subterrânea, como disposição inadequada do esgoto doméstico e industrial, os resíduos sólidos urbanos e industriais, os postos de combustíveis, a mineração, a modernização da agricultura entre outros, devido à disposição de substâncias químicas e outras fontes de contaminação como bactérias, vírus, parasitas, substâncias orgânicas e inorgânicas (SILVA, 2007).

Segundo Borghetti; Borghetti; Rosa Filho (2004) o avanço tecnológico possibilitou a extração de maior quantidade de água do que a recarga nos aquíferos. Assim, em várias regiões do mundo, muitos dos principais aquíferos estão sendo comprometidos com a extração maior que a taxa natural de recarga causando a superexploração e provocando ainda:

- Indução de água contaminada causada pelo deslocamento da pluma de poluição para o aquífero
- Subsidência de solos causado pela perda de suporte subjacente
- Intrusão salina nas áreas litorâneas ou costeiras

Ainda, de acordo Borghetti; Borghetti; Filho (2004) a exploração de água subterrânea está relacionada a fatores quantitativos, qualitativos e econômicos:

- Quanto à quantidade está ligada à condutividade hidráulica e ao coeficiente de armazenamento, onde os aquíferos têm diferentes taxas de recarga, sendo que a recuperação pode ser lentamente ou em outros a recuperação é mais regular.
- Quanto à qualidade é influenciada pela composição das rochas e condições climáticas e pela recarga de água contaminada. A extração intensa e contínua de água, pode resultar em gradientes verticais mais fortemente descendentes, aumentando o risco de contaminantes de fontes superficiais que atingem as águas subterrâneas.
- Fator econômico este depende da profundidade do aquífero e das condições de bombeamento, pois quanto mais profundo for o poço maior é o custo o para bombeamento da água.

A extração pode ser realizada continuamente com estudos prévios do volume armazenado no subsolo e das condições climáticas e geológicas de reposição, pois

se isso não for observado, poderá ocorrer a superexploração provocando danos ao meio ambiente e ao recurso.

Existem diversos exemplos no mundo de esgotamento de aquíferos por superexploração, causando o afundamento dos solos situados sobre os aquíferos na cidade do México, Estados Unidos e em outros países. No Brasil, existem numerosas ocorrências, especialmente em Minas Gerais, Bahia, Goiás, Piauí, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e São Paulo como, por exemplo, em Cajamar (SP).

Outro problema é a redução da recarga dos aquíferos aliada às altas taxas de impermeabilização dos solos e redução do nível d'água subterrâneo como consequência da superexploração destes recursos, ainda podem-se citar os efeitos indiretos no clima e no ciclo hidrológico, gerados pelas alterações na vegetação, na geomorfologia, fauna e hidrografia, poluição do ar, entre outros (TUCCI *et al.*, 2001).

Quando há superexploração não há sustentabilidade. Portanto, deve-se explorar com sustentabilidade, sendo que os impactos do bombeamento devem ser aceitáveis, e com monitoramento constante desse aquífero.

### 2.3.3 Parâmetros de qualidade da água

No Brasil, as legislações vigentes que tratam de potabilidade da água para consumo humano e de águas subterrâneas são, respectivamente, a Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017) e a Resolução nº 396/2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (BRASIL, 2008).

Na Europa a Diretiva (2000/60/CEE) representa o principal instrumento da Política da União Europeia relativa à água, estabelecendo um quadro de ação comunitária para a proteção das águas de superfície, de transição, costeiras e subterrâneas, e tem como objetivo de estabelecer uma gestão integrada da qualidade da água de bacias hidrográficas para todas as águas europeias com a proposta de atingir o status de boa qualidade. A avaliação da qualidade das águas depende de parâmetros biológicos, hidromorfológicos, físico-químicos e alguns poluentes específicos.

As Diretrizes para a Qualidade da Água Potável no Canadá são estabelecidas pelo Comitê Federal Provincial Territorial sobre água potável. O *Guidelines for Canadian Drinking Water Quality* substitui as versões anteriores, onde cada diretriz foi estabelecida com base em pesquisas científicas atuais publicadas relacionadas a

efeitos sobre a saúde, efeitos estéticos e considerações operacionais, e estas baseadas nos efeitos de saúde associados a cada contaminante, nos níveis de exposição e na disponibilidade de tratamento e tecnologias analíticas.

Nos Estados Unidos, a Lei Federal de Controle da Poluição da Água conhecida como Lei de Águas Limpas ou *Clean Water Act* (CWA) tem o objetivo de restaurar e manter a integridade física, química e biológica das águas americanas, combatendo a poluição de fontes pontuais e não pontuais e controlando os lançamentos de efluentes nos corpos receptores (EPA, 2008).

Como autoridade internacional em saúde pública e qualidade da água, a Organização Mundial da Saúde (OMS) lidera os esforços globais para prevenir a transmissão de doenças transmitidas pela água, sendo realizado através da promoção de regulamentações baseadas na saúde para governos e trabalhando com parceiros para promover práticas eficazes de gestão de risco para fornecedores de água, comunidades e famílias.

O *Guidelines for Drinking Water Quality* - GDWQ apresenta que o saneamento, tratamento e reutilização seguros das águas residuais são fundamentais para proteger a saúde pública. As evidências resultantes do monitoramento das entradas e saídas fornecidas pela análise e avaliação global da água e do saneamento da ONU-Água e programa conjunto de monitoramento da OMS/UNICEF, ajudam a orientar os tomadores de decisão a nível local, nacional e global.

A segurança e a qualidade da água são fundamentais para o desenvolvimento humano e o bem-estar. Fornecer acesso a água potável é um dos instrumentos mais eficazes para promover a saúde e reduzir a pobreza.

O sistema de abastecimento de água para fins de consumo humano é constituído de instalações e equipamentos que fornecem água potável para a população. Os indicadores físicos, químicos e biológicos da água devem estar de acordo com o que estabelece o dispositivo legal em vigor no Brasil, a Portaria de consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde (MS).

Esta portaria define o padrão de potabilidade como sendo o conjunto de valores permitidos como parâmetro de qualidade da água destinada ao consumo humano e estão relacionadas às características físicas, organolépticas e químicas, seus valores máximos permitidos (VMP) e as características microbiológicas e radioativas, entre outras informações pertinentes aos sistemas de abastecimento para várias finalidades.

A água contém diversos componentes os quais provêm do próprio ambiente natural ou foram introduzidos a partir de atividades antropogênicas. Para caracterização da água são determinados diversos parâmetros como as suas características físicas, químicas e biológicas, e estes são indicadores da qualidade da água (SPERLING, 1996). A seguir a descrição de alguns parâmetros:

#### 2.3.4 Parâmetros Físico-químicos

- Temperatura é a intensidade de calor que influencia as propriedades da água (densidade, viscosidade, oxigênio dissolvido) a alteração influencia na taxa das reações físicas, químicas e biológicas. Podendo variar em função de fontes naturais (energia solar) e fontes antropogênicas (despejos industriais).
- Sabor e odor resultam de processos naturais (algas e bactérias) e artificiais (esgotos domésticos e industriais).
- Cor resulta substâncias em solução como ferro ou manganês, decomposição da matéria orgânica da água com ácidos húmicos, algas ou pela introdução de esgotos industriais e domésticos.
- Turbidez é caracterizada pela presença de partículas em suspensão, para o abastecimento tem importância pelo aspecto estético, a origem natural (partículas de rocha, argila, silte, algas e microrganismos) e a origem antropogênica (lançamentos de resíduos).
- Sólidos totais dissolvidos avalia a qualidade da água por meio das substâncias envolvidas como: carbonato, bicarbonato, cloreto, sulfato, fosfato, nitrato, cálcio, magnésio, sódio e outros íons, que em elevadas concentrações podem ser prejudiciais. Nas águas naturais os sólidos dissolvidos são constituídos principalmente por carbonatos, bicarbonatos, cloretos, sulfatos, fosfatos, nitratos de cálcio, magnésio e potássio (GASPAROTTO, 2011). Contudo, quando presentes em elevadas concentrações, podem ser prejudiciais, oferecendo risco e tornando a água desagradável ao paladar, corroendo as tubulações e problemas de saúde (SANTOS, 2014).
- Condutividade elétrica é a capacidade de conduzir corrente elétrica, está relacionado com a presença de íons dissolvidos na água.

- Potencial Hidrogeniônico (pH) representa o equilíbrio entre íons  $H^+$  e íons  $OH^-$  para água o  $pH=7$  é caracterizada como neutra,  $pH$  maior que 7,0 é alcalina e o  $pH$  menor que 7,0 é ácida.
- Alcalinidade é causada por sais alcalinos (sódio e cálcio), mede a capacidade da água de neutralizar os ácidos e em teores elevados, pode proporcionar sabor desagradável à água.
- Dureza indica a presença de sais alcalinos terrosos (cálcio e magnésio) em teores elevados causa sabor desagradável e reduz a formação da espuma do sabão e provoca incrustações nas tubulações e caldeiras.
- Cloretos provêm da dissolução de minerais ou da intrusão salina, podendo ser fonte de esgotos domésticos ou industriais, em altas concentrações propiciam sabor salgado à água.
- Ferro e manganês dissolução de compostos do solo e de despejos industriais causando coloração avermelhada (ferro) e marrom (manganês) à água. Conferindo sabor metálico, favorecem o desenvolvimento de ferro-bactérias causando maus odores, coloração e obstruem as canalizações.
- Nitrogênio se apresenta como a amônia, nitrito, nitrato em excesso, causa o crescimento desordenado de algas (eutrofização). São fontes de compostos nitrogenados esgotos domésticos e industriais, fertilizantes, excrementos de animais, entre outras.
- Fósforo encontra-se na água nas formas de ortofosfato, polifosfato e fósforo orgânico é essencial para o crescimento de algas. Teores muito elevados, causam a eutrofização, suas principais fontes são dissolução de compostos do solo, decomposição da matéria orgânica, esgotos domésticos e industriais, fertilizantes, detergentes, entre outras.
- Fluoretos têm ação benéfica de prevenção da cárie dentária em concentrações mais elevadas, podem provocar alterações da estrutura óssea ou a fluorose dentária.
- Sulfato é um dos principais ânions que ocorrem em águas naturais. As fontes são a decomposição de rochas, chuvas e agricultura.
- Oxigênio Dissolvido (OD) é indispensável aos organismos aeróbios, as águas com baixos teores de oxigênio dissolvido indicam que receberam matéria orgânica.

- Matéria Orgânica é necessária em pequena quantidade como fonte de sais nutrientes e gás carbônico, mas em grandes quantidades causa problemas como cor, odor, turbidez, consumo do oxigênio dissolvido, pelos organismos decompositores. São utilizados como indicadores a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a demanda química de oxigênio (DQO).
- Componentes Inorgânicos da água os metais pesados são tóxicos como o arsênio, cádmio, cromo, chumbo, mercúrio, prata, cobre e zinco. Os cianetos são incorporados à água através de despejos industriais e por atividades agrícolas, garimpo e mineração.
- Componentes orgânicos são resistentes a degradação biológica são fontes os agrotóxicos, detergentes e outros produtos químicos.

#### 2.3.5 Parâmetros Biológicos

- Coliformes totais grupos de bactérias gram-negativas (Aeróbias ou Anaeróbias), que não formam esporos e são associadas à decomposição de matéria orgânica.
- Coliformes termotolerantes estão associados a animais de sangue quente, a *Escherichia coli* é utilizada para indicação de contaminação desse grupo.
- Bactérias heterotróficas são microrganismos que requerem carbono orgânico como fonte de nutrientes fornecendo informações sobre a qualidade bacteriológica da água, usada para avaliar a eficácia dos métodos de tratamento da água.

A pesquisa quantitativa de bactérias heterotróficas em águas de consumo tem como objetivo avaliar a qualidade do processo do tratamento das mesmas e as condições higiênicas dentro da rede de distribuição (FREIRE; LIMA, 2012).

A qualidade microbiológica é analisada através de coliformes totais, termotolerantes e estreptococos. Os coliformes totais são utilizados apenas como indícios de contaminação. A *Escherichia coli* é considerada o melhor indicador de contaminação fecal, pois algumas espécies de bactérias pertencentes ao grupo dos coliformes termotolerantes podem ser encontradas em outras fontes que não fezes (ZOBY, 2008).

## 2.4 FONTES DE CONTAMINAÇÃO

O crescimento da população, a urbanização e a diversificação das atividades econômicas e agrícolas contribuem para a escassez, superexploração e para a degradação qualitativa das águas subterrâneas como poluição e degradação química. E o bombeamento extensivo de poços costeiros contribui para a intrusão salina e a contaminação, são fatores adicionais na degradação da qualidade das águas subterrâneas. Assim, proteção e conservação dos recursos hídricos subterrâneos são importantes principalmente onde os recursos hídricos são limitados (ALLOUCHE *et al.*, 2017).

A contaminação ocorre pela ocupação inadequada de uma área que não considera a sua vulnerabilidade, ou seja, a capacidade do solo de degradar as substâncias tóxicas introduzidas no ambiente. A contaminação pode se dar por fossas negras; infiltração de efluentes industriais; fugas da rede de esgoto e galerias de águas pluviais; vazamentos de postos de serviços; contaminação por água salina advinda do mar em aquíferos costeiros, por aterros sanitários e lixões; uso indevido de fertilizantes nitrogenados; entre outros (HIRATA; SUHOGUSOFF; FERNANDES, 2007).

A cada ano o aumento da demanda por alimentos e infraestrutura urbana nas cidades leva ao lançamento de contaminantes oriundos das atividades agrícolas ou provenientes de resíduos residenciais urbanos e industriais que se infiltram no solo. A origem das condições adversas provém frequentemente do uso da terra, onde os contaminantes lançados pelas atividades vão para as zonas insaturadas através da percolação e difusão, da superfície para as águas subterrâneas e os aquíferos (NADIRI *et al.*, 2017); (KAVURMACI, 2016).

Outros compostos contaminantes das águas subterrâneas em áreas urbanas são os combustíveis líquidos derivados do petróleo. Os metais pesados e solventes clorados são produtos bastante comuns nas indústrias e responsáveis pelas maiores e mais complexas plumas de contaminação em aquíferos pela deposição inadequada de resíduos sólidos (HIRATA; ZOBY; OLIVEIRA, 2010).

Segundo Foster *et al.* (2006) a preocupação com a contaminação da água subterrânea se concentra principalmente nos aquíferos freáticos ou não confinados, especialmente nas áreas em que a zona vadosa é pouco espessa e o lençol freático

é raso. Entretanto, há riscos de contaminação em aquífero semiconfinado, se os aquíferos confinantes forem pouco espessos e permeáveis.

Para obtenção de dados físicos, químicos e microbiológicos significativos das fontes de contaminação das águas subterrâneas, se faz através de análises de amostras coletadas dos poços, assim mapeando a concentração e a distribuição de contaminantes específicos para serem utilizados em qualquer modelo que possa ser construído para avaliar essas águas. A seguir o Quadro 1 mostrando os contaminantes mais comuns e as respectivas fontes.

**Quadros 1 - Contaminantes e fontes de poluição**

ORIGEM DA POLUIÇÃO	CONTAMINANTES
Agricultura	Nitratos, amônia, pesticidas e resíduos animais
Saneamento <i>in situ</i>	Nitrato, hidrocarbonetos halogenados microrganismos
Postos de serviços	Hidrocarbonetos aromáticos e halogenados, benzeno e fenóis
Depósitos de resíduos sólidos	Amônia, salinidade, hidrocarbonetos halogenados, metais pesados
Indústrias	Hidrocarbonetos aromáticos e halogenados, benzeno, metais pesados
Pintura e esmaltação	Hidrocarbonetos aromáticos e halogenados, tetracloroetileno, metais pesados, benzeno
Resíduos de esgoto	Nitrato, amônia, chumbo, zinco, Hidrocarbonetos halogenados
Curtumes	Cromo, hidrocarbonetos halogenados, fenóis
Extração de derivados de petróleo	Hidrocarbonetos aromáticos e salinidade
Mineração	Metais pesados, ferro, sulfatos

**Fonte: Adaptado Foster *et al.*, 2006**

#### 2.4.1 Contaminação por Nitrato

A crescente preocupação internacional em relação à degradação ao meio ambiente resultou na introdução de regulamentos rígidos para a proteção dos recursos hídricos, onde a contaminação das águas subterrâneas por nitratos é uma das ameaças mais difundidas em todo o mundo (REBOLLEDO *et al.*, 2016).

O uso de fertilizantes associado à irrigação permitiu-se aumentar a produção agrícola, mas induziu o esgotamento desse recurso, onde a contaminação é amplamente difundida, com imensos impactos nos recursos e ecossistemas

(LAPWORTH *et al.*, 2017). O impacto mais comum da agricultura na qualidade das águas subterrâneas é o aumento de concentrações sulfato e nitrato (VALLE JUNIOR *et al.*, 2015).

As altas taxas de aplicação de fertilizantes contendo nitrogênio combinados com a alta solubilidade em água do nitrato, levam ao aumento do escoamento nas águas superficiais, bem como a lixiviação nas águas subterrâneas causando a poluição (ZEIDAN, 2017). A qualidade da água subterrânea está sob potencial ameaça de contaminação, especialmente em áreas agrícolas com aplicações intensivas de fertilizantes e pesticidas (BUVANESHWARI *et al.*, 2017).

As concentrações elevadas constituem um risco à saúde e ao ambiente, e a poluição dos recursos hídricos pode ser proveniente de várias vias, incluindo as fontes pontuais e difusas. Em áreas rurais estão associados a extensas áreas de monocultura, ao uso de dejetos animais e no uso da terra. Nas áreas urbanas, a contaminação está associada a sistemas de saneamento *in situ*, vazamento da rede de esgotamento sanitário, resíduos sólidos (lixões e aterros sanitários) e cemitérios (ARAUZO; MARTÍNEZ-BASTIDA, 2015).

A contaminação das águas subterrâneas por nitrato tem causado uma crescente preocupação, uma vez que esse composto representa um importante indicador de contaminação antropogênica, pois apresenta grande persistência e alta mobilidade, podendo atingir extensas áreas e permanecer dissolvido nas águas por várias décadas nos aquíferos. Devido à persistência, sua remoção da água para atender ao padrão de potabilidade, envolve altos investimentos, sendo tecnicamente inviável, assim prejudicando o abastecimento público e privado (FOSTER *et al.*, 2006).

A Portaria de consolidação nº. 5/2017 do Ministério da Saúde (MS) estabelece os procedimentos e responsabilidades ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seus padrões de potabilidade. Para estar em conformidade com o padrão de substâncias químicas as águas potáveis devem apresentar limite de concentração 10,0 mg/L de N-NO<sub>3</sub> (BRASIL, 2017).

As concentrações de nitrato acima de 5,0 mg/L indicam uma alteração do equilíbrio natural, principalmente por influência antropogênica sobre a qualidade das águas subterrâneas. O nitrato é prejudicial à saúde, mesmo não ultrapassando o valor máximo permitido (VMP), disposto na Portaria de consolidação nº. 5/2017 do MS e requer atenção das autoridades em saúde pública e dos órgãos fiscalizadores (CETESB, 2006).

O nitrato é também o contaminante de maior presença nos aquíferos brasileiros. Nas áreas urbanizadas, é reflexo da falta de sistemas de esgotamento sanitário que, no país, atinge pouco mais de 50 % da população (HIRATA; ZOBY; OLIVEIRA, 2010).

Alguns estudos apontaram a relação direta entre os padrões de concentração de nitrato nas águas subterrâneas com a ocupação urbana mediante o uso de diferentes ferramentas. Conforme Varnier; Guerra; Hirata (2009) estabeleceram uma relação entre a contaminação das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru por nitrato e os padrões de urbanização.

Conforme os autores nessa avaliação, realizou-se um levantamento das principais fontes de contaminação, relacionado com o histórico do uso e ocupação do solo, obteve-se resultados que mostraram contaminação antropogênica e multipontual, do tipo fossas negras, instaladas na área urbana do município desde a década de 50. As maiores concentrações de nitrato foram observadas nas porções mais rasas do aquífero, e nas áreas de maior densidade dessas fossas.

No estudo de Drake; Boudier (2005) foram analisados dados de 1971 a 2003, do Estado de Montana (EUA). Nesta pesquisa foi observado o aumento nas concentrações do nitrato em áreas com rápido crescimento populacional e os pesquisadores concluíram que esse fato estaria associado a alta densidade de fossas e à má construção dos sistemas sépticos.

Em outro estudo realizado por Gardner; Vogel (2005) determinaram as tendências espaciais e temporais nos dados históricos de qualidade da água subterrânea em Nantucket, Massachusetts (EUA), usando modelo estatístico para previsão das concentrações de nitrato frente aos padrões de uso do solo. Os resultados indicaram que a presença desse contaminante na água subterrânea está diretamente relacionada ao uso e ocupação do solo.

Portanto os estudos indicam que a expansão da ocupação urbana sem sistema adequado de esgotamento sanitário gera uma carga contaminante de nitrato significativa, que atinge os aquíferos e ameaça a qualidade das águas subterrâneas. Sendo necessários mais estudos para aprofundar esta relação aos diferentes cenários de ocupação e contexto hidrogeológico, identificação das áreas críticas e implantação de medidas efetivas de atenuação do problema.

#### 2.4.2 Coliformes totais e termotolerantes

No estudo das águas subterrâneas os parâmetros microbiológicos têm um papel de destaque para a saúde pública, pois os aspectos sanitários devem ser focados, estudando o comportamento dos indicadores de poluição de origem fecal bem como de bactérias patogênicas. Os indicadores de poluição mais comumente utilizados são os coliformes, principalmente o grupo dos Coliformes fecais ou Termotolerantes e os *Streptococos* fecais.

Os coliformes totais são indicadores adequados e suficientes da qualidade bacteriológica da água tratada. Para a avaliação da qualidade de águas naturais, os coliformes totais têm valor sanitário limitado, pois a presença pode indicar falhas no tratamento, uma possível contaminação após o tratamento ou ainda a presença de nutrientes em excesso, como em reservatórios e nas redes de distribuição (MARTINS *et al.*, 1991).

A Portaria de consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde estabelece que seja verificada, na água para consumo, a ausência de coliformes totais, de forma a garantir sua potabilidade. Em águas subterrâneas *in natura* (não desinfetadas) a presença de coliformes totais pode indicar que o sistema é vulnerável à contaminação, ou pode ser um sinal de regeneração bacteriana.

Os coliformes termotolerantes têm sido um dos indicadores de uso mais frequente na avaliação da qualidade de água, o problema da utilização deste grupo como indicador de patógenos entéricos é que ele possui um menor tempo de sobrevivência no solo e em águas subterrâneas. Contudo, a maior vantagem é que eles não têm demonstrado condições de desenvolvimento no meio aquático, diferindo dos coliformes totais, que sobrevivem tempo suficiente para ser um indicador útil (MARTINS *et al.*, 1991).

Os coliformes podem estar envolvidos em infecções intestinais e diversas outras patologias, como meningites, intoxicações alimentares, infecções urinárias, pneumonias entre outras doenças. A análise bacteriológica da água é uma importante ferramenta para a determinação da qualidade da água para consumo. As técnicas são específicas e sensíveis ao microrganismo patogênico em águas destinadas para abastecimento público (BRASIL, 2017).

Os coliformes termotolerantes estão associados a um elevado número de patologias e causadores da maioria das infecções intestinais humanas. As doenças

transmitidas por estes patógenos podem ser espalhadas através da água do poço que está contaminado com resíduos das fossas e agentes patogênicos podendo levar à transmissão de doenças (YAMAGUCHI *et al.*, 2013).

O baixo percentual de esgotamento sanitário é preocupante, pois isso representa um risco direto à potabilidade das águas subterrâneas pela infiltração por fossas sépticas e pelo vazamento de redes de esgoto (ZOBY, 2008).

No monitoramento da qualidade da água são utilizados indicadores biológicos específicos como as bactérias do grupo coliformes termotolerantes, pois a presença indica que a água está contaminada por fezes originária de animais de sangue quente ou humana.

A água potável deve estar livre de bactérias que indiquem contaminação fecal, e a principal representante desse grupo de bactérias é a *Escherichia coli* que é um microrganismo designado como termotolerante, desprovido de vida livre no ambiente, indicando que quando presente na água a mesma está contaminada (BRASIL, 2017).

A *Escherichia coli* habita normalmente o intestino dos seres humanos em grande quantidade sem causar doenças, pois é bastante conhecida e controlada pelo sistema imunológico. Porém quando é disseminada em outros órgãos ou por outros indivíduos, não sendo reconhecida pelos linfócitos, pode implicar em intoxicações alimentares (YAMAGUCHI *et al.*, 2013).

A Portaria de consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde estabelece a ausência de *Escherichia coli* em 100 ml de amostra analisada para que a água esteja dentro do padrão de potabilidade (BRASIL, 2017).

#### 2.4.3 Fontes de contaminações e sua migração para as águas subterrâneas

Outras causas de poluição das águas subterrâneas são a aplicação de pesticidas, derrames químicos de operações comerciais ou industriais, derrames de combustíveis, despejo ilegal de resíduos, filtração de escoamento urbano ou operações de mineração, resíduos rodoviários e até contaminantes atmosféricos uma vez que as águas subterrâneas fazem parte do ciclo hidrológico. O excesso de aplicação de adubo animal pode resultar em poluição, bem como os poluentes orgânicos, hidrocarbonetos, compostos químicos encontrados em produtos de higiene pessoal e cosméticos, drogas farmacêuticas e compostos inorgânicos como a amônia, nitrato, fosfato, metais pesados, entre outros (ZEIDAN, 2017).

No Brasil, a proteção qualitativa das águas subterrâneas vem sendo negligenciada, apesar da sua importância econômica e estratégica. Portanto, necessita de uma proteção contra as diferentes formas de contaminação. O solo tem um papel muito importante na retenção dos microrganismos, através de fatores físicos, químicos e ambientais, que afetam a infiltração e o transporte dos microrganismos para o lençol freático.

A implantação dos cemitérios sem levar em consideração os critérios geológicos e hidrogeológicos, constitui uma das causas de deterioração da qualidade das águas subterrâneas, pois substâncias e microrganismos provenientes de decomposição de cadáveres podem ter acesso às mesmas, representando um risco do ponto de vista sanitário e higiênico (NETO, 2013).

Essa prática representa um risco muito grande ao meio ambiente, especialmente para as águas subterrâneas de pequena profundidade. A localização irregular de um cemitério no perímetro urbano ou rural pode provocar a contaminação de recursos hídricos por microrganismos que se proliferam durante o processo de decomposição do cadáver (necrochorume), que são líquidos liberados pelo cadáver em putrefação. Se a contaminação do cemitério chegar ao lençol freático, essa poderá fluir para as regiões próximas, colocando em risco à saúde de pessoas que fazem uso de água de poços rasos (BAUAB; LEME, 2013).

Observando o cenário brasileiro, é alarmante a situação de como estão sendo gerenciados os cemitérios, por ser comparado a um aterro sanitário, devido a presença de materiais orgânicos e inorgânicos, podendo conter bactérias e vírus perigosos colocando em risco o meio ambiente e a saúde pública. Portanto, os problemas estruturais dos cemitérios podem ser considerados os principais agentes causadores da contaminação do solo e da água subterrânea com patógenos e metais pesados, devido a sua instalação sem prévio estudo ambiental e da má conservação (ANJOS, 2007).

Os aterros sanitários são fontes potenciais de degradação das águas subterrâneas e superficiais, devido ao lixiviado resultante da disposição inadequada de resíduos sólidos, sobre áreas com solo permeável (cascalho, areia e rochas fissuradas) onde a migração do lixiviado pode atingir o lençol freático. Os contaminantes estão sujeitos a dispersão e difusão podendo provocar a contaminação de áreas muito maiores do que aquelas em que os resíduos estão dispostos. Porém, se forem dispostos em locais planejados e operados devidamente, pode haver a

disposição dos resíduos sem praticamente nenhum risco de contaminação das águas subterrâneas (ZEIDAN, 2017).

#### 2.4.4 Interação com água de superfície

A água da superfície se infiltra através do solo tornando-se água subterrânea, assim as águas subterrâneas também podem alimentar as fontes de água da superfície, estas interações são complexas. Portanto, os aquíferos são suscetíveis a contaminação por fontes que podem, ou não, afetar diretamente os corpos de água superficiais, mas que afetam as águas subterrâneas (ABAS, 2018).

A água promove a expansão e a contração das partículas do solo, a aderência e a formação estrutural dos agregados, participando de inúmeras reações químicas que liberam ou retêm nutrientes. Ela pode movimentar-se tanto ascendente como descendente, e essa interação (solo - água) influenciam muitas funções ecológicas e práticas de manejo do solo, determinando quanto da água da chuva infiltra através do solo ou escoar sobre sua superfície. Esses processos determinam o movimento de substâncias químicas para as águas superficiais e subterrâneas (ZEIDAN, 2017).

#### 2.4.5 Intrusão salina

A proximidade dos aquíferos costeiros com água salgada gera questões em relação à sustentabilidade das águas, principalmente a intrusão salina, onde ocorrem alterações na quantidade e qualidade de águas subterrâneas. O avanço da intrusão salina no aquífero costeiro depende de fatores como o bombeamento e a recarga, bem como da espessura e as propriedades hidráulicas do aquífero.

A intrusão salina é um dos principais problemas de qualidade da água em aquíferos costeiros, principalmente devido a superexploração. A água do mar penetra preenchendo o espaço vazio, provocando a degradação do aquífero, tornando as águas impróprias para o consumo humano e outros usos. A Compreensão dos mecanismos envolvidos no processo de salinização é um fator chave para a utilização de forma eficiente e sustentável os recursos hídricos (ARGAMASILLA; BARBERÁ; ANDREO, 2017).

As formas de investigação da intrusão salina são bastante discutidas e deve-se averiguar se a salinização das águas dos poços é de origem marinha ou de outras fontes como os estuários de rios, mangues, efluentes de fossas negras, presença de águas subterrâneas antigas salinizadas, poços mal construídos ou com corrosão que levam a salinização. Os poços com elevada salinização, devem ser lacrados ou cimentados. A diminuição da extração de água dos poços é a melhor maneira para controlar a intrusão salina (MONTENEGRO, 2011).

As alterações climáticas também podem provocar o aumento do nível do mar, situação que provocará intrusão salina e conseqüentemente a degradação da qualidade da água nas regiões costeiras. O planejamento e gestão dos sistemas hídricos costeiros define um conjunto de regras para o licenciamento de captações e caracteriza os procedimentos para a exploração e manter a qualidade da água e o equilíbrio natural. Uma gestão quantitativa sustentável dos recursos hídricos deve garantir a disponibilidade de água e garantir que os aquíferos não sejam superexplorados (SILVA; HAIE, 2000).

Este problema, afeta grande parte das cidades costeiras do mundo que utilizam águas subterrâneas. No Brasil, diversas cidades possuem risco de degradação dos aquíferos costeiros por salinização pelo avanço da cunha salina como é o caso de Fortaleza, Maceió, Recife e Rio de Janeiro (MONTENEGRO, 2011).

#### 2.4.6 De quem é a responsabilidade de proteger as águas subterrâneas?

Conforme Foster *et al.* (2006) a responsabilidade é de todos de preservar e proteger as águas subterrâneas e o meio ambiente como um todo, mas as empresas de abastecimento de água têm a responsabilidade de cumprir os códigos e normas, atribuindo-se a elas a obrigação de serem proativas em promover avaliações do perigo de contaminação para todas as suas fontes de águas subterrâneas.

Conforme o autor, a esfera do governo municipal, estadual e federal também tem suas responsabilidades como:

- Mapear a vulnerabilidade do aquífero ou águas subterrâneas
- Cadastrar as cargas poluidoras
- Delimitar as áreas de proteção de captações de água
- Avaliar o perigo de contaminação

- Propor medidas de controle da degradação das águas subterrâneas

Estes órgãos públicos devem realizar campanhas socioeducativas para conscientização da população quanto ao uso e preservação das fontes de águas subterrâneas e superficiais.

A lacuna do conhecimento sistemático da situação das águas subterrâneas no Brasil não permite identificar e delimitar a extensão dos problemas que afetam os aquíferos e seus usuários. O não engajamento do usuário e do estado nas questões relativas às águas subterrâneas está associado à falta da percepção do problema e de suas causas por parte do usuário. Constituindo um problema à gestão das águas subterrâneas (CONICELLI; HIRATA, 2016).

A contaminação antropogênica e a superexploração de aquíferos são descritos pontualmente pelo território, mas sem uma sistematização que permita extrapolar suas reais dimensões ou identificar outras áreas com igual potencialidade. Consideram-se poucos os problemas comparados aos volumes e extensão dos aquíferos, mas pelas informações disponíveis, a problemática está aumentando em número e complexidade, causando a degradação dos recursos subterrâneos (HIRATA; ZOBY; OLIVEIRA, 2010).

## 2.5 VULNERABILIDADE INTRÍNSECA E ESPECÍFICA

A proteção das águas subterrâneas é complexa, pois essas fontes são afetadas por uma variedade de processos naturais e de atividades antropogênicas, principalmente os que envolvem usos e ocupações do solo. A vulnerabilidade do aquífero à contaminação pode ser identificada com o levantamento das possíveis cargas contaminantes e a realização da avaliação dos perigos dessa contaminação (LAPWORTH *et al.*, 2017).

Conforme Foster *et al.* (2006) vulnerabilidade de um aquífero refere-se ao seu grau de proteção natural às possíveis ameaças de contaminação potencial, e depende das características litológicas e hidrogeológicas dos estratos que o separam da fonte de contaminação e dos gradientes hidráulicos que determinam os fluxos e o transporte das substâncias através da sequência de estratos no aquífero. A contaminação ocorre pela ocupação inadequada das áreas sem levar em consideração a fragilidade e a

capacidade do solo em degradar as substâncias introduzidas no ambiente, principalmente na zona de recarga dos aquíferos.

A vulnerabilidade das águas subterrâneas é definida como uma propriedade intrínseca do sistema de água subterrânea que depende da sensibilidade desse sistema aos impactos humanos e naturais, sendo a vulnerabilidade intrínseca de um aquífero à contaminação, baseia-se em uma avaliação dos atributos climáticos, geológicos e hidrogeológicos naturais (WITKOWSKI; KOWALCZYK; VRBA, 2014); (RIBEIRO; PINDO; DOMINGUEZ-GRANDA, 2017).

Enquanto que a vulnerabilidade específica é avaliada principalmente em termos do risco do sistema de águas subterrâneas se tornarem exposto aos contaminantes (EL-FADEL *et al.*, 2014); (AYED *et al.*, 2017); (GOUDARZI *et al.*, 2017).

A vulnerabilidade à poluição do aquífero através de pesquisas de contaminantes subsuperficiais para determinar o perigo de poluição das águas subterrâneas deve ser enfatizado, pois a pesquisa de carga contaminante é mais crítica para avaliação do risco de poluição do que a vulnerabilidade do aquífero, especialmente em ambientes de baixa vulnerabilidade à poluição (FOSTER; HIRATA; ANDREO, 2013).

A realização de estudos de vulnerabilidade potencial e de risco à contaminação, sobretudo nas áreas de recarga dos aquíferos é imprescindível, pois esta avaliação corresponde a um conjunto de características intrínsecas dos estratos, ou seja, dos solos e substratos geológicos que determinam a fragilidade à presença de cargas contaminantes (FOSTER *et al.*, 2006).

O objetivo da avaliação da vulnerabilidade é distinguir entre áreas onde o sistema é mais ou menos vulnerável à contaminação, enfatizando que é uma propriedade relativa, não mensurável e sem dimensões podendo ser distinguida em vulnerabilidade intrínseca e específica (OKE; FOURIE, 2017).

A importância da vulnerabilidade do aquífero e sua manifestação prática no mapeamento é uma ferramenta valiosa para a proteção da qualidade, mesmo não havendo um consenso sobre quais fatores ambientais, devem ser considerados nas avaliações da vulnerabilidade das águas subterrâneas, pois a degradação está prevalecendo em terras agrícolas onde os fertilizantes são amplamente utilizados. Entretanto essa degradação é imperceptível e os efeitos a longo prazo são onerosos, sendo a prevenção da contaminação indispensável para a gestão eficiente dos recursos hídricos subterrâneos (ARAUZO, 2017).

Enquanto a água subterrânea é considerada uma fonte resistente de água potável, a falta de uma gestão adequada dos resíduos domésticos e industriais está se tornando uma preocupação, onde se considera a prevenção da contaminação decisiva para manter a qualidade e promover a gestão eficaz das águas subterrâneas (LAPWORTH *et al.*, 2017).

## 2.6 MÉTODOS TRADICIONAIS PARA A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE

Para a proteção dos recursos hídricos subterrâneos da degradação, os cientistas desenvolveram técnicas para prever quais áreas são mais vulneráveis de serem contaminadas por atividades antropogênicas, tais como o uso de produtos agrícolas (fertilizantes e pesticidas), efluentes urbanos e industriais (fossas, aterros sanitários) entre outros poluentes.

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

Esses métodos têm sido aplicados principalmente à proteção de águas subterrâneas em aquíferos porosos, todos os métodos são capazes de distinguir graus de vulnerabilidade em escalas regionais, onde existem diferentes litologias (ŞENER; ŞENER; DAVRAZ, 2017).

O índice DRASTIC (Depth, Recharge, Aquifer media, Soil, Topography, Impact of the vadose zone, and Conductivity) (ALLER; HACKETT; THORNHILL, 1987). Considerado um dos principais método utilizados para avaliar a vulnerabilidade intrínseca, utilizando sete parâmetros com os respectivos pesos:

- (D) Profundidade do nível d'água (5)
- (R) Recarga ao aquífero (4)
- (A) Litologia do aquífero (3)
- (S) Tipo de solo (2)
- (T) Topografia do local (1)

- (I) Textura da zona vadosa (5)
- (C) Condutividade hidráulica do aquífero (3)

Este método é um modelo eficiente e requer informações importantes para ser aplicado, o que requer maior investimento. Porém, apresenta a vantagem de ser mais confiável, pois considera sete parâmetros.

A aplicação desse método tem revelado limitações, pois os parâmetros hidrogeológicos são difíceis se serem estimados, mesmo quando os valores são estatisticamente representativos e calculados através de medições em campo (NESHAT; PRADHAN, 2015).

Outro método bastante utilizado devido a sua praticidade na avaliação vulnerabilidade do aquífero à poluição é o índice GOD que foi desenvolvido por (FOSTER; HIRATA, 1988) que leva em consideração a avaliação de três parâmetros:

- (G) Tipo de aquífero
- (O) Litologia
- (D) Profundidade da água no aquífero

É representado pela multiplicação dos parâmetros, gerando o índice GOD. O resultado da avaliação da vulnerabilidade pode ser considerado insignificante (0 a 0,1), baixa (0,1 a 0,3), média (0,3 a 0,5), alta (0,5 a 0,7) e extrema (0,7 a 1,0).

Sendo que os valores mais elevados do índice correspondem às áreas mais vulneráveis à poluição. Esse método é amplamente utilizado por sua facilidade ao acesso das informações e aplicação, podendo ser aplicado a qualquer tipo de aquífero, exceto nas áreas cársticas. A sua simplicidade é uma vantagem, pois requer menos informações, recursos humanos e financeiros para realização da avaliação.

Na metodologia AVI são utilizados para o cálculo do índice de vulnerabilidade os fatores hidrogeológicos potenciais de recarga do aquífero (condutividade hidráulica e a porosidade) e a profundidade do nível d'água. Os fatores como a capacidade de atenuação natural do solo não são considerados.

Segundo Guiguer; Kohnke (2002) divide-se a profundidade do nível d'água pelo potencial de recarga, obtendo-se como resultado o tempo de percurso vertical, estimando quanto tempo um contaminante levará para atingir o aquífero, obtendo-se 5 classes:

- Classe 1: < 5 anos, a água chega muito rápido ao aquífero através de material de alta condutividade hidráulica (areia/cascalho).

- Classe 2: 5 – 10 anos, a água chega rápido ao aquífero, onde o material e a distância ao aquífero controla a taxa de recarga.
- Classe 3: 10 – 100 anos, a água chega devagar ao aquífero sendo que o material e a distância ao aquífero controla a taxa de recarga.
- Classe 4: >100 anos, a água chega muito devagar ao aquífero através de material de baixa condutividade hidráulica (silte/argila).
- Classe 5: Não ocorre fluxo descendente é a mais baixa vulnerabilidade, com fluxo ascendente ou gradiente próximo a zero.

Existem diversas definições do termo vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas, mesmo tendo diferentes abordagens, todas concluem que a vulnerabilidade das águas subterrâneas não é uma propriedade física e não pode ser medida ou estimada por um método padronizado (PISINARAS; POLYCHRONIS; GEMITZI, 2016).

## 2.7 MÉTODOS ATUAIS PARA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE

Com o avanço da contaminação foi necessário desenvolver métodos mais precisos e específicos para cada tipo de contaminante, identificando as áreas mais vulneráveis a determinados poluentes, surgindo os métodos de avaliação da vulnerabilidade específica das águas subterrâneas, para gestão e proteção desse recurso indispensável e limitado.

Os métodos atualmente conhecidos de avaliação de vulnerabilidade são mais complexos, porém é necessário selecionar parâmetros importantes para representar a confiabilidade da avaliação. A vulnerabilidade das águas subterrâneas em uma área específica pode ser completamente diferente de outras áreas e a inclusão de parâmetros redundantes na avaliação nem sempre garante confiabilidade da avaliação (OKE; FOURIE, 2017).

Conforme os estudos hidrogeológicos e a caracterização das variáveis físicas que afetam o nível de proteção natural dos aquíferos são importantes, pois todos os aquíferos são vulneráveis aos impactos de contaminantes, desde que ocorra a recarga, e a proteção natural ocorre dependendo do material que recobre o aquífero evitando impactos.

As avaliações de vulnerabilidade deveriam ser feitas em escala local, assim esta abordagem permite avaliar uma única fratura ou múltiplas fraturas no aquífero, uma vez que as rochas fraturadas são reconhecidas como altamente vulneráveis, fornecendo pouca atenuação e caminhos fáceis para que os contaminantes atinjam os recursos das águas subterrâneas (ROBINS; CHILTON; COBBING, 2007).

No estudo realizado por Arauzo; Martinez (2017) foi utilizada uma nova abordagem avaliando as zonas vulneráveis de nitrato. Outros estudos desenvolveram ferramentas para avaliar os índices de qualidade das águas subterrâneas utilizando parâmetros químicos (HANCOX *et al.*, 2009); (LAPWORTH *et al.*, 2017); (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 na pré-moção e na pós-moção).

Portanto, vários métodos foram apresentados para a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas ao longo dos últimos anos, produzindo resultados variáveis.

## 2.8 MÉTODOS DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

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 através de múltiplos critérios (BELTON; STEWART, 2002).

Essa abordagem visa fornecer aos gestores ferramentas que lhes permitam progredir na resolução de problemas de decisão, onde vários objetivos nem sempre são consensuais, devem ser levados em consideração (LÓPEZ; ALMEIDA, 2014).

A metodologia multicritério caracteriza-se em construir modelos nos quais os múltiplos critérios relacionados à avaliação estão explícitos e sujeitos à análise crítica dos decisores, ajudando-os a moldar suas preferências, não buscando uma solução ótima para um determinado problema, mas uma solução de compromisso, em que deve prevalecer o consenso, visando apoiar o processo decisório com a recomendação de ações que estejam de acordo com as preferências dos agentes de decisão (ALMEIDA, 2011).

Segundo o autor, a categoria dos métodos de decisão multiobjetivo ou otimização vetorial o espaço de decisão é contínuo (número infinito de alternativas) e descrito por funções objetivo que devem ser satisfeitas simultaneamente. E a categoria dos métodos de decisão multiatributo ou de decisão multicritério discreta, consiste em um número predeterminado (finito de alternativas) a serem avaliadas.

Conforme Vincke (1992) tais métodos admitem que os especialistas dividam as abordagens em:

- Teoria da utilidade multiatributo ou do Critério único de síntese
- Abordagem de sobreclassificação ou superação
- Métodos interativos

Segue Quadro 2 com as descrições das abordagens dos métodos.

**Quadro 2 - Descrição das abordagens dos métodos multicritério**

ABORDAGENS	DESCRIÇÃO
Teoria da Utilidade Multiatributo ou do Critério Único de Síntese	Derivada da escola Americana que consiste na agregação dos diferentes critérios em uma única função de síntese. As preferências do decisor por determinada alternativa, avaliadas mediante um conjunto de critérios ou indicadores, são agregadas em um valor de utilidade único, que é mensurado de uma forma aditiva (com trade-offs), ou seja, é gerado um score de cada alternativa com base no desempenho que apresentou em cada critério, assim as alternativas de melhor avaliação são as que obtiverem o melhor score (Almeida, 2011). Alguns métodos desta abordagem podem ser citados: MAUT, SMART, TOPSIS, AHP.
Sobreclassificação ou Subordinação	Procede da escola Francesa ou Europeia que consiste em construir uma relação de sobreclassificação que representa as preferências do decisor para auxiliar a resolver o problema. Possui a tendência de que as preferências dos decisores influenciem. O principal objetivo é a construção de relações binárias que representem as preferências do decisor com base na informação disponível (sem trade-offs) entre critérios, através de comparação par a par, assim, é melhor avaliada a alternativa que apresentar superioridade na maioria dos critérios, é considerada uma abordagem mais equilibrada, tendo em vista que é escolhida a alternativa que possuir um desempenho satisfatório na maioria dos critérios (Almeida, 2011). Os principais métodos desta abordagem são os das famílias: ELECTRE, PROMETHÉE.
Métodos Interativos	Multiobjective Linear Programming (MOLP) se caracterizam por possuir passos computacionais e serem interativos, permitindo trade-offs. Os métodos MOLP (Multiobjective linear Programming) buscam uma alternativa que seja claramente superior, ou seja, dominante em todos os objetivos estabelecidos, utilizando a agregação das preferências dos decisores e cálculos matemáticos, interativos e sucessivos na avaliação destas soluções. Cabe ressaltar que este processo é diferente das abordagens do critério único de síntese e de sobreclassificação, as quais, mediante a comparação entre critérios, buscam a solução mais satisfatória e não a dominante (Almeida, 2011). Alguns métodos dessa abordagem são: STEM, TRIMAP, ICW, PARETO RACE.

Fonte: Adaptado de Guarnieri, 2015.

Segundo Roy (1996) os métodos multicritério auxiliam na resolução dos seguintes problemas:

- Problema de escolha ( $P.\alpha$ ): consiste na escolha da melhor alternativa de um conjunto restrito para a solução;
- Problema de alocação ou classificação ( $P.\beta$ ): auxilia baseado em normas para alocação das alternativas em classes ou categorias;
- Problema de ordenação ( $P.\gamma$ ): auxilia na ordenação das alternativas de preferência;
- Problema de descrição ( $P.\delta$ ): descreve as alternativas detalhadamente para auxiliar o decisor no processo de decisão.

Para utilização desses métodos são necessários alguns elementos que são: problema; decisor; analista; alternativas; critérios; preferências; relações de preferência e pesos. Os métodos multicritérios podem ser diferenciados pela capacidade de considerar critérios quantitativos e qualitativos, também permitem a análise da decisão testando a sua confiabilidade.

Os processos de decisão envolvem a busca pela melhor solução, normalmente por meio de programação matemática, permitindo a comparação de diferentes alternativas com diferentes critérios para a tomada de decisão, sendo classificados em duas categorias de métodos, cuja a principal distinção baseia-se no número de alternativas em avaliação (KAHRAMAN, 2008).

Outro aspecto dessas metodologias é a fase de estruturação do problema, onde são levantadas todas as ações juntamente com os aspectos positivos e negativos. A matriz de decisão é a melhor maneira de apresentar a relação entre critérios e alternativas, especialmente nos métodos de Decisão Multicritério Discreta, sendo definidos para  $m$  alternativas (linhas) e  $n$  critérios (colunas), apresentando dimensão  $m \times n$  e os seus elementos ( $x_{ij}$ ) indicam o desempenho da alternativa  $i$  em relação ao Critério  $j$  (CAMPOS, 2011).

A seleção do modelo a ser aplicado depende das características do problema, da preferência do decisor e do tipo de resultado que se deseja, considerando que existem muitos métodos multicritério disponíveis. Deve ser evitado que a decisão seja influenciada pela facilidade de aplicação do método, onde a essência do procedimento é a modelagem de preferências eficientes (MOREIRA, 2007).

Na escolha de um determinado método, o decisor desempenha um papel fundamental, onde a sua escolha dependerá das suas preferências refletidas nos

critérios que podem ser compensatórios, permitindo *trade-offs* entre os critérios, onde um critério de maior desempenho pode ser compensado por um de menor desempenho. Os critérios não compensatórios onde as alternativas são avaliadas em pares pelas relações de preferência, indiferença ou incomparabilidade, não permitindo *trade-offs* (ALMEIDA, 2011).

No processo de tomada de decisão é comum que os gestores tenham que comparar alternativas entre si e realizar uma escolha. Quando a quantidade de alternativas for menor, o processo se torna mais fácil. Nos problemas complexos e com vários critérios muitas vezes conflitantes, torna-se necessário o uso de métodos estruturados (TROJAN; MARÇAL; BARAN, 2013).

A avaliação ambiental constitui um processo de tomada de decisão envolvendo objetivos e critérios, dessa maneira utiliza as técnicas e metodologias de análise multicritério para estruturação das avaliações. É também considerada uma ferramenta útil para a simplificação de situações complexas e incentiva o trabalho multidisciplinar, por isso tem sido frequentemente usado na situação de tomada de decisão no campo dos recursos hídricos (ALVARADO *et al.*, 2016).

Foram identificadas oito áreas de aplicação de análise de multicritério em recursos hídricos: 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 protegidas (HAJKOWICZ; COLLINS, 2007).

No estudo realizado por Trojan; Morais (2012) utilizaram métodos multicritérios para priorizar alternativas para a manutenção da água de redes de distribuição de uma empresa de abastecimento de água.

Para o monitoramento da vulnerabilidade do aquífero, com baixo custo, sugere-se a utilização de parâmetros específicos de qualidade das águas subterrâneas como, por exemplo, as concentrações de nitrato e sulfato em áreas dominadas pela agricultura, neste caso, os dados necessários para o estudo de vulnerabilidade seria a análise química das águas ((NESHAT; PRADHAN, 2015); (REBOLLEDO *et al.*, 2016); (ARAUZO, 2017).

No estudo realizado por Alvarado *et al.* (2016) utilizaram análise de decisão multicritério (MCDA) como uma ferramenta de decisão para facilitar o processo de priorização de poços que necessitam de maior proteção contra risco de contaminação.

Outros estudos que utilizaram esses métodos para avaliar índices de qualidade e a vulnerabilidade intrínseca ou específica das águas subterrâneas estão citados em: (MACHIWAL; JHA; MAL, 2011); (ADIAT; NAWAWI; ABDULLAH, 2012); (REZAEI; SAFAVI; AHMADI, 2013); (KUMAR; GAUTAM; KUMAR, 2014); (IQBAL; PATHAK; GORAI, 2015); (KAVURMACI, 2016); (AYED *et al.*, 2017); (HAIDER; AL-SALAMAH; GHUMMAN, 2017).

### 2.8.1 Método AHP

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) foi desenvolvido por Thomas Saaty em meados de 1980, é um método de análise multicritério amplamente utilizado no apoio à tomada de decisão, consiste em um método 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, auxilia na tomada de decisão, permite 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).

De acordo com Saaty (1977) para tomar uma decisão de forma organizada e produzir prioridades necessárias para a decomposição da decisão, é preciso seguir as seguintes etapas:

- Definição do problema de decisão: consiste em conhecer os valores do tomador de decisão, identificando qual o objetivo que pode ser atingido por meio da solução do problema.
- Estruturação do problema: estruturar o problema de modo a formar uma hierarquia, onde se identifica o objetivo e os critérios.
- Estabelecer prioridades: estas são definidas por comparação pareada, este processo é desenvolvido por meio de uma entrevista com os decisores, buscando assim priorizar os critérios com maior peso para atingir o objetivo.
- Síntese: a partir do processo de combinação e avaliação de prioridades frente aos critérios do problema, onde os julgamentos do tomador de decisão são

distribuídos pela hierarquia, e para serem julgadas as alternativas, recebem a síntese das preferências do especialista.

- Análise de sensibilidade: avaliar a consistência do resultado das alternativas, identificar possíveis fragilidades que podem ser geradas ao mudar a prioridade de um critério.
- Interação: as etapas anteriores são repetidas, permitindo assim que a decisão seja revisada com um entendimento melhor do problema.

Para utilizar o método AHP e fazer comparações, é necessária uma escala de números que indique quantas vezes um elemento é mais importante que o outro em relação ao critério ou propriedade em relação a qual eles são comparados.

**Tabela 1 - Escala de Saaty**

<b>ESCALA FUNDAMENTAL DE SAATY</b>	
<b>Valor</b>	<b>Definição</b>
<b>1</b>	Importância igual
<b>3</b>	Importância Fraca
<b>5</b>	Importância Forte
<b>7</b>	Importância Muito Forte
<b>9</b>	Importância Absoluta
<b>2, 4, 6, 8</b>	Valores intermediários

**Fonte: Saaty, 1977**

A escala de Saaty possui nove graduações, onde define cinco como principais, conforme mostrado na Tabela 1.

O método direciona os especialistas a evidenciar a importância relativa de cada critério na hierarquia estabelecida. Estes julgamentos são traduzidos em números, que são referidos como os pesos. Segundo Ji; Jiang (2003) relatam a importância da escala na aplicação do AHP, pois tem impacto significativo na consistência e precisão dos resultados.

A determinação do vetor de prioridades a partir de matrizes de comparação pareada é a parte importante do método e tem diferentes métodos para extrair o vetor de prioridades (SRDJEVIC, 2005). O método do autovetor principal, proposto por (SAATY, 1977) é muito conhecido e utilizado. Mas há outros métodos de priorização como o de normalização aditiva proposto por (SRDJEVIC, 2005).

Com o método de normalização aditiva utiliza-se o Índice de Consistência Harmônica para obter a razão de consistência (STEIN; MIZZI, 2007).

### 2.8.2 Método Topsis

A técnica de tomada de decisão TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) desenvolvida por (HWANG; YOON, 1981), avalia o desempenho das alternativas através da similaridade com a solução ideal, onde a melhor alternativa é a que mais se aproxima da solução ideal positiva e a mais distante da solução ideal negativa. A solução ideal positiva maximiza os critérios de benefício e minimiza os critérios de custo, enquanto a solução ideal negativa maximiza os critérios de custo e minimiza os critérios de benefício.

É um método de agregação compensatória que compara um conjunto de alternativas classificando os pesos para cada critério, normalizando os escores para cada critério e determinando a distância Euclidiana entre cada alternativa e a alternativa ideal, que é a melhor pontuação em cada critério. O passo inicial no TOPSIS, como em qualquer outra técnica de tomada de decisões multicritério, é selecionar os critérios e as alternativas. Depois disso, os critérios recebem pesos pelos tomadores de decisão. Em seguida, as alternativas recebem pontuações para cada critério e a matriz de decisão é formada.

O TOPSIS vem sendo aplicado para problemas de tomada de decisão em diferentes setores e nas mais diversas aplicações. Nas áreas ambientais, para avaliação dos serviços de saneamento (HELLER, 2007). Tem sido utilizado para avaliação da intensidade da poluição das águas subterrâneas (LI *et al.*, 2016), na avaliação do risco ambiental na poluição das águas subterrâneas (GOUDARZI *et al.*, 2017), e também na avaliação do índice de qualidade das águas subterrâneas (ZAHEDI; AZARNIVAND; CHITSAZ, 2017).

Conforme a avaliação preliminar dos poços de abastecimento que abrangem o estudo definiu-se o problema que consiste na avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas, sendo uma problemática de ordenação e o método selecionado para essa problemática foi o método multicritério TOPSIS.

### 2.8.3 Análise sensibilidade

A análise de sensibilidade em métodos multicritério discretos, procura observar se ocorrem mudanças quando os valores (pesos) dos critérios são alterados da melhor alternativa ou quando se estabelece um resultado e questionar a proximidade dos resultados imediatamente inferiores (KAUFMANN, 1975). É preocupação do processo de tomada de decisão garantir a estabilidade do sistema decisório (SAATY, 1980). A análise de sensibilidade, em outra definição, busca examinar a robustez da ordenação das alternativas ou a escolha de uma única alternativa é em relação a pequenas mudanças nos componentes da análise (MALCZEWSKI, 2010).

A análise de sensibilidade é de extrema importância no momento de tomar uma decisão para conseguir ponderar variações de cenários. Através da análise de sensibilidade com alteração dos pesos, é possível avaliar como a classificação global se altera. Esta análise é importante e será realizada para todos os critérios. O ponto de intersecção entre as retas representa a mudança de decisão, se não há ponto de intersecção, este critério não pode mudar a decisão final.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa é de natureza aplicada pois possibilita a aplicação do método para a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas em qualquer região desde que se apresente os dados para inserção no método.

É classificada como exploratória, e apresenta abordagem quantitativa, pois as informações utilizadas e os resultados foram descritos de forma numérica.

#### 3.2 ETAPAS DA PESQUISA

Esta pesquisa foi composta por: procedimentos de pesquisa bibliográfica; caracterização da área de estudo; avaliação dos sistemas produtivos de águas; escolha do método para avaliação da vulnerabilidade; definição das alternativas; definição dos critérios; definição da importância dos critérios; normalização da matriz; método TOPSIS e análise de sensibilidade.

##### 3.2.1 Procedimentos da pesquisa bibliográfica

Para desenvolvimento desse estudo foi realizada uma pesquisa estruturada sobre o tema, sendo que para a construção de um levantamento bibliográfico estruturado, capaz de buscar estudos relevantes e que enfoque o tema proposto, foi baseado no método de revisão de literatura o PROKNOW C, (*Knowledge Development Process Constructivist*) (LACERDA; ENSSLIN; ENSSLIN, 2012). A revisão sistemática foi dividida em três fases, tomando como base o procedimento que é constituído pela análise preliminar, seleção dos artigos, análise bibliométrica e de conteúdo.

Com a definição do tema da pesquisa, busca-se identificar um portfólio bibliográfico sobre o tema investigado, realizando-se a busca dos artigos em três bases de dados com reconhecimento na área de engenharia de produção: *Scopus*,

*Science Direct* e *Web of Science*. A busca foi realizada com palavras chaves e dentro de três eixos definidos para a pesquisa, com limitador de tempo entre 2012 a 2017. Buscando-se publicações sobre o assunto que englobasse vulnerabilidade das águas subterrâneas e utilização de métodos de multicritérios, utilizando-se o gerenciador bibliográfico *Mendeley* para exportação dos artigos das bases e a importação no *software*, realizado os procedimentos obteve-se o portfólio conforme o diagrama na Figura 1.

**Figura 1 - Diagrama do processo de revisão sistemática de literatura**



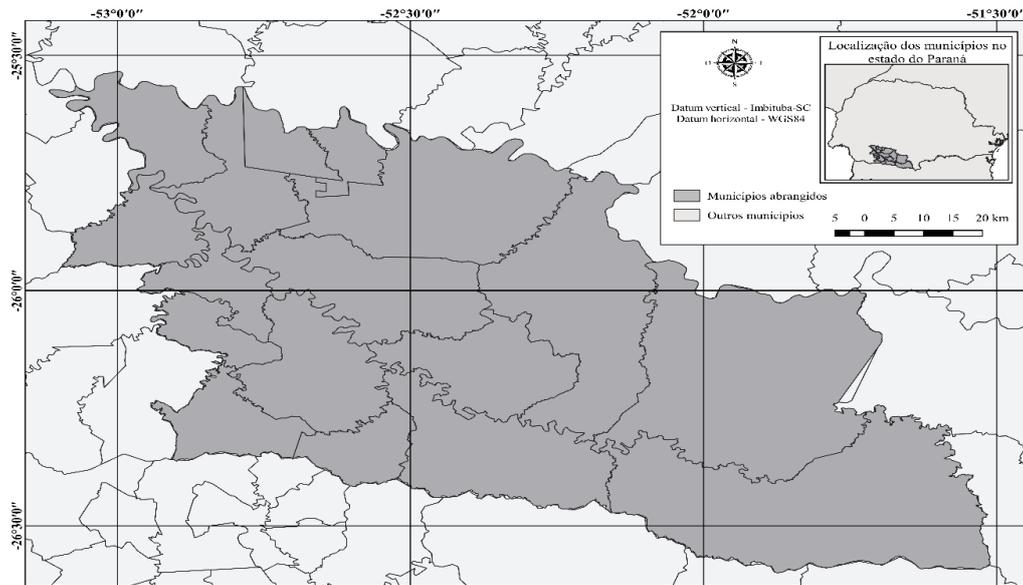
Fonte: Elaborada pela autora

### 3.2.2 Caracterização da área de estudo

A região sudoeste do Paraná está localizada na região Sul do Brasil pertence a formação litológica Serra Geral e bacia hidrográfica Iguaçu, apresenta boa disponibilidade hídrica.

A área foi delimitada aos municípios que pertencem a regional de Pato Branco divisão esta proposta pela empresa de Saneamento. A Figura 2 mostra a área delimitada.

**Figura 2 - Mapa da área do estudo**



**Fonte: QGIS**

Os poços selecionados possuem baixas vazões em média 15,3 m<sup>3</sup>/h, apresentam profundidade média de 181 metros, e a maioria estão localizados em áreas urbanas, conforme a Tabela 2 que apresenta características dos poços selecionados para o estudo. Para o estudo foram selecionados doze poços que possuíam as informações individualizadas e necessárias para a pesquisa.

**Tabela 02 – Características dos poços**

POÇOS	MUNICÍPIO	LOCALIZAÇÃO	PROFUNDIDADE	VAZÃO CAPTADA
P01	S. PROGRESSO (VERÊ)	RURAL	85	6,2
P02	VERÊ	URBANA	237	6,8
P03	PRES. KENNEDY(VERÊ)	RURAL	300	6,1
P04	VITORINO	URBANA	350	11,0
P05	A. PARK 01 (VITORINO)	URBANA	137	6,0
P06	A. PARK 02 (VITORINO)	URBANA	234	2,8
P07	CEL. DOMINGOS SOARES	URBANA	100	26,0
P08	HONÓRIO SERPA	URBANA	100	21,0
P09	PINHO FLECK (H. SERPA)	URBANA	90	3,4
P10	COVÓ (MANGUEIRINHA)	URBANA	114	23,0
P11	SÃO JORGE D'OESTE	RURAL	150	42,0
P12	CLEVELÂNDIA	URBANA	280	29,0

**Fonte: Dados da Companhia de Saneamento do Paraná**

Os volumes totais explorados de águas subterrâneas na região durante o ano de 2017 foram de 2.859.427 m<sup>3</sup> de água totalizando 19,85 % do volume captado para abastecimento. A Tabela 3 mostra os volumes captados em cada mês.

**Tabela 3 - Volumes captados**

<b>MESES</b>	<b>VOLUMES (M<sup>3</sup>)</b>
JAN	250777
FEV	230427
MAR	256985
ABR	233191
MAI	233219
JUN	235768
JUL	237607
AGO	230462
SET	225236
OUT	228730
NOV	238059
DEZ	258966
<b>TOTAL</b>	<b>2859427</b>

**Fonte: Dados da Companhia de Saneamento do Paraná**

### 3.2.3 Avaliação dos sistemas produtivos de águas

Nesta etapa consiste na avaliação dos aspectos dos sistemas produtivos de água quanto alguns interferentes nestes sistemas de abastecimento de água que podem prejudicar a produção de água ou até mesmo a perda dessas fontes. Portanto foram realizadas as seguintes avaliações:

- I. Quais os interferentes na perda de sistemas produtivos
- II. Vazão de exploração dos poços
- III. Caracterização da qualidade da água
- IV. A análise de variação temporal da concentração de nitrato

As propriedades físicas, químicas e biológicas da água são utilizadas como parâmetros para verificar se estão próprias para o consumo humano. As características das águas subterrâneas refletem os meios percorridos, adquirindo

propriedades devido ao contato com as rochas, ou com produtos das atividades antropogênicas no decorrer do percurso.

Para a avaliação da qualidade das águas subterrâneas foram delimitados, alguns parâmetros de análise, exigidos pela Portaria de Consolidação nº 5/2017 do MS, para qualidade da água para consumo humano, foram definidos os seguintes parâmetros: nitrato, cloreto, potencial Hidrogeniônico (pH), sólidos totais dissolvidos (STD), turbidez, coliformes totais e *Escherichia coli*.

#### 3.2.4 Definição das alternativas

As alternativas selecionadas para este estudo são os doze poços caracterizados por terem as informações individualizadas dos parâmetros analisados. Serão identificados como: A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A11 e A12.

#### 3.2.5 Definição dos critérios

Os critérios podem ser considerados como eixos que direcionam a avaliação do decisor permitindo a realização de comparações entre as alternativas, é a representação do objetivo.

Os critérios de avaliação podem ser classificados em:

- Atributos diretos ou critérios de benefício: quanto maior o valor, melhor.
- Atributos indiretos os critérios de custo: no critério de custo vale o inverso, quanto menor melhor.

A justificativa para a escolha de determinados critérios para análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas foi realizada com base na literatura e através das análises dos parâmetros de qualidade dos poços. Foram selecionados os parâmetros específicos com base na sua relevância, disponibilidade de dados e que tiveram alterações identificadas em análises.

Neste estudo os critérios C1, C2, C4 e C5 são de custo e o critério C3 é de benefício.

C1 - Índice GOD: método desenvolvido por Foster e Hirata (1988), leva em consideração a avaliação de três parâmetros: o Tipo de aquífero (G), Litologia (O) e profundidade da água (D). É representado pela multiplicação dos parâmetros: índice

$GOD=G \cdot O \cdot D$ . Para este estudo foi realizado o cálculo do índice GOD para os poços e utilizado como um critério para a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas.

C2 - Concentração de Nitrato: é um dos poluentes que mais afeta os aquíferos em todo o mundo, podendo ser proveniente de fontes pontuais e/ou as fontes difusas. Possui duas características principais que o tornam um excelente indicador ambiental da vulnerabilidade das águas subterrâneas que é a alta mobilidade e persistência (ARAUZO; MARTÍNEZ-BASTIDA, 2015).

C3 - Potencial Hidrogeônico (pH): consiste num índice que indica a acidez, neutralidade ou alcalinidade da água, determinado pela concentração de íons de Hidrogênio (H<sup>+</sup>). Os valores de pH variam de 0 a 14. O pH de uma substância pode variar dependendo da composição, concentração de sais, metais, ácidos, bases, substâncias orgânicas e temperatura. Por influenciar em diversos equilíbrios químicos, o pH é um parâmetro importante em muitos estudos no campo do saneamento ambiental, pois, através dessa análise podemos verificar a qualidade da água e quais os tipos de efluentes lançados (CETESB, 2006).

C4 - Sólidos totais dissolvidos (STD): a entrada de sólidos na água pode ocorrer de forma natural (processos erosivos) ou antropogênica (lançamento de efluentes).

C5 - Coliformes totais (CT): o grupo Coliforme é dividido em coliformes totais e coliformes termotolerantes, ambos são os indicadores de contaminação mais utilizados para monitorar a qualidade sanitária da água, atuam como indicadores de lançamentos de efluentes. A Portaria de consolidação nº 5 do MS determina ausência em amostras de água potável de microrganismos coliformes totais e termotolerantes.

Os critérios selecionados abrangem parâmetros de avaliação da vulnerabilidade intrínseca e específica, resultando em um índice amplo de verificação das águas subterrâneas através de informações dos poços.

### 3.2.6 Definição da importância dos critérios

Para definição da importância dos critérios, foi utilizado o método AHP (SAATY, 1977) onde as matrizes de comparação são traduzidas de uma linguagem verbal para a numérica, adaptadas da Escala de Saaty, conforme Tabela 4:

**Tabela 4 - Escala de Saaty adaptada**

<b>ESCALA DE SAATY ADAPTADA</b>	
<b>Valor</b>	<b>Definição</b>
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: Adaptada Saaty, 1977.**

Neste estudo para avaliar a importância dos critérios foram selecionados três especialistas, aplicou-se o questionário para comparação pareada dos critérios envolvidos obtendo-se a matriz de comparações. O procedimento de cálculo foi realizado com a utilização do método de Normalização Aditiva (SRDJEVIC, 2005).

Após a determinação do vetor de prioridades, avaliou-se o Índice de Consistência e o procedimento utilizado foi o índice de consistência Harmônica proposto por (STEIN; MIZZI, 2007). Onde se considera os valores da Razão de consistência para matriz de ordem cinco o valor máximo de 0,10. O cálculo para a análise de consistência deste estudo segue em anexo no Apêndice B. Os pesos dos três especialistas foram definidos por meio da média geométrica normalizada.

### 3.2.7 Normalização da matriz

Nesta etapa foi realizada a normalização da matriz de decisão para aplicação do método de ordenação dos poços quanto a sua vulnerabilidade. Para cada critério foi utilizado a normalização necessária, sendo que para normalização dos critérios nitrato e sólidos totais dissolvidos foi utilizado a Norma 9 e para o critério pH utilizou-se a Norma 30, conforme técnicas de normalizações propostas por (JAHAN; EDWARDS, 2015). Segue as normalizações aplicadas para os critérios na Tabela 5.

Tabela 5 - Normalização dos critérios

CRITÉRIO	ESCALA ORIGINAL	ESCALA DE AVALIAÇÃO	
Nitrato (Minimizar)	Máximo: 10 mg/L	Norma 9	$v_j = \frac{v_j}{10 \text{ mg/L}}$
PH (Maximizar)	Entre 6 e 9,5	Norma 30	$1 - \frac{ x_{ij} - T_j }{\text{Max}\{x_{ij}^{\text{max}}, T_j\} - \text{Min}\{x_{ij}^{\text{min}}, T_j\}}$
STD (Minimizar)	Máximo 1000 mg/L	Norma 9	$v_j = \frac{v_j}{1000 \text{ mg/L}}$
Coliformes totais	Ausência em 100 ml	Presença Ausência	= 1,0 = 0

Fonte: Elaborada pela autora com as informações de Normas de Jahan; Edwards (2015).

### 3.2.8 Método Topsis

Este método é caracterizado por sua facilidade na utilização e robustez de resultados, e tem sido muito utilizado de forma individual ou conjunta com outros métodos. A construção da matriz de decisão  $m \times n$ , onde “m” são as alternativas e “n” os critérios de avaliação, é possível iniciar a aplicação das etapas sugeridas pela metodologia sendo descrita pelas seguintes etapas:

- 1ª etapa – Cálculo da matriz normalizada:  $X_{ij} = \frac{x_{ij}}{(\sum_{i=1}^m x_{ij}^2)^{\frac{1}{2}}}$
- 2ª etapa – normalização ponderada da matriz  $v_{ij} = w_j \cdot x'_{ij}$
- 3ª etapa – identificar as Soluções positivas ( $A^+$ ) e negativas ( $A^-$ ) ideais.  
 $A^+ = \{\max_j n_{ij} | j = 1, 2, \dots, m\} = \{n_1^+, \dots, n_j^+, \dots, n_m^+\}$   
 $A^- = \{\min_j n_{ij} | j = 1, 2, \dots, m\} = \{n_1^-, \dots, n_j^-, \dots, n_m^-\}$
- 4ª etapa a Distâncias positiva e negativa ideal  $d^+$  e  $d^-$   
 $S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2}$  e  $S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}$
- 5ª etapa – coeficiente de proximidade ideal  $C_i^* = S_i^- / (S_i^* + S_i^-)$
- Ranking das alternativas.

Portanto nesse estudo aplicou-se a metodologia TOPSIS para avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas, utilizando-se a inversão do ranking, pois o método seleciona a melhor alternativa, e com este estudo deseja-se buscar as piores alternativas, ou seja, as mais vulneráveis, assim utilizou-se o ranking inverso.

### 3.2.9 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade propõe examinar quão robusta é a ordenação das alternativas ou a escolha de uma alternativa em relação mudanças nos pesos dos critérios. Para conhecer a robustez dos resultados obtidos foi realizada a análise de sensibilidade com os critérios em relação a alternativa. Foi exposto através de gráfico como a alternativa mais vulnerável e as menos vulneráveis se comportam a partir da mudança dos valores dos pesos dos critérios, se a partir das mudanças dos pesos ocorre a mudança do *ranking*.

## 4 APLICAÇÃO DO MÉTODO

Nesta seção demonstra os procedimentos e a aplicação do modelo para avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas.

### 4.1 DESENVOLVIMENTO DA MATRIZ DE AVALIAÇÃO

Com a definição do problema de ordenação das áreas mais vulneráveis através do método TOPSIS, foram selecionadas as doze alternativas e os cinco critérios de avaliação. O desenvolvimento da matriz foi realizado a partir dos resultados das amostras analisadas de cada poço referentes ao ano de 2017.

Com relação aos critérios analisados os valores do índice GOD variaram entre 0,252 a 0,420; as concentrações de nitrato variaram de 0,0 a 5,07 mg/L; pH foram obtidos valores de 5,9 a 9,5; sólidos totais dissolvidos apresentaram resultados entre 98,5 e 194,5 mg/L; e coliformes totais apresentaram alguns resultados positivos.

Com as informações iniciais dos critérios de cada poço foi gerada a matriz de avaliação, onde foi realizada a normalização dos critérios conforme descrito para cada critério, conforme a Tabela 6 apresenta os criterios normalizados para a aplicação do método TOPSIS.

**Tabela 6 - Critérios normalizados**

Alternativas	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0,336	0,190	0,914	0,130	1,000
A2	0,294	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	0,294	0,273	0,886	0,143	0,000
A6	0,294	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: Elaborada pela autora

## 4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA PONDERAÇÃO DOS CRITÉRIOS

Para obter a importância de cada critério foi realizada com o auxílio dos especialistas através de comparação pareada de cada critério, onde foram definidas as ponderações com o auxílio do método AHP, assim obtendo-se os pesos. A seguir as avaliações individuais de cada decisor, conforme as matrizes com as pontuações dos decisores e os pesos individualizados.

<i>DECISOR 01</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>	<i>PESOS</i>
<i>C1</i>	1	0,25	3	4	0,25	0,159
<i>C2</i>	4	1	5	4	2	0,406
<i>C3</i>	0,33	0,2	1	0,33	0,25	0,056
<i>C4</i>	0,25	0,25	3	1	0,33	0,099
<i>C5</i>	4	0,5	4	3	1	0,280
<i>SOMA</i>	9,58	2,2	16	12,33	3,83	1

<i>DECISOR 02</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>	<i>PESOS</i>
<i>C1</i>	1	0,2	0,33	0,5	0,25	0,064
<i>C2</i>	5	1	3	3	1	0,3363
<i>C3</i>	3	0,33	1	2	1	0,198
<i>C4</i>	2	0,33	0,5	1	0,5	0,117
<i>C5</i>	4	1	1	2	1	0,258
<i>SOMA</i>	15	2,87	5,83	8,5	3,75	1

<i>DECISOR 03</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>	<i>PESOS</i>
<i>C1</i>	1	0,33	0,33	0,33	0,25	0,068
<i>C2</i>	3	1	4	4	1	0,334
<i>C3</i>	3	0,25	1	0,33	0,25	0,102
<i>C4</i>	3	0,25	3	1	0,25	0,148
<i>C5</i>	4	1	4	4	1	0,348
<i>SOMA</i>	14	2,83	12,33	9,67	2,75	1

Com os resultados dos decisores e aplicação do método AHP, definiu-se os respectivos pesos dos critérios, obtendo o peso final de cada critério através de média geométrica e a normalização dos valores. Onde a razão de consistência resultou em:  $D1= 0,053$ ;  $D2=0,041$  e  $D3= 0,039$ , sendo o índice menor que 0,10 conforme a método estipula, para que seja dada sequência na aplicação.

Ao ser analisado a escolha dos decisores o critério que se sobressaiu foi o nitrato (C2) com a maior pontuação, na sequência foram os critérios: bacteriológico (coliformes totais) (C5), STD (C4), pH (C3) e o que menos pontou foi o critério GOD (C1). A seguir as respectivas pontuações dos critérios na Tabela 7.

**Tabela 7 - Pesos dos critérios**

<b>PESOS DOS CRITÉRIOS</b>	
<b>C1</b>	0,091
<b>C2</b>	0,377
<b>C3</b>	0,107
<b>C4</b>	0,123
<b>C5</b>	0,301

**Fonte: Elaborada pela autora**

#### 4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO TOPSIS

Com todas as informações disponíveis aplicou-se o método TOPSIS para a obtenção da ordenação das alternativas, utilizando-se o *ranking* invertido. As informações da aplicação estão contidas no Apêndice B.

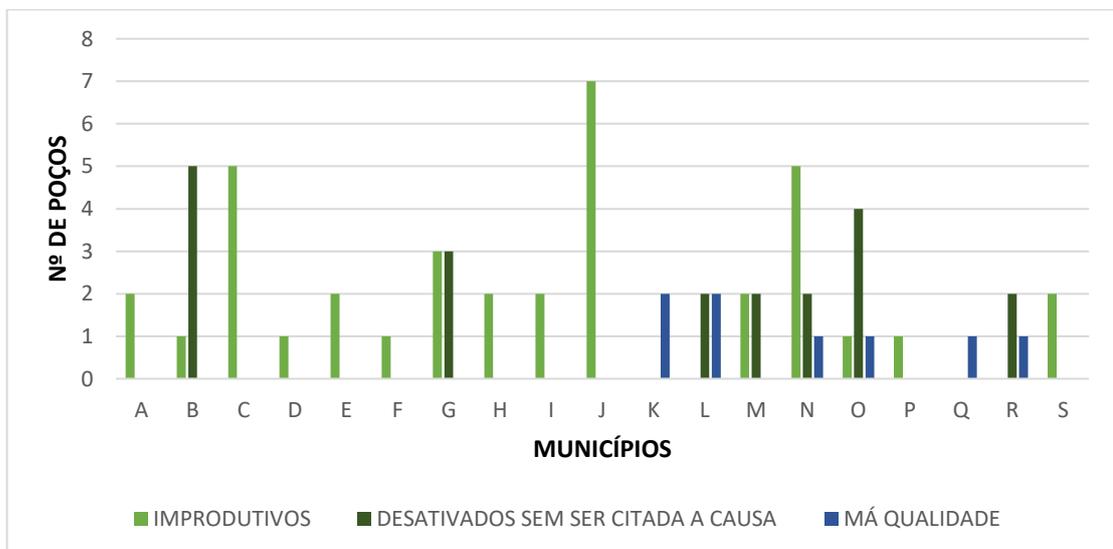
## 5 RESULTADOS

### 5.1 PERDAS DE SISTEMAS PRODUTIVOS

A gestão e a proteção das águas subterrâneas têm se tornado um assunto comum entre os pesquisadores e gestores em que se referem ao estresse ou situações de conflitos pela água. A proteção das águas subterrâneas envolve a definição dos volumes explotáveis sem colocar em risco as reservas e a sua qualidade. Explotar volumes superiores às recargas naturais decorrentes das infiltrações da água de chuva, usualmente não é recomendado, por ser esta a forma natural de reposição das reservas das águas subterrâneas.

A avaliação dos problemas encontrados nos sistemas produtivos da região, segundo dados fornecidos pela empresa de saneamento da região de estudo, houve a ocorrência de 65 poços desativados por problemas que ocorreram como improdutividade, má qualidade e outros problemas sem ser citada a causa num período aproximado de 20 anos, conforme segue Figura 3, mostrando a quantidade de poços desativados e seus respectivos problemas acima citados em dezenove municípios ou distritos.

**Figura 3 - Poços desativados municípios da região**



Fonte: Dados da Companhia de Saneamento do Paraná

Considera-se um número significativo de poços desativados na região, sendo 56,9% por improdutividade, 12,3% por problema de má qualidade e 30,8 % foram desativados por problemas que não foram citadas as causas, mas que envolvem problemas de má qualidade, baixa vazão e problemas de manutenção.

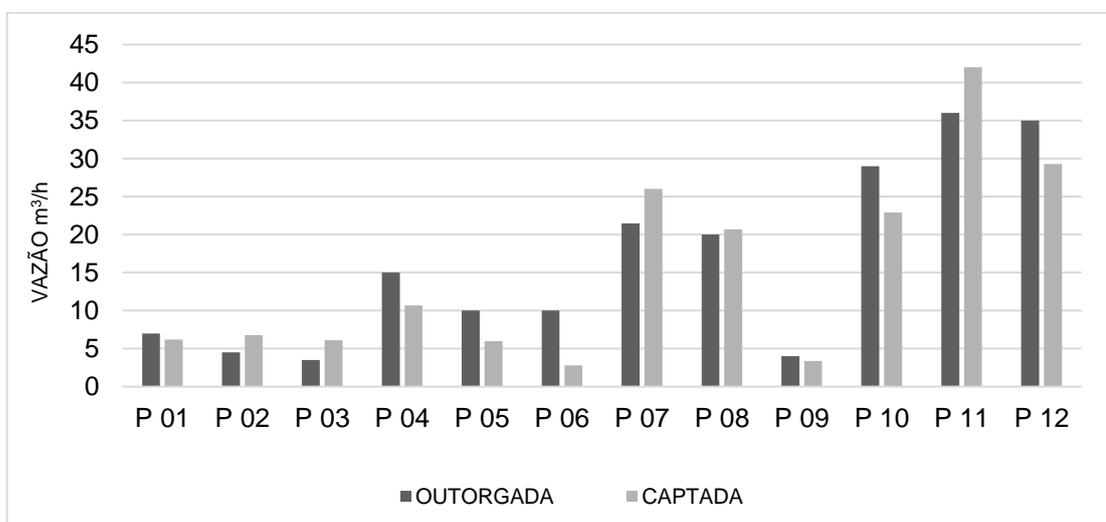
Portanto, devido ao alto custo para perfuração de poços, essas perdas são bastante significativas, comparados aos vinte e um poços em operação, para manter o abastecimento dos sistemas dependentes desse recurso, o problema dessa região é amplo quanto a perda de sistemas produtivos de água.

## 5.2 AVALIAÇÃO DA SUPEREXPLOTAÇÃO

A superexploração é um dos problemas mais sérios que ocorre nos sistemas produtivos de água, o rebaixamento do lençol freático pode ocorrer pelo intenso bombeamento de água subterrânea, desfazendo o equilíbrio extração/recarga

Portanto, para evidenciar esse aspecto foi realizada a avaliação de doze poços, comparando a vazão de outorga e a vazão captada com dados referentes ao mês de outubro de 2017, sendo cinco poços em que a água captada foi realizada acima do permitido, ou seja, acima da vazão outorgada, sendo que as vazões variam mensalmente dependendo do consumo do sistema de abastecimento e do clima. Segue os dados das vazões conforme Figura 4.

**Figura 4 - Comparação da vazão outorgada e captada**



**Fonte: Dados da Companhia de saneamento do Paraná**

Observa-se com a avaliação dos dados, que aproximadamente 42% dos poços estão sendo superexplorados, o que pode comprometer as captações quanto aos problemas de rebaixamento no nível ou perda desses sistemas de abastecimento, gerando ainda mais prejuízos.

Assim, é imprescindível que a locação de poços seja feita buscando a existência de descontinuidades geológicas, bem como de estudos que estabeleçam o balanço hídrico, para obtenção da recarga, portanto somente com a determinação dessas informações é possível estabelecer as vazões exploráveis por meio de poços em determinado mês do ano.

### 5.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE

Para avaliar a qualidade da água dos sistemas produtivos neste estudo, foram realizadas coletas de amostras de água e analisados os parâmetros descritos conforme metodologia para cada parâmetro. Os resultados dos parâmetros analisados são apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8 - Parâmetros de qualidade**

POÇO	PROF.	NITRATO	CLORETO	STD	PH	TUR	C. TOTAIS	E. COLI
P 01	84,7	2,50	5,0	130	6,7	0,3	Presença	Ausência
P 02	237,5	0,15	5,0	185	9,5	0,29	Ausência	Ausência
P 03	300	1,90	5,0	149	9,4	0,26	Ausência	Ausência
P 04	350	5,05	7,0	76	5,9	0,25	Presença	Ausência
P 05	138	2,73	5,0	132	7,4	0,23	Ausência	Ausência
P 06	234	5,07	8,0	167	7,5	0,2	Presença	Ausência
P 07	100	0,53	5,0	101	6,7	0,3	Ausência	Ausência
P 08	100	3,90	5,0	115	6,2	0,3	Presença	Ausência
P 09	90	0,50	5,0	121	6,7	0,3	Presença	Ausência
P 10	114	0,45	5,0	109	8,4	0,25	Ausência	Ausência
P 11	150	0,10	11,0	200	7,9	0,6	Presença	Ausência
P 12	280	3,26	6,0	125	7,8	0,25	Presença	Ausência
Port. nº 5/2017		10 mg/L	250 mg/L	1000 mg/L	6,0 - 9,5	5 UT	Ausência	Ausência

**Fonte: Dados da Companhia de saneamento do Paraná**

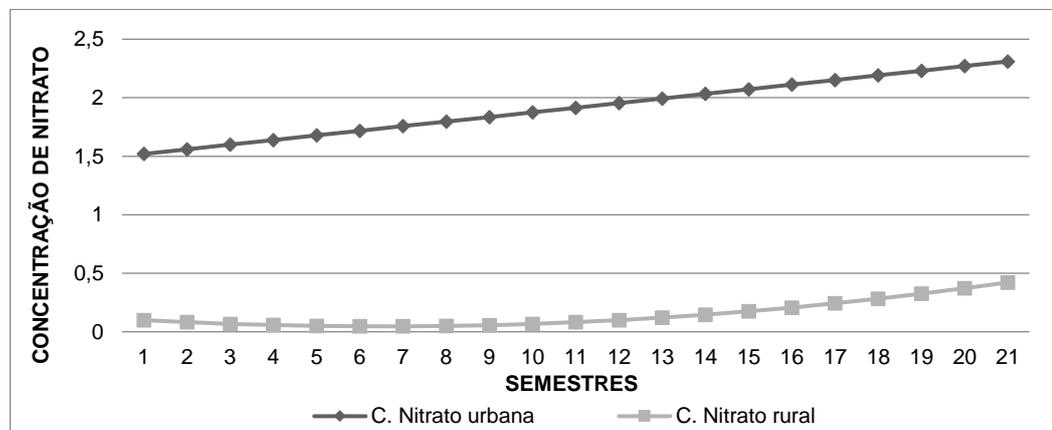
O resultado demonstra o impacto das atividades antropogênicas nas águas subterrâneas. Observa-se através dos resultados das análises que os poços estão sendo impactados pelo uso do solo e atividades antropogênicas realizadas na superfície.

O parâmetro evidenciado com maior alteração foi o nitrato em alguns poços, e que mesmo para poços mais profundos, acima de 200m, apresentaram índice acima de 5,0 mg/L, sendo considerado um valor de alerta. Para o parâmetro Coliformes totais alguns poços apresentaram valores positivos.

#### 5.4 ANÁLISES DE TENDÊNCIA

Conforme os resultados obtidos das concentrações de nitrato nas amostras dos poços, foi realizada a análise temporal da concentração de nitrato destes poços com informações referentes ao ano de 2007 até o ano de 2017, conforme a Figura 5.

**Figura 5 - Concentração média de nitrato na área urbana e rural (2007 a 2017)**



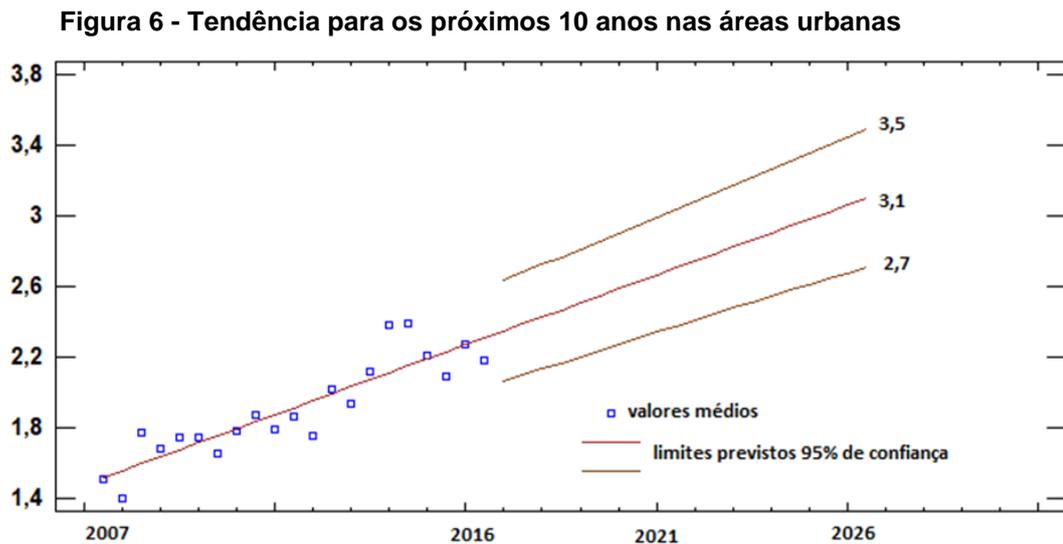
Fonte: Dados da Companhia de saneamento do Paraná

Conforme analisado na figura 5 houve aumento da concentração média do nitrato dos poços localizados nas áreas urbanas, bem como nas áreas rurais. Na área rural observa-se o aumento na concentração a partir do 10º semestre, ou seja, a partir de 2012 as concentrações estão aumentando nos poços.

Para verificar a tendência para os próximos dez anos, se esta situação permanecer e for tomado nenhuma medida de proteção e controle da degradação, aplicando-se para as áreas urbanas, ajustado pelos últimos 10 anos a tendência

linear. Equação (1): Concentração Nitrato =  $(1,47982) + (0,0395357t)$  onde “t” representa períodos de seis meses (semestre).

Este modelo pode prever os valores futuros de concentração de nitrato nas áreas urbanas. Os dados abrangem 20 semestres, com modelo de tendência linear, conforme Figura 6.



Fonte: Dados da Companhia de saneamento do Paraná

O modelo linear para as áreas urbanas mostra claramente a degradação desses poços, conforme avaliado existe a tendência positiva para aumento da concentração de nitrato para os próximos 10 anos, nas áreas urbanas onde a média tende a 3,1mg/L, podendo chegar a 3,5 mg/L. Como se trata da concentração média pode-se deduzir que parte dos poços estarão muito próximo do limite de alerta (5 mg/L) ou até mesmo comprometidos com valores próximos ao limite aceitável que é 10 mg/L de N-NO<sub>3</sub>.

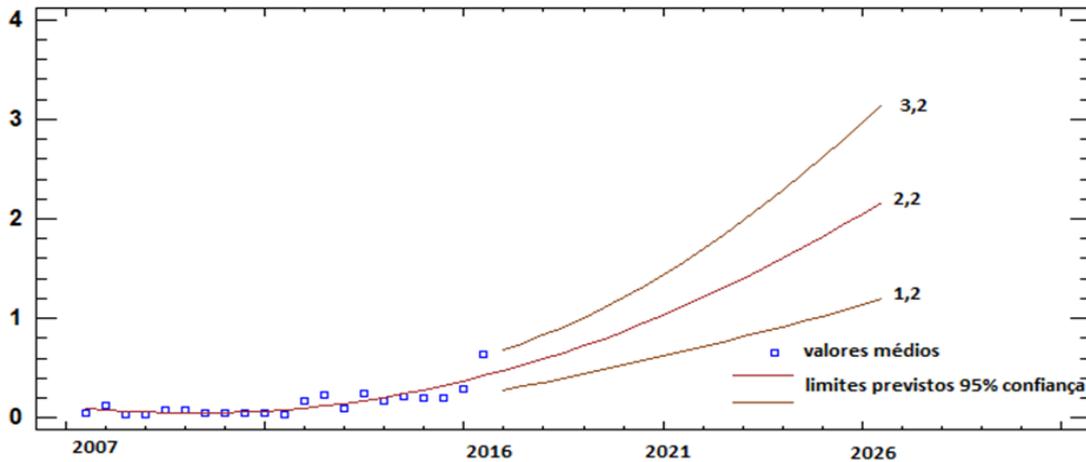
Para os valores de concentração de nitrato dos poços situados nas áreas rurais, o modelo selecionado foi tendência quadrática. Equação (2):

Concentração de Nitrato =  $(0,121439) + (-0,0233128 t) + (-0,0017895t^2)$  onde “t” também representa períodos de seis meses (semestre).

A melhor previsão de dados futuros nesse caso é dada pela regressão quadrática ajustada a todos os dados anteriores e para os próximos 10 anos. Para as áreas rurais, embora em melhor situação, presume-se um aumento significativo conforme observado, com valores próximos a 2,2 mg/L, podendo chegar a 3,2 mg/L,

conforme a Figura 7. Logo, os poços localizados nas áreas rurais também poderão estar próximos ao limite de alerta que é 5mg/L.

**Figura 7 - Tendência para os próximos 10 anos nas áreas rurais**



Fonte: Dados da Companhia de saneamento do Paraná

## 5.5 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE

Para a avaliação da vulnerabilidade através do método Topsis foi gerando um ranking de alternativas, através do ranking inverso do método aplicado conforme citado anteriormente. Segue a ordenação de alternativas na tabela 9.

**Tabela 9 - Ranking das alternativas**

Alternativas	Ordenação dos mais vulneráveis
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: Elaborada pela autora

De acordo com a ordenação foi possível verificar que a alternativa A6 é que se apresenta mais vulnerável de acordo com os critérios estabelecidos neste estudo e a alternativa A7 é a menos vulnerável.

As alternativas A6 e A4 com os piores desempenhos entre as mais vulneráveis são poços situados em meio urbano, não próximos um do outro, mas pertencente à mesma localidade. Os poços A8 e A12 também situados em meio urbano, com residências próximas e pertencentes a dois municípios próximos.

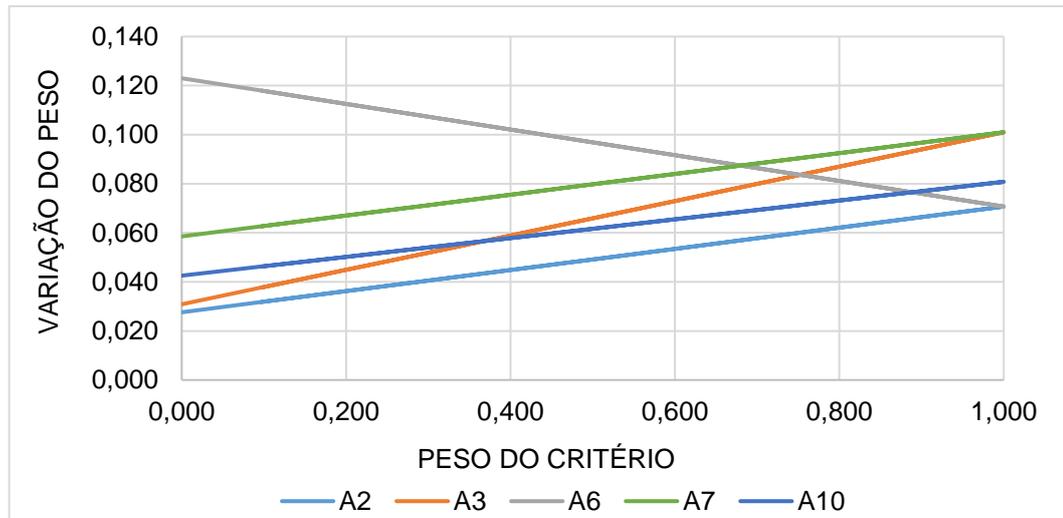
Assim observasse que as alternativas mais vulneráveis estão localizadas em áreas urbanas, podendo-se inferir que há a influência das atividades antropogênicas na degradação da qualidade das águas subterrâneas, principalmente das fontes de poluentes originárias das fossas negras ou esgotamento subterrâneo sem tratamento.

## 5.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade revela a importância dos pesos atribuídos às metas da solução, mesmo não ocorrendo mudanças significativas neste estudo, quando se altera os pesos, isso mostra que o modelo é eficiente.

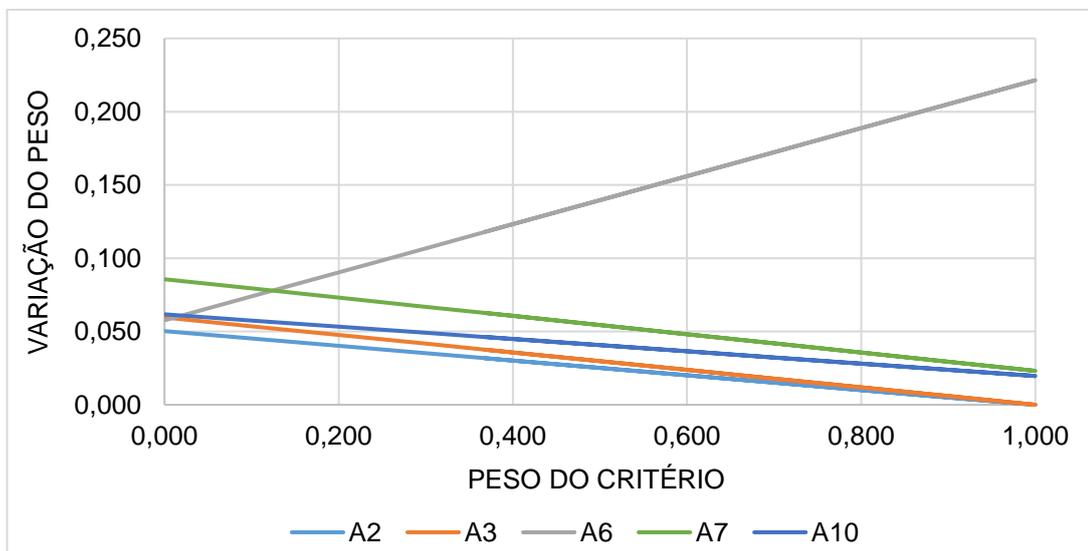
Para conhecer a eficiência dos resultados obtidos foi realizada a análise de sensibilidade com os critérios em relação à alternativa vencedora A6 com as menos vulneráveis que são as alternativas A2, A3, A7 e A10.

A análise de sensibilidade para o critério GOD, da alternativa A6 em relação as alternativa menos vulneráveis, permanece como a mais vulnerável até o peso aproximado de 0,7 a partir desse valor quem assume a posição de mais vulnerável é a alternativa A7, conforme mostrado na Figura 8.

**Figura 8 - Análise de sensibilidade critério GOD**

Fonte: Elaborada pela autora

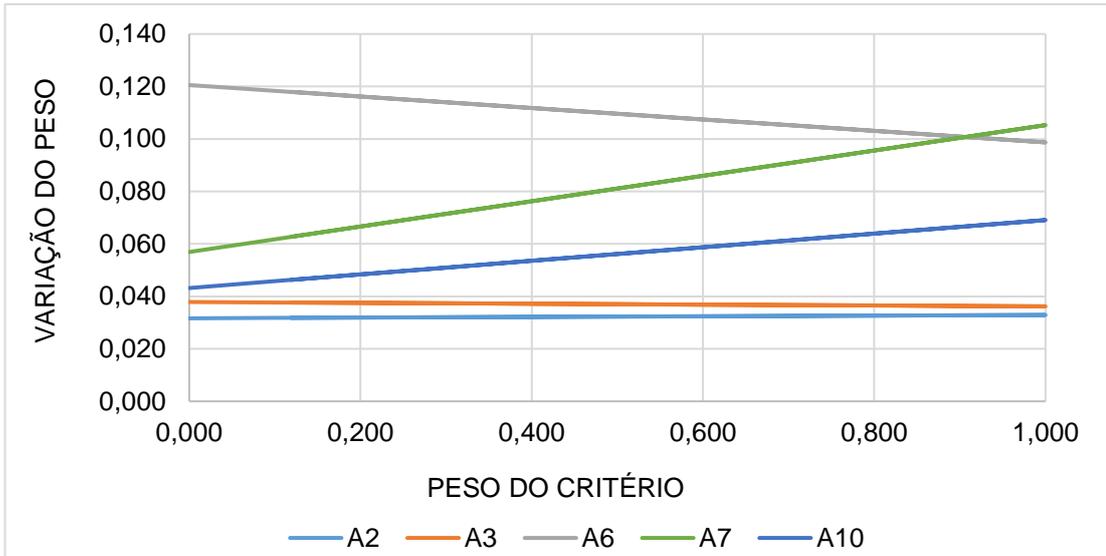
Para o critério Nitrato conforme mostrado na Figura 9, a alternativa A6 assume como a mais vulnerável a partir do peso 0,1 e as demais permanecem como menos vulneráveis.

**Figura 9 - Análise de sensibilidade critério Nitrato**

Fonte: Elaborada pela autora

Para a análise de sensibilidade do critério pH, a alternativa A6 é considerada a mais vulnerável até o peso aproximado de 0,9 quando a alternativa A7 passa a ser a mais vulnerável, conforme Figura 10.

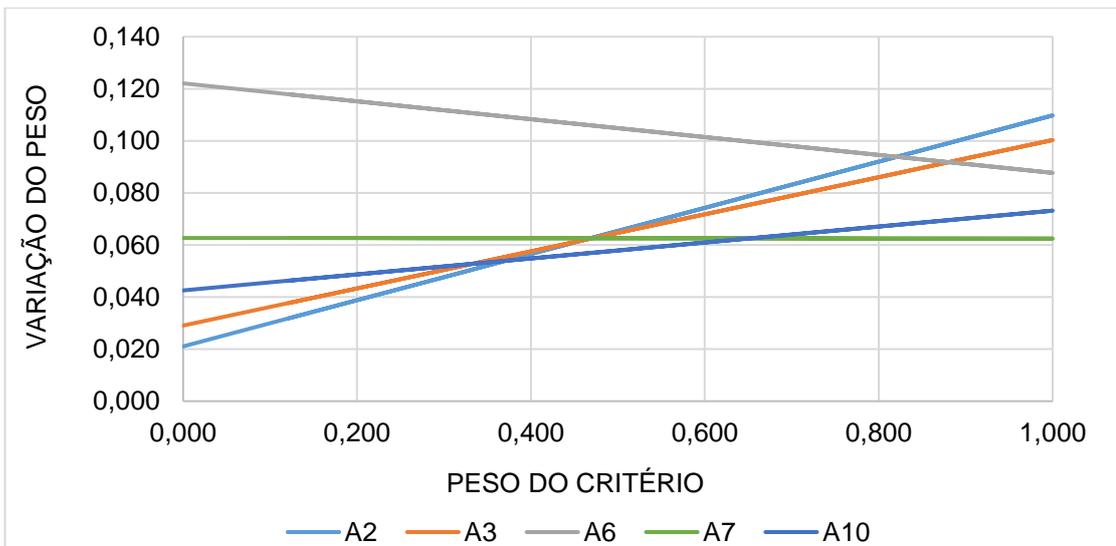
**Figura 10 - Análise de sensibilidade critério pH**



Fonte: Elaborada pela autora

Para os sólidos totais a alternativa A6 assume a posição de mais vulnerável até o valor do peso do critério aproximado de 0,82 a partir desse valor assume a posição a alternativa A2, conforme mostrado na Figura 11.

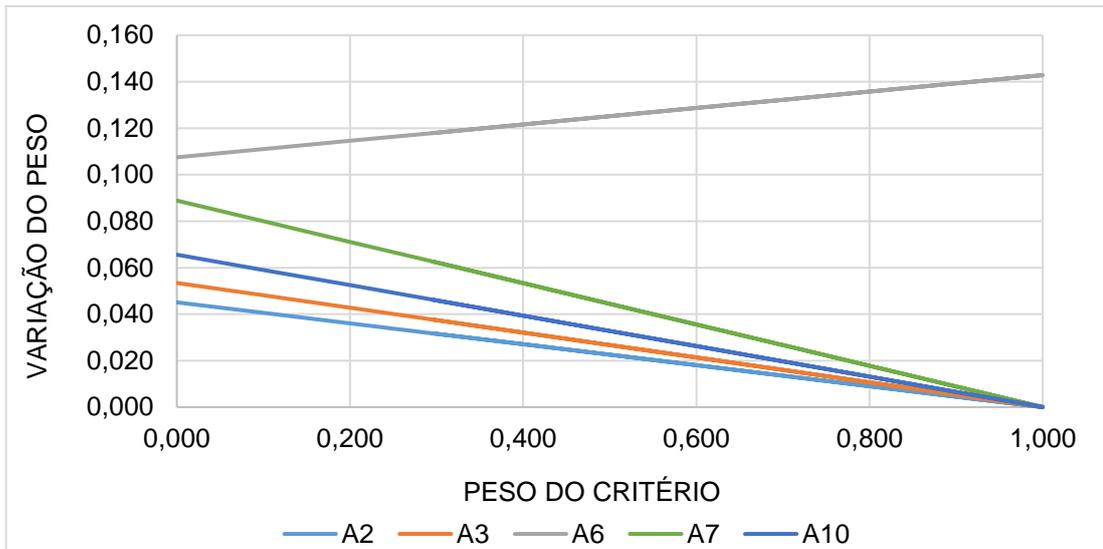
**Figura 11 - Análise de sensibilidade critério STD**



Fonte: Elaborada pela autora

E assim para os Coliformes totais a alternativa A6 se mantém como mais vulnerável em relação às demais não importando o peso, conforme a Figura 12.

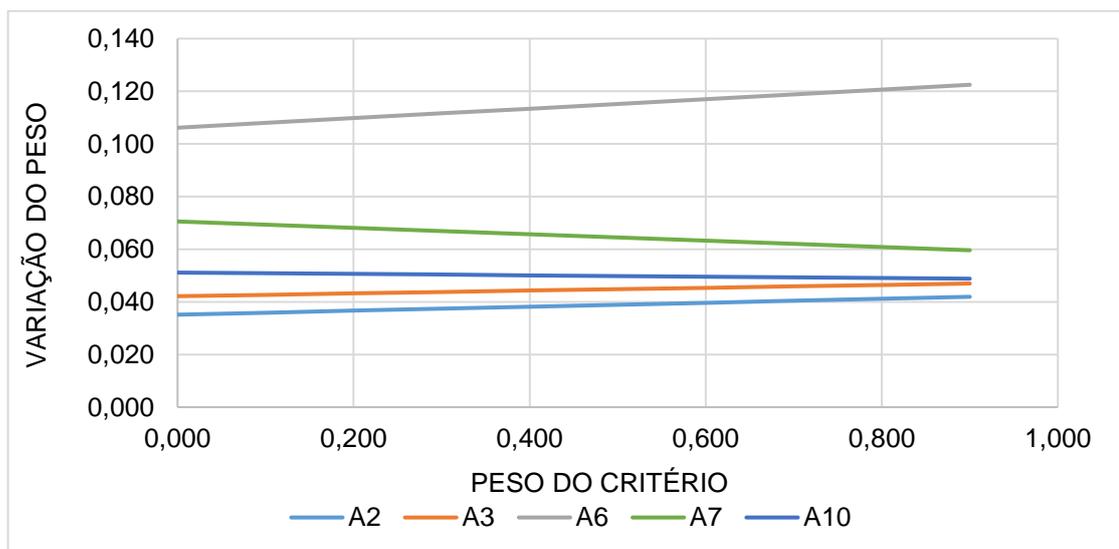
**Figura 12 - Análise de sensibilidade critério coliformes totais**



Fonte: Elaborada pela autora

A análise de sensibilidade foi realizada para testar a estabilidade do ranking de prioridades, revelando a influência dos pesos atribuídos aos objetivos da solução. Com relação à análise de sensibilidade global conforme mostrado na Figura 13, pode-se verificar que não importa o valor atribuído, a alternativa A6 é a mais vulnerável em relação as demais alternativas avaliadas.

**Figura 13 - Análise de sensibilidade critério global**



Fonte: Elaborada pela autora

## 6 CONSIDERAÇÕES

### 6.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A AVALIAÇÃO DOS POÇOS

Os dados de todos os tratamentos estatísticos desenvolvidos indicam que os resultados de nitrato estão abaixo do limite de potabilidade vigente na Portaria de Consolidação nº 5 do MS, mas existe uma tendência de aumento com o decorrer do tempo nas concentrações desse poluente, e isso é preocupante. Esse aumento de nitrato deve ter uma correspondência direta com o aumento da densidade populacional associado à ausência de um sistema de saneamento apropriado.

Os poços que apresentaram maior alteração no parâmetro nitrato estão localizados em meio urbano, assim pode-se inferir que estão sendo impactados ou contaminados por fontes de fossas negras, pois esses sistemas não possuem esgotamento sanitário.

Em se tratando de recursos hídricos, o período futuro de 10 anos pode ser considerado curto, cabendo aos gestores identificar as áreas de risco como as áreas de recargas, e promover a preservação dessas áreas para evitar o comprometimento da qualidade, e prejuízos futuros, devido à contaminação ou necessitar de altos investimentos para torná-las potáveis.

Outro ponto a ser enfatizado são os resultados de nitrato, para os sistemas produtivos P4 e P6 que apresentaram índices acima 5,0 indicando que estão sofrendo degradação de sua qualidade por atividades antropogênicas. O poço P6 apresenta uma profundidade de 234 m e o P4 com 350m são os que mais estão sendo impactados. Neste sentido captações mais profundas não são fontes seguras de água de qualidade como se acredita que sejam. A qualidade depende de vários fatores principalmente da recarga do aquífero. Sendo assim, se a superfície está contaminada poderá ocorrer à percolação desses contaminantes até o subsolo, e provocar a contaminação da água. Uma avaliação mais completa de identificação das fontes de poluentes seria importante para tomada de ações para preservação das águas subterrâneas.

Dessa forma, se justifica a importância da avaliação e proteção preventiva das reservas de águas, pois com os resultados facilita o desenvolvimento de ações de prevenção, evitando a degradação ou a possível perda desses sistemas produtivos.

A vulnerabilidade das águas subterrâneas, sob a perspectiva do apoio multicritério à tomada de decisão, propondo um modelo de avaliação que resultou na ordenação dos poços que estão mais vulneráveis nos aspectos intrínsecos e específicos. A aplicação dos métodos AHP e TOPSIS resultou numa ordenação de alternativas, sendo a A6 a mais vulnerável e a A7 menos vulnerável, e as demais conforme a ordenação apresentada.

O mais importante da avaliação da vulnerabilidade à poluição é propor uma ferramenta para identificar onde as medidas de proteção prioritárias são mais necessárias em face de uma ameaça de poluição das águas subterrâneas, facilitando aos gestores à tomada de decisão mais rápida e eficiente para o controle da degradação.

Com a avaliação dos sistemas produtivos através dos parâmetros comparada a avaliação da vulnerabilidade mostra coerência, pois os poços que estão apresentando maior alteração dos parâmetros são os que se apresentam mais vulneráveis por meio do método de multicritério. Portanto se for realizado o acompanhamento e aplicação do método tem-se uma ferramenta muito útil para tomada de decisão frente ao controle de degradação das fontes subterrâneas.

Outro ponto importante a ser salientado é que os poços considerados mais vulneráveis através do método GOD indica índices baixos a médios. No entanto estão sendo impactados, devido aos poluentes lançados das atividades antropogênicas e usos dos solos, assim mostra a importância e a eficácia de se avaliar a vulnerabilidade específica e a nível local, para obtenção de informações significativas de determinada área ao ser avaliada.

Os resultados desta pesquisa podem ajudar a entender a evolução das águas subterrâneas e os processos de poluição dos aquíferos. Ressalta-se, no entanto, o caráter metodológico do trabalho, que pela sua simplicidade e eficácia, poderá ser replicado em avaliações de outras áreas ou fontes.

Comprovou-se que a avaliação da vulnerabilidade utilizando parâmetros intrínsecos e específicos, permite um resultado amplo das características dos sistemas de captação avaliados, ordenando as fontes subterrâneas que estão mais vulneráveis, e que precisam de medidas de proteção, pois estão sob ameaças das

atividades antropogênicas que as degradam. Assim auxiliando aos gestores a priorizar as ações, pois há a necessidade de uma abordagem sistêmica, integrada e preditiva na gestão das águas.

O crescimento populacional e rápida urbanização das cidades exercem mais pressão sobre a demanda por recursos hídricos causando deterioração da qualidade e quantidade. Portanto, há uma necessidade de se proteger e buscar o uso sustentável para que se tenham recursos hídricos para essa geração e para as futuras.

Este estudo prioriza as áreas que estão mais degradadas para que sejam tomadas ações de controle e preservação das mesmas, assim auxiliando as empresas de saneamento a buscar e direcionar recursos nas áreas mais suscetíveis, para que sejam evitadas as perdas de fontes de captação, gerando prejuízos para a empresa.

A avaliação da vulnerabilidade utilizando parâmetros intrínsecos e específicos permite um resultado amplo das características individuais dos sistemas avaliados. Assim, os gestores das empresas de abastecimento de água e as autoridades locais, podem tomar as medidas necessárias para uma gestão sustentável, adaptada individualmente para águas subterrâneas como medidas de proteção nas áreas de captação, podendo incluir medidas para preservar a qualidade da água potável, através de restrições de uso da terra e redução dos impactos dos sistemas de drenagem urbana nas áreas de recarga.

A poluição da água subterrânea é muito mais difícil de ser mitigada do que a poluição das águas superficiais, porque a água subterrânea pode se mover por grandes distâncias através dos aquíferos.

Os avanços tecnológicos priorizam a disponibilidade de produtos químicos cada vez mais potentes que melhoram o tratamento das águas poluídas, para torná-las potáveis aos consumidores, porém a premissa deve ser a preservação das fontes, e esse estudo viabiliza o cenário das fontes para tomada de decisão quanto a preservação e o uso sustentável.

A solução para o enfrentamento das consequências de degradação dos recursos hídricos é adaptar-se a essas alterações, promovendo melhor governança em nível de bacias hidrográficas, desenvolvendo tecnologias avançadas de monitoramento e gestão, buscando a participação da comunidade (usuários e público em geral) nessa gestão e no compartilhamento dos processos tecnológicos melhorando a infraestrutura do banco de dados e dando maior sustentabilidade às

ações. A participação dos usuários, da iniciativa privada e do setor público deve ser um dos eixos principais dessa governança dos recursos hídricos, onde a participação deverá melhorar e aprofundar a sustentabilidade da oferta e demanda e a segurança coletiva da população em relação à disponibilidade e vulnerabilidade.

## 6.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

O modelo proposto neste trabalho alcançou resultados promissores, mas é necessária aplicação em outros sistemas para acompanhamento do desempenho, surgindo à oportunidade de que futuras pesquisas sejam realizadas a fim de propor melhorias.

Outra sugestão para trabalhos futuros seria propor uma classificação dessas áreas degradadas, adicionando-se mais parâmetros e utilizando um método voltado para o desenvolvimento de técnicas para classificação, assim propondo classes de vulnerabilidades.

Outros métodos multicritério podem ser aplicados além do TOPSIS, como os métodos da família ELECTRE e o VIKOR, que também podem ser utilizados para propor novos modelos, bem como a adição de parâmetros que atendam às necessidades dos decisores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAS. **Educação - Águas Subterrâneas**. Disponível em: <http://www.abas.org/educacao.php>. Acesso em: 20 jul. 2012.

ADIAT, K. A. N.; NAWAWI, M. N. M.; ABDULLAH, K. Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi criteria decision analysis as a spatial prediction tool - A case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources. **Journal of Hydrology**, v. 440–441, p. 75–89, 2012.

ALLER, L.; HACKETT, G.; THORNHILL, J. TIC : tandardized System for Evaluating Ground ater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings by. 1987.

ALLOUCHE, N. *et al.* A global risk approach to assessing groundwater vulnerability. **Environmental Modelling and Software**, v. 88, p. 168–182, 2017.

ALMEIDA, A. T. DE. O conhecimento e o uso de métodos multicritério de apoio a decisão. **Ed. Universitária da UFPE**, 2011.

ALVARADO, A. *et al.* 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.

ANJOS, R. M. Cemitérios: uma ameaça à saúde humana. **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2007.

ARAUJO, P. DE. **Água - Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/agua.html>. Acesso em: 5 nov. 2017

ARAUZO, M. Vulnerability of groundwater resources to nitrate pollution: A simple and effective procedure for delimiting Nitrate Vulnerable Zones. **Science of the Total Environment**, v. 575, p. 799–812, 2017.

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.

ARGAMASILLA, M.; BARBERÁ, J. A.; ANDREO, B. Factors controlling groundwater salinization and hydrogeochemical processes in coastal aquifers from southern Spain. **Science of the Total Environment**, v. 580, p. 50–68, 2017.

AYED, B. *et al.* 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, 2017.

BAUAB, K. C.; LEME, R. C. B. ANÁLISE DO PROCESSO DE IMPLEMENTAÇÃO DE CEMITÉRIOS NA ZONA RURAL DE FRANCISCO BELTRÃO – PR. **PERSPECTIVA GEOGRÁFICA**, v. 8, 2013.

BELTON, V.; STEWART, T. **Multiple criteria decision analysis: an integrated approach**. [s.l.] Springer Science e Business Media, 2002.

BERTOLO, R. *et al.* Água subterrânea para abastecimento público na Região Metropolitana de São Paulo: é possível utilizá-la em larga escala? Água subterrânea para abastecimento público na Região Metropolitana de São Paulo: é possível utilizá-la em larga escala? **Revista DAE**, v. 63, 2015.

BOHN, Noemia; GOETTEN, Willian Jucelio. Groundwater Governance in the States of São Paulo, Paraná, Santa Catarina and Rio Grande Do Sul: An Analysis from the Instruments of the National Water Resources Policy. *In: 2015 Ninth International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS)*. IEEE, 2015. p. 430-435.

BORGES, V. M. *et al.* Groundwater recharge estimating in the Serra Geral aquifer system outcrop area - Paraná State, Brazil. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 4, p. 338, 2017.

BOSCARDIN BORGHETTI, N. R.; BORGHETTI, J. R.; DA ROSA FILHO, E. F. Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul. 2004.

BRASIL. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm).

BRASIL. **Resolução Conama nº 396**, 2008.

BRASIL. **Portaria de Consolidação nº 5**BRASIL, 2017.

BUVANESHWARI, S. *et al.* 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.

CAMPOS, V. R. Modelo de apoio à decisão multicritério para priorização de projetos em saneamento. p. 175, 2011.

CETESB. **Alteração de Qualidade da Água e Avaliação de Tendências**. Disponível em: [http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/agua\\_sub/arquivos/Alteracao](http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/agua_sub/arquivos/Alteracao). Acesso em: 8 nov. 2017.

CIVITA, M. **Le Carte Délia. Vulnerabilitâdegli Acquiferiali’In-qulnamento Maps of aquifer vulnerability to pollution: Teoria e Pratica**. [s.l.] Pitagora, 1994.

CONICELLI, BRUNO PIRILO; HIRATA, R. Novos paradigmas na gestão das águas subterrâneas. **Águas Subterrâneas**, p. 1–18, 2016.

DO EGITO, TUANE BATISTA; FONTANA, MARCELE ELISA; MORAIS, D. C. Seleção de alternativas de conservação de água no meio urbano utilizando abordagem multicritério. **Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)**, v. 19, p. 209–221, 2015.

DRAKE, V. M.; BOUDER, J. W. Ground water nitrate-nitrogen trends in relation to urban development, Helena, Montana, 1971-2003. **Ground Water Monitoring and Remediation**, v. 25, n. 2, p. 118–130, 2005.

EL-FADEL, M. *et al.* 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.

EPA. **LAWS E REGULATIONS**. Disponível em: <https://www.epa.gov/laws-regulations>. Acesso em: 23 jan. 2018.

FILHO, J. L. A. *et al.* O Papel das Águas Subterrâneas como Reserva Estratégica de Água e Diretrizes para a sua Gestão Sustentável. **Revista Recursos Hídricos**, v. 32, n. 2, p. 53–61, 2011.

FOCAZIO, M. J. Assessing groundwater vulnerability to contamination: providing scientifically defensible information for decision makers. **US Dept. of the Interior, US Geological Survey**, 2002.

FOSTER, S. *et al.* Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. p. 104, 2006.

FOSTER, S. D. S.; HIRATA, R. C. A. Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data. **Lima: CEPIS/PAHO/WHO**, v. 78, n. 9, p. 1–7, 1988.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; ANDREO, B. The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? **Hydrogeology Journal**, v. 21, n. 7, p. 1389–1392, 2013.

FOSTER, S. S. D. **Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy: International Conference, 1987, Noordwijk Aan Zee, the Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants The Hague, Netherlands Organization for Applied S.** Netherlands Organization for Applied Scientific Research. **Anais...**1987.

FREIRE, R. C.; LIMA, R. D. A. Bactérias heterotróficas na rede de distribuição de água potável no município de Olinda-PE e sua importância para a saúde pública. **J Manag Prim Health Care**, v. 3, n. 2, p. 91–95, 2012.

GARDNER, K. K.; VOGEL, R. M. Predicting ground water nitrate concentration from land use. **Ground Water**, v. 43, n. 3, p. 343–352, 2005.

GASPAROTTO, F. A. **Avaliação ecotoxicológica e microbiológica em bicas em áreas urbanas de Piracicaba-SP.** [s.l: s.n.].

GORAI, A. K.; KUMAR, S. Geostatistics : An Overview Spatial Distribution Analysis of Groundwater Quality Index Using GIS : A Case Study of Ranchi Municipal Corporation ( RMC ) Area. **Geoinformatics & Geostatistics: An Overview**

**Research**, v. 1, n. 2, p. 1–11, 2013.

GOUDARZI, S. *et al.* 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

GUIGUER, N.; KOHNKE, M. W. Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos. **XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, n. 519, p. 13, 2002.

HAIDER, H.; AL-SALAMAH, I. S.; GHUMMAN, A. R. Development of Groundwater Quality Index Using Fuzzy-Based Multicriteria Analysis for Buraydah, Qassim, Saudi Arabia. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 42, n. 9, p. 4033–4051, 2017.

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.

HANCOX, J. *et al.* Assessing the vulnerability of over-exploited volcanic aquifer systems using multi-parameter analysis, Toluca Basin, Mexico. **Environmental Earth Sciences**, v. 59, n. 8, p. 1643–1660, 2009.

HELLER, P. G. B. Avaliação dos Serviços de Saneamento de Quatro Municípios da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas - MG. Uma Abordagem da Dimensão Tecnológica. p. 123, 2007.

HIRATA, R. *et al.* O sistema Aquífero Guarani e a crise hídrica nas regiões de campinas e são paulo (SP). **Revista USP**, v. 106, p. 59–70, 2015.

HIRATA, R.; CONICELLI, B. P. Groundwater resources in Brazil: A review of possible impacts caused by climate change. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 84, n. 2, p. 297–312, 2012.

HIRATA, R.; FERNANDES, A. J.; BERTOLO, R. As águas subterrâneas: longe dos olhos, longe do coração e das ações para sua proteção. **Acta Paulista de Enfermagem**, 2016.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A.; FERNANDES, A. Groundwater resources in the State of São Paulo ( Brazil ): **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 79, n. 1, p. 141–152, 2007.

HIRATA, R.; ZOBY, J. L. G.; OLIVEIRA, F. R. DE. Água Subterrânea: Reserva Estratégica Ou Emergencial. **Águas do Brasil: análises estratégicas**, p. 224, 2010.  
HWANG, C. L.; YOON, K. P. Multiple attributes decision making methods and applications. **Springer-Verlag**, 1981.

IQBAL, J.; PATHAK, G.; GORAI, A. K. Development of hierarchical fuzzy model for groundwater vulnerability to pollution assessment. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 5, p. 2713–2728, 2015.

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.

JI, P.; JIANG, R. Scale transitivity in the AHP. **Journal of the Operational Research Society**, v. 54, n. 8, p. 896–905, 2003

KAHRAMAN, C. **Fuzzy multi-criteria decision making: theory and applications with recent developments**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2008.

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, 2016.

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.

LACERDA, R. T. DE O.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. **Gestão & Produção**, v. 19, n. 1, p. 59–78, 2012.

LAPWORTH, D. J. *et al.* Urban groundwater quality in sub-Saharan Africa: current status and implications for water security and public health. **Hydrogeology Journal**, v. 25, n. 4, p. 1093–1116, 2017.

LAVOIE, R. *et al.* Integrating groundwater into land planning: A risk assessment methodology. **Journal of Environmental Management**, v. 154, p. 358–371, 2015.

LI, X. Z. *et al.* Multiple resources and their sustainable development in Urban Underground Space. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 55, p. 59–66, 2016.

LOPEZ-GUNN, E.; CORTINA, L. M. Is self-regulation a myth? Case study on Spanish groundwater user associations and the role of higher-level authorities. **Hydrogeology Journal**, v. 14, n. 3, p. 361–379, 2006.

LÓPEZ, H. M. L.; ALMEIDA, A. T. DE. Utilizando PROMETHEE V para seleção de portfólio de projetos de uma empresa de energia elétrica. **Production**, v. 24, n. 3, p. 559–571, 2014.

MACHIWAL, D.; JHA, M. K.; MAL, B. C. GIS-based assessment and characterization of groundwater quality in a hard-rock hilly terrain of Western India. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 174, n. 1–4, p. 645–663, 2011.

MARTINS, M. T. *et al.* Qualidade bacteriológica de águas subterrâneas em cemitérios. **Revista de Saude Publica**, v. 25, n. 1, p. 47–52, 1991.

MOCELLIN, RODERLEI CLEBER; 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, p. 567–579,

2009.

MONTENEGRO, S. **Intrusão marinha**. Disponível em:

[http://www.apac.pe.gov.br/noticias.php?noticia\\_id=253](http://www.apac.pe.gov.br/noticias.php?noticia_id=253). Acesso em: 5 dez. 2017.

MOREIRA, R. A. Análise Multicritério dos Projetos do Sebrae / RJ através do Electre IV. 2007.

NADIRI, A. A. *et al.* Mapping vulnerability of multiple aquifers using multiple models and fuzzy logic to objectively derive model structures. **Science of The Total Environment**, v. 593–594, p. 75–90, 2017.

NESHAT, A.; PRADHAN, B. An integrated DRASTIC model using frequency ratio and two new hybrid methods for groundwater vulnerability assessment. **Natural Hazards**, v. 76, n. 1, p. 543–563, 2015.

NETO, S. E. D. S. QUALIDADE BACTERIOLÓGICA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM CEMITÉRIOS. **Águas Subterrâneas**, 2013.

NOBRE, R. C. M. *et al.* Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 94, n. 3–4, p. 277–292, 2007.

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.

OKE, S. A.; FOURIE, F. Guidelines to groundwater vulnerability mapping for Sub-Saharan Africa. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 5, n. June, p. 168–177, 2017.

PISINARAS, V.; POLYCHRONIS, C.; GEMITZI, A. Intrinsic groundwater vulnerability determination at the aquifer scale: a methodology coupling travel time estimation and rating methods. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 1, p. 1–12, 2016.

PIZZOL, L. *et al.* Risk-based prioritization methodology for the classification of groundwater pollution sources. **Science of the Total Environment**, v. 506–507, p. 505–517, 2015.

REBOLLEDO, B. *et al.* 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.

REBOUÇAS, ALDO DA CUNHA; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. Águas doces no Brasil. **Rev. e ampl**, 2006.

REZAEI, F.; SAFAVI, H. R.; AHMADI, A. Groundwater vulnerability assessment using fuzzy logic: A case study in the zayandehrood aquifers, Iran. **Environmental Management**, v. 51, n. 1, p. 267–277, 2013.

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.

ROBINS, N. S.; CHILTON, P. J.; COBBING, J. E. Adapting existing experience with aquifer vulnerability and groundwater protection for Africa. **Journal of African Earth Sciences**, v. 47, n. 1, p. 30–38, 2007.

ROSA FILHO, ERNANI FRANCISCO DA *et al.* A importância do sistema aquífero serra geral para a cultura da soja no estado do paraná. ** guas Subterrâneas**, v. 20, 2006.

ROY, B. **Multicriteria methodology for decision aid**. [s.l.] Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of mathematical psychology**, v. 15, p. 234–281, 1977.

SAHOO, S. *et al.* Index-based groundwater vulnerability mapping using quantitative parameters. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 6, 2016.

SANTOS, R. Saúde E Qualidade Da  gua: Análises Microbiol gicas E Físico-Químicas Em  gua Subterrâneas. **Revista Contexto & Saúde**, v. 13, n. 24/25, p. 46–53, 2014.

 ENER,  .;  ENER, E.; DAVRAZ, A. Assessment of groundwater quality and health risk in drinking water basin using GIS. **Journal of Water and Health**, v. 15, n. 1, p. 112–132, 2017.

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.

SILVA, Alessandra de Barros. Conectividade e compartimentac o magnética-estrutural dos Sistemas Aquíferos Serra Geral e Guarani na região Central do Estado do Paraná. 2007.

SILVA, J. F. F. DA; HAIE, N. PLANEAMENTO E GESTÃO GLOBAL DE RECURSOS HÍDRICOS COSTEIROS. Estratégias para a Preven o e Controlo da Intrusão Salina. **5  Congresso da água**, v. d, p. 13, 2000.

SPERLING, Marcos von. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. *In*: Princípios básicos do tratamento de esgotos. Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

SRDJEVIC, B. Combining different prioritization methods in the analytic hierarchy process synthesis. **Computers and Operations Research**, v. 32, n. 7, p. 1897–1919, 2005.

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.

STEMPVOORT, D. VAN; 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.

TOMASZKIEWICZ, M.; ABOU NAJM, M.; EL-FADEL, M. Development of a groundwater quality index for seawater intrusion in coastal aquifers. **Environmental Modelling and Software**, v. 57, p. 13–26, 2014.

TROJAN, F.; MARÇAL, R. F. M.; BARAN, L. R. Classificação Dos Tipos De Manutenção Pelo Método D E Análise Multicritério Electre Tri. **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, p. 343–357, 2013.

TROJAN, F.; MORAIS, D. C. Prioritising alternatives for maintenance of water distribution networks: A group decision approach. **Water SA**, v. 38, n. 4, p. 555–564, 2012.

VALLE JUNIOR, R. F. *et al.* Multi Criteria Analysis for the monitoring of aquifer vulnerability: A scientific tool in environmental policy. **Environmental Science & Policy**, v. 48, p. 250–264, 2015.

VARNIER, Claudia; GUERRA, Sandra Procel; HIRATA, Ricardo. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DOS PADRÕES DE OCUPAÇÃO URBANA E CONTAMINAÇÃO POR NITRATO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU, CENTRO-OESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Águas Subterrâneas**, v. 1, 2009.

VINCKE, P. **Multicriteria decision-aid**. [s.l.] John Wiley & Sons, 1992.

WITKOWSKI, A. J.; KOWALCZYK, A.; VRBA, J. **Groundwater Vulnerability Assessment and Mapping**. 1. ed. [s.l.] CRC Press, 2014.

YAMAGUCHI, M. U. *et al.* Qualidade microbiológica da água para consumo humano em instituição de ensino de Maringá-PR. **o Mundo da Saúde**, v. 37, n. 312–320, 2013.

ZAHEDI, S.; AZARNIVAND, A.; CHITSAZ, N. Groundwater quality classification derivation using Multi-Criteria-Decision-Making techniques. **Ecological Indicators**, v. 78, p. 243–252, 2017.

ZEIDAN, B. A. Groundwater Degradation and Remediation in the Nile Delta Aquifer. **springer**, p. 159–232, 2017.

ZOBY, J. L. G. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. **Águas Subterrâneas**, 2008.



**APÊNDICE B - Análise de consistência**

<b>DECISOR 01</b>						
	C1	C2	C3	C4	C5	
C1	1,0	0,3	3,0	4,0	0,3	
C2	4,0	1,0	5,0	4,0	2,0	
C3	0,3	0,2	1,0	0,3	0,3	
C4	0,3	0,3	3,0	1,0	0,3	
C5	4,0	0,5	4,0	3,0	1,0	
Soma	9,6	2,2	16,0	12,3	3,8	
	C1	C2	C3	C4	C5	Pesos
C1	0,104	0,114	0,188	0,324	0,065	0,159
C2	0,417	0,455	0,313	0,324	0,522	0,406
C3	0,035	0,091	0,063	0,027	0,065	0,056
C4	0,026	0,114	0,188	0,081	0,087	0,099
C5	0,417	0,227	0,250	0,243	0,261	0,280
<b>Avaliação Consistência</b>						
MH(s)	5,190					
N	5,000					
ICH	0,057					
HRI	1,061					
RC	0,054					
RC Máx.	0,100					
<b>DECISOR 02</b>						
	C1	C2	C3	C4	C5	
C1	1,0	0,2	0,3	0,5	0,3	
C2	5,0	1,0	3,0	3,0	1,0	
C3	3,0	0,3	1,0	2,0	1,0	
C4	2,0	0,3	0,5	1,0	0,5	
C5	4,0	1,0	1,0	2,0	1,0	
Soma	15,0	2,9	5,8	8,5	3,8	
	C1	C2	C3	C4	C5	Pesos
C1	0,067	0,070	0,057	0,059	0,067	0,064
C2	0,333	0,349	0,514	0,353	0,267	0,363
C3	0,200	0,116	0,171	0,235	0,267	0,198
C4	0,133	0,116	0,086	0,118	0,133	0,117
C5	0,267	0,349	0,171	0,235	0,267	0,258
<b>Avaliação Consistência</b>						
MH(s)	5,148					
N	5,000					
ICH	0,044					
HRI	1,061					
RC	0,042					
RC Máx.	0,100					

<b>DECISOR 03</b>						
	C1	C2	C3	C4	C5	
C1	1,0	0,3	0,3	0,3	0,3	
C2	3,0	1,0	4,0	4,0	1,0	
C3	3,0	0,3	1,0	0,3	0,3	
C4	3,0	0,3	3,0	1,0	0,3	
C5	4,0	1,0	4,0	4,0	1,0	
Soma	14,0	2,8	12,3	9,7	2,8	
	C1	C2	C3	C4	C5	Pesos
C1	0,071	0,118	0,027	0,034	0,091	0,068
C2	0,214	0,353	0,324	0,414	0,364	0,334
C3	0,214	0,088	0,081	0,034	0,091	0,102
C4	0,214	0,088	0,243	0,103	0,091	0,148
C5	0,286	0,353	0,324	0,414	0,364	0,348
<b>Avaliação Consistência</b>						
MH(s)	5,141					
N	5,000					
ICH	0,042					
HRI	1,061					
RC	0,040					
RC Máx.	0,100					

**APÊNDICE C - Aplicação do método Topsis**

Alternativas	Dados Iniciais				
	C1 (-)	C2 (-)	C3 (+)	C4 (-)	C5(-)
A1	0,336	0,190	0,914	0,130	1,000
A2	0,294	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	0,294	0,273	0,886	0,143	0,000
A6	0,294	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
Vetor	1,22	0,94	2,61	0,47	2,65

Alternativas	Matriz Normalizada Vetor				
	C1 (-)	C2 (-)	C3 (+)	C4 (-)	C5(-)
A1	0,2762	0,2019	0,3501	0,2767	0,3780
A2	0,2417	0,0000	0,1094	0,3703	0,0000
A3	0,3452	0,0000	0,1203	0,3384	0,0000
A4	0,2762	0,5365	0,2735	0,1703	0,3780
A5	0,2417	0,2900	0,3392	0,3043	0,0000
A6	0,2417	0,5387	0,3282	0,2958	0,3780
A7	0,3452	0,0563	0,3501	0,2107	0,0000
A8	0,3452	0,4144	0,2954	0,2362	0,3780
A9	0,3452	0,0000	0,3501	0,2511	0,3780
A10	0,2762	0,0478	0,2298	0,2469	0,0000
A11	0,2071	0,0000	0,2845	0,4150	0,3780
A12	0,2762	0,3464	0,2954	0,2575	0,3780

Alternativas	Matriz Peso versus Normalização				
	0,066	0,384	0,141	0,131	0,268
A1	0,0182	0,0775	0,0494	0,0362	0,1013
A2	0,0160	0,0000	0,0154	0,0485	0,0000
A3	0,0228	0,0000	0,0170	0,0443	0,0000
A4	0,0182	0,2060	0,0386	0,0223	0,1013
A5	0,0160	0,1114	0,0478	0,0399	0,0000
A6	0,0160	0,2068	0,0463	0,0388	0,1013
A7	0,0228	0,0216	0,0494	0,0276	0,0000
A8	0,0228	0,1591	0,0417	0,0309	0,1013
A9	0,0228	0,0000	0,0494	0,0329	0,1013
A10	0,0182	0,0184	0,0324	0,0323	0,0000
A11	0,0137	0,0000	0,0401	0,0544	0,1013
A12	0,0182	0,1330	0,0417	0,0337	0,1013

Alternativas	Distância a Solução Negativa Ideal					S <sup>-</sup>
	C1 (-)	C2 (-)	C3 (+)	C4 (-)	C5(-)	
A1	-0,0046	-0,1293	0,0339	-0,0181	0,0000	<b>0,1350</b>
A2	-0,0068	-0,2068	0,0000	-0,0059	-0,1013	<b>0,2305</b>
A3	0,0000	-0,2068	0,0015	-0,0100	-0,1013	<b>0,2305</b>
A4	-0,0046	-0,0008	0,0231	-0,0321	0,0000	<b>0,0398</b>
A5	-0,0068	-0,0955	0,0324	-0,0145	-0,1013	<b>0,1438</b>
A6	-0,0068	0,0000	0,0309	-0,0156	0,0000	<b>0,0352</b>
A7	0,0000	-0,1852	0,0339	-0,0268	-0,1013	<b>0,2155</b>
A8	0,0000	-0,0477	0,0262	-0,0234	0,0000	<b>0,0593</b>
A9	0,0000	-0,2068	0,0339	-0,0215	0,0000	<b>0,2107</b>
A10	-0,0046	-0,1885	0,0170	-0,0220	-0,1013	<b>0,2158</b>
A11	-0,0091	-0,2068	0,0247	0,0000	0,0000	<b>0,2085</b>
A12	-0,0046	-0,0738	0,0262	-0,0206	0,0000	<b>0,0812</b>

Alternativas	Distância a Solução Positiva Ideal					S <sup>+</sup>
	C1 (-)	C2 (-)	C3 (+)	C4 (-)	C5(-)	
A1	0,0046	0,0775	0,0000	0,0139	0,1013	<b>0,1284</b>
A2	0,0023	0,0000	-0,0339	0,0262	0,0000	<b>0,0429</b>
A3	0,0091	0,0000	-0,0324	0,0220	0,0000	<b>0,0402</b>
A4	0,0046	0,2060	-0,0108	0,0000	0,1013	<b>0,2299</b>
A5	0,0023	0,1114	-0,0015	0,0176	0,0000	<b>0,1128</b>
A6	0,0023	0,2068	-0,0031	0,0164	0,1013	<b>0,2309</b>
A7	0,0091	0,0216	0,0000	0,0053	0,0000	<b>0,0241</b>
A8	0,0091	0,1591	-0,0077	0,0086	0,1013	<b>0,1892</b>
A9	0,0091	0,0000	0,0000	0,0106	0,1013	<b>0,1023</b>
A10	0,0046	0,0184	-0,0170	0,0100	0,0000	<b>0,0273</b>
A11	0,0000	0,0000	-0,0093	0,0321	0,1013	<b>0,1066</b>
A12	0,0046	0,1330	-0,0077	0,0114	0,1013	<b>0,1678</b>

Alternativas	C*	Ranking
A1	0,5126	<b>5</b>
A2	0,8430	<b>9</b>
A3	0,8515	<b>10</b>
A4	0,1476	<b>2</b>
A5	0,5604	<b>6</b>
A6	0,1324	<b>1</b>
A7	0,8996	<b>12</b>
A8	0,2386	<b>3</b>
A9	0,6733	<b>8</b>
A10	0,8876	<b>11</b>
A11	0,6616	<b>7</b>
A12	0,3260	<b>4</b>

A6	<b>0,1211</b>	1
A4	<b>0,1372</b>	2
A8	<b>0,2255</b>	3
A12	<b>0,3114</b>	4
A1	<b>0,4881</b>	5
A5	<b>0,5777</b>	6
A11	<b>0,6334</b>	7
A9	<b>0,6410</b>	8
A2	<b>0,8581</b>	9
A3	<b>0,8614</b>	10
A10	<b>0,8938</b>	11
A7	<b>0,8944</b>	12